

МИНИСТЕРСТВО СЕЛЬСКОГО ХОЗЯЙСТВА
И ПРОДОВОЛЬСТВИЯ РЕСПУБЛИКИ БЕЛАРУСЬ

Учреждение образования
«БЕЛОРУССКИЙ ГОСУДАРСТВЕННЫЙ
АГРАРНЫЙ ТЕХНИЧЕСКИЙ УНИВЕРСИТЕТ»

В. В. Гурин

АВТОМАТИЧЕСКАЯ ЗАЩИТА ЭЛЕКТРООБОРУДОВАНИЯ

*Рекомендовано Учебно-методическим объединением
высших учебных заведений Республики Беларусь
по образованию в области сельского хозяйства в качестве
учебно-методического пособия для студентов высших учебных
заведений, обучающихся по специальностям 1-74 06 05-01
Энергетическое обеспечение сельского хозяйства
(электроэнергетика), 1-53 01 01-09 Автоматизация
технологических процессов и производств (сельское хозяйство)*

В двух частях

Часть 2

ЗАЩИТА АСИНХРОННЫХ ТРЕХФАЗНЫХ ЭЛЕКТРОДВИГАТЕЛЕЙ

Минск
БГАТУ
2011

УДК 621.313.333 (07)
ББК 31. 261.63 я 7
А22

Рецензенты:

кандидат технических наук,
профессор кафедры электроснабжения БГАТУ *Г. И. Янукович*;
кандидат технических наук, доцент кафедры «Автоматизация
производственных процессов и электротехники» БГАТУ
Л. М. Давидович;
заместитель директора по научной работе РУП «Белорусский
теплоэнергетический институт», кандидат технических наук
М. Р. Кирплюк

Гурин, В. В.

А22 Автоматическая защита электрооборудования. В 2 ч. Ч. 2.
Защита асинхронных трехфазных электродвигателей : учебно-
методическое пособие / В. В. Гурин. – Минск : БГАТУ, 2011. –
452 с.
ISBN 978-985-519-421-8.

Приведена характеристика объекта защиты – асинхронного трехфазного электродвигателя, изложена защита асинхронных трехфазных электродвигателей в неполнофазном режиме работы, при технологической перегрузке, температурная защита, защита от увлажнения и в других случаях, комплексная защита, технико-экономическое обоснование выбора защиты асинхронного трехфазного электродвигателя.

Для студентов вузов и ССУЗов специальностей 1-74 06 05-01 Энергетическое обеспечение сельского хозяйства (электроэнергетика) и 1-53 01 01-09 Автоматизация технологических процессов и производств (сельское хозяйство). Для инженерно-технических работников, специализирующихся в области исследования, проектирования и эксплуатации асинхронных трехфазных электродвигателей.

УДК 621.313.333 (07)
ББК 31. 261.63 я 7

ISBN 978-985-519-421-8 (ч. 2)
ISBN 978-985-519-288-7

© БГАТУ, 2011

ОГЛАВЛЕНИЕ

Предисловие	8
-------------------	---

Глава 1. ХАРАКТЕРИСТИКА АСИНХРОННОГО ТРЕХФАЗНОГО ЭЛЕКТРОДВИГАТЕЛЯ КАК ОБЪЕКТА ЗАЩИТЫ

1.1. Электродвигатели в сельскохозяйственном производстве.....	9
1.2. Особенности эксплуатации электродвигателей в сельскохозяйственном производстве.....	18
1.3. Механические, электромеханические, рабочие и энергетические характеристики асинхронного трехфазного электродвигателя	23
1.4. Отказы и аварийные состояния асинхронных трехфазных электродвигателей	32
1.5. Асинхронный трехфазный электродвигатель как объект защиты	36
1.6. Контрольные вопросы	38

Глава 2. ЗАЩИТА АСИНХРОННЫХ ТРЕХФАЗНЫХ ЭЛЕКТРОДВИГАТЕЛЕЙ ОТ РАБОТЫ В НЕПОЛНОФАЗНОМ РЕЖИМЕ, ПРИ НЕДОПУСТИМОМ ОТКЛОНЕНИИ И АСИММЕТРИИ НАПРЯЖЕНИЙ

2.1. Изменение параметров трехфазного асинхронного электродвигателя при работе в неполнофазном режиме	41
2.2. Защита асинхронного трехфазного электродвигателя от работы в неполнофазном режиме с контролем напряжения сети	54
2.3. Защита асинхронного трехфазного электродвигателя от работы в неполнофазном режиме с контролем напряжения или тока нулевой последовательности.....	58
2.4. Защита асинхронного трехфазного электродвигателя от работы в неполнофазном режиме с контролем напряжения или тока обратной последовательности.....	63

2.5. Защита асинхронного трехфазного электродвигателя от работы в неполнофазном режиме с контролем наличия токов фаз	71
2.6. Защита асинхронного трехфазного электродвигателя от работы в неполнофазном режиме с контролем угла между напряжениями или токами фаз.....	74
2.7. Защита асинхронного трехфазного электродвигателя от работы в неполнофазном режиме с контролем постоянной составляющей выпрямленного напряжения датчиков тока фаз.....	79
2.8. Защита асинхронного трехфазного электродвигателя от работы в неполнофазном режиме с контролем электромагнитных полей рассеяния обмоток статора.....	89
2.9. Обеспечение непрерывности работы асинхронного трехфазного электродвигателя при неполнофазном режиме сети	93
2.10. Защита асинхронного трехфазного электродвигателя от работы при недопустимом отклонении и асимметрии напряжений	96
2.11. Контрольные вопросы	102

Глава 3. ЗАЩИТА АСИНХРОННЫХ ТРЕХФАЗНЫХ ЭЛЕКТРОДВИГАТЕЛЕЙ ПРИ ТЕХНОЛОГИЧЕСКОЙ ПЕРЕГРУЗКЕ

3.1. Изменение параметров асинхронного трехфазного электродвигателя при технологической перегрузке	104
3.2. Перегрузочная характеристика асинхронного электродвигателя и защитная характеристика устройства защиты электродвигателя от перегрузки по току	111
3.3. Токсовая защита асинхронного трехфазного электродвигателя от перегрузки.....	124
3.4. Защита асинхронного трехфазного электродвигателя в стопорном режиме.....	137
3.5. Основы теории тепловой защиты электродвигателя при перегрузке	139
3.6. Конструкции электротепловых токовых биметаллических реле	143

3.7. Параметры электротепловых токовых реле и их выбор	149
3.8. Технические данные электротепловых токовых реле	152
3.9. Проверка и настройка электротепловых токовых реле	163
3.10. Защита асинхронного трехфазного электродвигателя при перегрузке с контролем коэффициента мощности	168
3.11. Контрольные вопросы	171

Глава 4. ТЕМПЕРАТУРНАЯ ЗАЩИТА АСИНХРОННЫХ ТРЕХФАЗНЫХ ЭЛЕКТРОДВИГАТЕЛЕЙ

4.1. Нагрев и охлаждение асинхронных электродвигателей	174
4.2. Нагревостойкость изоляции обмоток асинхронных электродвигателей	191
4.3. Температурная защита с контролем средней температуры обмотки по ее сопротивлению	195
4.4. Температурные защиты с коммутирующими термодетекторами	199
4.5. Температурные защиты с термодетекторами, обеспечивающими релейные характеристики срабатывания	207
4.6. Термодетекторы для быстродействующих температурных защит электродвигателей	219
4.7. Характеристика позисторов температурных защит электродвигателей	227
4.8. Обоснование требуемой постоянной времени нагрева быстродействующего термодетектора температурной защиты электродвигателя	230
4.9. Совершенствование температурных защит электродвигателей	237
4.10. Монтаж термодетекторов температурных защит и проверка температурных защиты УВТЗ на работоспособность	252
4.11. Области применения тепловых и температурных защит электродвигателей	255

4.12. Температурные защиты, моделирующие нагрев электродвигателя	259
4.13. Контрольные вопросы	264

Глава 5. ЗАЩИТА АСИНХРОННЫХ ТРЕХФАЗНЫХ ЭЛЕКТРОДВИГАТЕЛЕЙ ОТ УВЛАЖНЕНИЯ ИЗОЛЯЦИИ ОБМОТОК И ИМПУЛЬСНЫХ ПЕРЕНАПРЯЖЕНИЙ

5.1. Увлажнение изоляции обмоток асинхронных трехфазных электродвигателей в условиях эксплуатации	266
5.2. Контроль сопротивления изоляции обмоток асинхронных электродвигателей	275
5.3. Защита обмоток асинхронных электродвигателей от увлажнения во время технологических пауз	286
5.4. Токовая подсушка и предотвращение увлажнения изоляции обмоток асинхронных двигателей во время технологических пауз	290
5.5. Предпусковой контроль параметров электрической сети и асинхронного электродвигателя	299
5.6. Защита асинхронных электродвигателей от импульсных перенапряжений	309
5.7. Контрольные вопросы	311

Глава 6. КОМПЛЕКСНАЯ ЗАЩИТА АСИНХРОННЫХ ТРЕХФАЗНЫХ ЭЛЕКТРОДВИГАТЕЛЕЙ

6.1. Выбор основного параметра асинхронного трехфазного электродвигателя для построения комплексной и универсальной защиты	313
6.2. Простейшая комплексная защита асинхронного электродвигателя	317
6.3. Комплексные электронные устройства защиты асинхронных электродвигателей	319
6.4. Комплексные микропроцессорные устройства защиты асинхронных электродвигателей	355
6.5. Защита автоматической ненаблюдаемой установки в аварийных состояниях	395

6.6. Комплексные устройства защиты погружных электродвигателей.....	401
6.7. Контрольные вопросы	419

**Глава 7. ТЕХНИКО-ЭКОНОМИЧЕСКОЕ
ОБОСНОВАНИЕ ВЫБОРА УСТРОЙСТВ ЗАЩИТЫ
АСИНХРОННОГО ТРЕХФАЗНОГО ЭЛЕКТРОДВИГАТЕЛЯ**

7.1. Выбор устройств защиты асинхронного трехфазного электродвигателя по критерию эффективности	421
7.2. Выбор устройств защиты асинхронного трехфазного электродвигателя по экономическому критерию	424
7.3. Побочные эффекты от использования устройств защиты электродвигателей	430
7.4. Перспективы развития устройств защиты асинхронных трехфазных электродвигателей	432
7.5. Контрольные вопросы.....	435
Список использованной литературы.....	437

ПРЕДИСЛОВИЕ

Развитие электрооборудования и автоматического управления машинами и установками потребовало систематизировать и выделить вопросы автоматической защиты электрооборудования в отдельную дисциплину «Автоматическая защита электрооборудования». Эту дисциплину в Белорусском государственном аграрном техническом университете читает автор.

Учебно-методическое пособие «Автоматическая защита электрооборудования» состоит из двух частей: «Защита электрических цепей» (часть 1); «Защита трехфазных асинхронных электродвигателей» (часть 2). Учебно-методическое пособие написано в соответствии с учебной программой указанной выше дисциплины.

Первая часть учебно-методического пособия «Автоматическая защита электрооборудования» под названием «Защита электрических цепей» вышла в свет в 2010 году.

Вторая часть учебно-методического пособия «Автоматическая защита электрооборудования» состоит из 7 глав.

В главе 1 приведена характеристика объекта защиты – асинхронного трехфазного электродвигателя.

В главе 2 изложена защита асинхронных трехфазных электродвигателей в неполнофазном режиме работы, при недопустимом отклонении и асимметрии напряжений, а в главе 3 – при технологической перегрузке.

Глава 4 посвящена температурной защите, а глава 5 – защите от увлажнения изоляции обмоток и перенапряжений.

Комплексные защиты изложены в главе 6, а технико-экономическому обоснованию выбора защиты посвящена глава 7.

Теоретический материал каждой главы заканчивается контрольными вопросами. Перечень литературы для всех глав общий.

Автор надеется, что материал, изложенный в книге, будет полезен не только студентам вузов и учащимся ССУЗов, но и инженерам и техникам электроэнергетических профессий, работающим на производстве.

Автор выражает благодарность рецензентам доценту БГТУ Л. М. Давидовичу, профессору БГАТУ Г. И. Янукович, заместителю директора по научной работе РУП «БелТЭИ» М. Р. Кирплюку за ценные замечания, а также инженеру П. А. Равинскому за подготовку рисунков.

Глава 1. ХАРАКТЕРИСТИКА АСИНХРОННОГО ТРЕХФАЗНОГО ЭЛЕКТРОДВИГАТЕЛЯ КАК ОБЪЕКТА ЗАЩИТЫ

1.1. Электродвигатели в сельскохозяйственном производстве

На сельскохозяйственных предприятиях наибольшее применение (99,9 %) находят асинхронные трехфазные электродвигатели с короткозамкнутым ротором. По этой причине далее будут рассматриваться только такие электродвигатели.

В сельскохозяйственном производстве применяют электродвигатели различных мощностей, но преобладают электродвигатели мощностью 0,6–13 кВт, причем в этой группе наибольшее число электродвигателей имеет мощность 1,5–5,5 кВт (60 % от всех используемых) [1]. На рисунке 1.1 приведена гистограмма распределения электродвигателей по мощности в сельскохозяйственном производстве (по данным [2]).

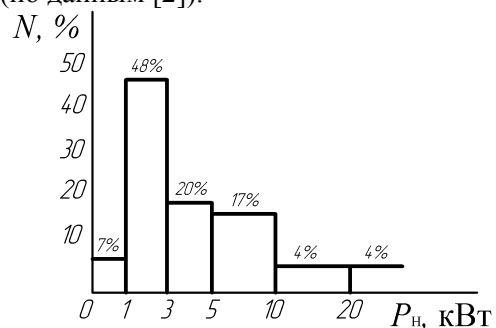


Рисунок 1.1 – Гистограмма распределения асинхронных электродвигателей по мощности в сельскохозяйственном производстве

Из рисунка 1.1 следует, что наибольшее число электродвигателей соответствует мощности 1–3 кВт. Электродвигатели мощностью до 20 кВт составляют 96 %. Примерно такое же распределение электродвигателей по мощности приведено в [3].

Распределение электродвигателей по мощности зависит от применяемого на объекте технологического оборудования. В подтверждение этого тезиса используем данные, приведенные в [4]. В кормоцехе применяют три технологические линии: 1) для производства концентрированных кормов для животноводства; 2) для

производства концентрированных кормов для птицы; 3) для производства травяной муки.

В первой линии преобладают нории, транспортеры и вентиляторы, во второй линии – шнеки, нории и дозаторы, в третьей линии – вентиляторы, дозаторы и дробилки (таблица 1.1).

Таблица 1.1 – Технологические машины кормоцеха

Наименование машин	Количество машин (шт.) по линиям		
	концентрированных кормов для животных	концентрированных кормов для птицы	травяной муки
Нории	6	4	4
Транспортеры	6	1	8
Шнеки	–	5	–
Вентиляторы и пневмотранспортеры	4	–	14
Дозаторы	1	4	15
Дробилки	2	2	14
Прочие	–	2	8

Поскольку дробилки и вентиляторы – энергоемкие машины, то больших мощностей электродвигателей следует ожидать в третьей линии. Таблица 1.2 подтверждает этот вывод.

Таблица 1.2 – Распределение электродвигателей технологических машин кормоцеха по мощности

Мощность электродвигателя, кВт	Распределение электродвигателей по мощности в линиях и в цеху, %			
	концентрированных кормов для животных	концентрированных кормов для птицы	травяной муки	всего по цеху
0,75–1,5	5,3	26,5	15,7	16,0
2,2–3,0	52,7	21,0	27,5	31,0
4,0–7,5	31,5	42,0	23,5	29,0
10,0–17,0	–	–	11,7	7,0
18,5–100	10,5	10,5	21,6	17,0

Из таблицы 1.2 следует, что в линии концентрированных кормов для животных преобладают электродвигатели мощностью от 2,2 до 7,5 кВт. Их количество составляет 84,2 % от всех электродвигателей кормоцеха. Во второй линии преобладают электродвигатели мощностью от 4,0 до 7,5 кВт (42 %), в третьей – от 2,2 до 3,0 кВт (27,5 %). В последней линии заметное число (21,6 %) составляют электродвигатели больших мощностей (для дробилок, вентиляторов, пневмотранспорта).

Таким образом, распределение электродвигателей по мощности связано с применяемыми технологическими машинами.

Считается, что в животноводстве используется около 50 % электродвигателей, в растениеводстве – 30 %, на других объектах – 20 %.

Наибольшее количество электродвигателей приходится на механизмы, занятые переработкой кормов на комбикормовых заводах, в кормоцехах и кормокухнях, на зерноперерабатывающих комплексах и т. п.

В сельскохозяйственном производстве используются электродвигатели серий 4А и АИР. Они охватывают диапазон мощностей от 0,06 до 400 кВт при высоте оси вращения от 50 до 355 мм. Их обмотки имеют схемы соединения и напряжения, приведенные в таблице 1.3 [5].

Таблица 1.3 – Схемы соединения и номинальные напряжения обмоток трехфазных асинхронных электродвигателей серий 4А и АИР

Параметры	Значения параметров при мощности электродвигателей, кВт			
	0,06 – 0,37	0,55 – 11	15 – 110	132 – 400
Номинальное напряжение	220; 380	220; 380; 660	220/380; 380/660	380/660
Схема соединения обмоток	Δ; Υ	Δ; Υ; Υ	Δ/Υ; Δ/Υ	Δ/Υ

Распределение электродвигателей по частоте вращения в сельскохозяйственном производстве приведено на рисунке 1.2 (по данным [2]).

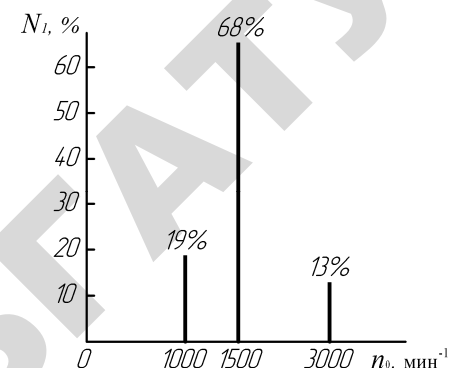


Рисунок 1.2 – Гистограмма распределения асинхронных электродвигателей по частоте вращения в сельскохозяйственном производстве

Из рисунка 1.2 следует, что наибольшее число электродвигателей (68 %) в сельскохозяйственном производстве имеют частоту вращения около 1500 мин⁻¹. Примерно такие же данные приведены в [3]. Для конкретного хозяйства распределение электродвигателей по частоте вращения определяется применяемым на объекте технологическим оборудованием.

Электродвигатели серии 4А имеют расчетный срок службы не менее 15 лет при наработке 40 тыс. ч. Нарботка обмотки статора – не менее 20 тыс. ч, расчетная наработка подшипников – не менее 14 тыс. ч. Вероятность безотказной работы – не менее 0,9 за 10 тыс. ч наработки [5].

Серия электродвигателей АИР имеет энергетические, пусковые, виброакустические показатели, превосходящие аналогичные показатели серии электродвигателей 4А при меньшей массе и большей надежности. Вероятность безотказной работы – не менее 0,9 за 20 тыс. ч наработки, что в 2 раза больше, чем для электродвигателей серии 4А [6].

Однако эти данные относятся к требованиям стандартов или ТУ, по которым выпускают электродвигатели заводы-изготовители. Эксплуатационная надежность электродвигателей в сельском хозяйстве гораздо ниже. Например, по данным многочисленных наблюдений среднее время безотказной работы электродвигателей серии 4А не превышает 4,5 года, вероятность безотказной работы в течение 10 тыс. ч при доверительной вероятности 80 % составляет 0,65, что существенно ниже приведенных требований стандартов [7].

В сериях 4А и АИР предусмотрены электродвигатели трех исполнений по степени защиты (ГОСТ 17494-72). Степень защиты IP44 имеют электродвигатели всех мощностей. Это *закрытые электродвигатели*, имеющие наружный обдув (рисунок 1.3).

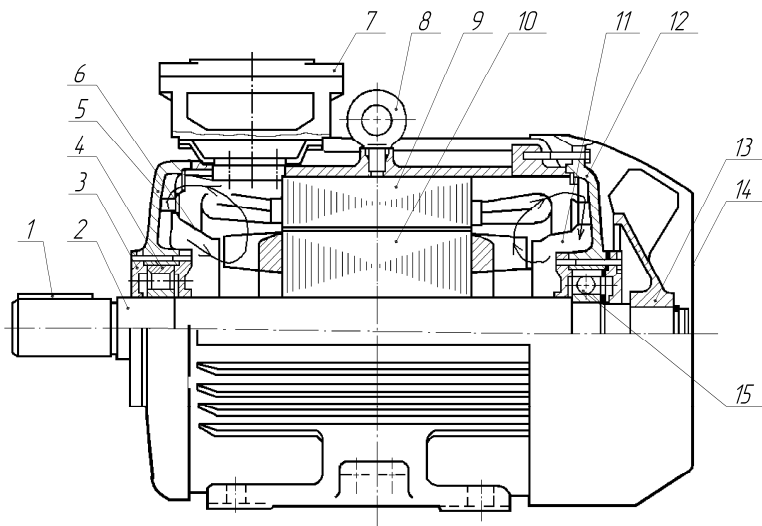


Рисунок 1.3 – Конструкция закрытого обдуваемого электродвигателя 4А250 степени защиты IP44:

1 – шпонка; 2 – вал ротора; 3 – крышка внешнего подшипникового узла; 4 – роликовый подшипник; 5, 12 – подшипниковый щит; 6, 11 – направляющий щиток; 7 – входное устройство; 8 – рым-болт; 9 – статор; 10 – ротор; 13 – вентилятор обдува; 14 – кожух вентилятора; 15 – шариковый подшипник

В такой системе вентиляции температура обмотки статора максимальна в лобовых частях. У электродвигателей с высотами оси вращения 50–180 мм вентиляционные лопасти ротора работают как мешалки и осуществляют турбулентное движение воздуха в зоне лобовых частей. Для электродвигателей с высотой оси вращения 200–250 мм простое перемешивание воздуха оказывается недостаточно эффективным. Для увеличения скорости обдува лобовых частей обмоток и подшипниковых щитов в таких электродвигателях движение воздуха упорядочено направляющими щитками 6 и 11 (см. рисунок 1.3), укрепленными с внутренней стороны подшипниковых щитов 5, 12. В таких электродвигателях лопасти ротора ра-

ботают как вентилятор. Они засасывают охлажденный воздух из полости, образованной направляющим щитком, например, 11 и подшипниковым щитом 12 и выбрасывают его на лобовые части обмотки (движение воздуха на рисунке 1.3 указано стрелками).

Защищенные электродвигатели (степень защиты IP23, рисунок 1.4) применяются при больших мощностях и высотах оси вращения 160 мм и более. Они не имеют наружного вентилятора. Подшипниковые щиты 1 и 7 таких электродвигателей имеют отверстия, через которые воздух свободно проникает к обмотке. Движению воздуха способствуют лопасти ротора 3 и 5. Они захватывают воздух через отверстия подшипниковых щитов и направляют его на лобовые части обмотки и далее к боковым отверстиям 8.

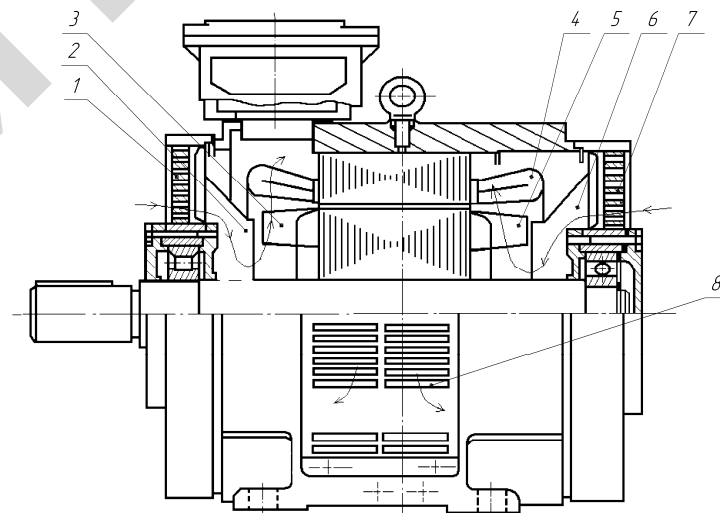


Рисунок 1.4 – Конструкция защищенного электродвигателя 4АН250 степени защиты P23:

1, 7 – подшипниковый щит; 2, 6 – направляющий щиток; 3, 5 – лопасти беличьей клетки ротора; 4 – лобовая часть обмотки статора; 8 – отверстие для выхода нагретого воздуха

В сельском хозяйстве встречаются электродвигатели серии 4А и АИР следующих *модификаций*:

- 1) с повышенным пусковым моментом;
- 2) с повышенным скольжением;
- 3) многоскоростные.

Редко используются электродвигатели с фазным ротором и со встроенным электромагнитным тормозом.

В комбикормовых цехах применяют *пылезащищенные электродвигатели (модификации УПУЗ)* основного исполнения или с повышенным пусковым моментом. Пылезащищенные электродвигатели (степень защиты IP54) отличаются от электродвигателей степени защиты IP44 тем, что имеют усиленное уплотнение по линии вала, щитов и вводного устройства.

В помещениях с повышенной влажностью, в наружных установках и под навесом применяются электродвигатели серий 4А и АИР климатического исполнения ХЛ (*для холодного климата*) или *влагоморозостойкие* климатического исполнения У и категории размещения 2, например, 4А80S4У2. Они отличаются от электродвигателей основного исполнения влагоморозостойкой изоляцией и защитными покрытиями.

Для технологических процессов, связанных с обработкой удобрений и химикатов, наиболее подходят *электродвигатели химостойкого исполнения*. В них применяются химостойкие изоляционные материалы, все детали и узлы электродвигателя имеют антикоррозионные покрытия, в обозначении таких электродвигателей после указания числа пар полюсов имеется буква «Х», например, 4А90S4ХУЗ.

В приводах с переменной нагрузкой, частыми пусками, при высоких температурах окружающего воздуха в местах их установки используются электродвигатели со встроенными в обмотку позисторами. С помощью позисторов и отдельного усилительного блока осуществляется температурная защита электродвигателя. Электродвигатели с позисторами в обмотке имеют в обозначении букву «Б» после числа полюсов, например, 4А100S4БСУ1.

Наиболее полно условиям окружающей среды сельскохозяйственных помещений соответствуют *электродвигатели сельскохозяйственного исполнения*. Они отличаются от базового исполнения тем, что выполняются со степенью защиты IP54. Кроме этого, они отличаются наличием защитных и антикоррозионных покрытий. Например, электродвигатели сельскохозяйственного исполнения серии 4А имеют кадмиевые гальванические антикоррозионные по-

крытия крепежных деталей, стойкие к действию дезинфицирующих растворов. Для покрытия наружной и внутренней поверхностей станины, подшипниковых щитов, наружной поверхности ротора используется химостойкая эмаль ЭП40. Лобовые части обмотки статора покрыты эмалью КО-935 или ЭП-91, что повышает срок ее службы. Наружная поверхность ротора и свободная поверхность вала покрыты эмалью КО-935. Такое покрытие защищает ротор от коррозионного воздействия содержащихся в воздухе животноводческих помещений агрессивных примесей, в особенности аммиака. Габаритные, обмоточные и энергетические характеристики электродвигателей сельскохозяйственного исполнения соответствуют основному их исполнению. В обозначении они имеют, после указания полюсов, букву «С» (сельскохозяйственные) или «СХ» (сельскохозяйственные химостойкие), например, 4А100L4СУ1 или 4А90M4СХУ2. Электродвигатели сельскохозяйственного исполнения могут иметь позисторы в обмотке статора для реализации температурной защиты.

В птицеводческих хозяйствах широко используются трехфазные асинхронные электродвигатели, предназначенные для приводов осевых вентиляторов, размещенных в птичниках. Это электродвигатели 4АПА80-06У2 мощностью 0,37 кВт и 4АПА80А6У2 мощностью 0,55 кВт (буква П в обозначении обозначает – для птичников) [3]. Они имеют степень защиты IP55, обдуваются воздухом основного вентилятора (собственный вентилятор отсутствует), коробка с выводами находится на заднем подшипниковом щите. Для вентиляторов птичников используются также электродвигатели серии АИР: АИРП80-06У2 мощностью 0,25 кВт и АИРП90-06У2 мощностью 0,37 кВт.

В сельскохозяйственном производстве широко используются асинхронные электродвигатели в погружных насосах. Они имеют существенное отличие от асинхронных электродвигателей общего применения (рисунок 1.5).

Во-первых, у погружных электродвигателей ограниченные размеры наружного диаметра корпуса (для размещения в скважине) и значительная длина. Отношение длины к диаметру у погружных электродвигателей составляет 5–6, иногда – до 12 [8].

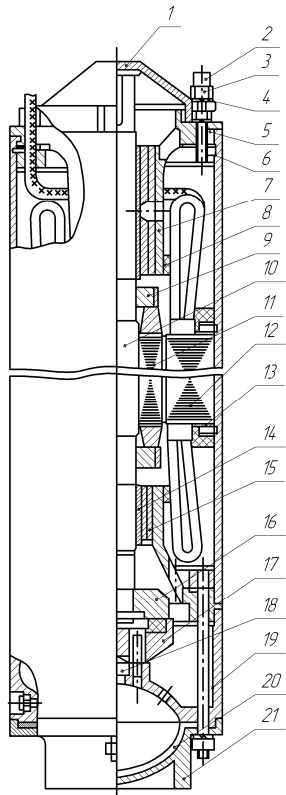


Рисунок 1.5 – Конструкция погружного водозаполненного электродвигателя типа ПЭДВ-219:
 1 – крышка транспортировочная, закрывающая вал; 2 – шпилька; 3 – гайка; 4 – шайба пружинная; 5 – кольцо уплотнительное; 6 – кольцо упорное; 7 – подшипник скольжения радиальный; 8 – кольцо ограничительное; 9 – кольцо балансировочное; 10 – вал; 11 – ротор; 12 – статор; 13 – кольцо стопорное; 14 – втулка подшипниковая; 15 – направляющий подшипник скольжения; 16 – пята; 17 – подпятник; 18 – упор сферический; 19 – корпус подпятника; 20 – диафрагма; 21 – днище

В связи с большой длиной и малым диаметром ротор электродвигателя имеет большой прогиб. Следовательно, электродвигатели имеют большой зазор между пакетом статора и ротора, чтобы исключить задевание ротора за статор, и более низкий коэффициент мощности, чем двигатели общего назначения.

Во-вторых, внутренняя полость погружного электродвигателя заполняется водой, а обмотка статора выполняется проводом с водостойкой изоляцией. Наиболее подходящим материалом для изоляции проводов статорной обмотки водозаполненных электродвигателей является полиэтилен и полихлорвинил. Допустимая температура нагрева полиэтиленовой изоляции составляет $80\text{ }^{\circ}\text{C}$, а поливинилхлоридной – $60\text{ }^{\circ}\text{C}$. Из-за недостаточной механической прочности и текучести обмоточные провода из этих материалов имеют большую радиальную толщину изоляции – $0,45\text{--}0,95\text{ мм}$ при напряжении до 660 В . По причине толстой изоляции коэффициент заполнения паза погружных водозаполненных электродвигателей в 2–3 раза меньший, чем электродвигателей общего назначения.

Использование активных материалов в этих электродвигателях ниже, чем в асинхронных электродвигателях общего назначения.

В-третьих, в таких электродвигателях используются два радиальных 7 и 15 (рисунок 1.5) и один упорный подшипник скольжения, состоящий из пяты 16 и подпятника 17. Упорный подшипник воспринимает вес ротора и насоса, а также неуравновешенное гидравлическое усилие, развиваемое насосом в процессе работы. Ротор электродвигателя вращается в воде. Для уменьшения трения ротора о воду применяют закрытые пазы на роторе. На статоре закрытые пазы используют при мощности электродвигателя 16 кВт и выше.

В целом погружные электродвигатели имеют повышенные механические потери, обусловленные трением в подшипниках скольжения и ротора о воду. Повышенные механические потери снижают КПД погружного электродвигателя.

Погружные электродвигатели имеют специальные уплотняющие устройства (резиновые манжеты, торцевые уплотнители), которые предотвращают попадание внутрь песка и загрязненной воды. Для выравнивания давлений между внешней средой и водой внутри электродвигателя имеется расширительная диафрагма 20 (рисунок 1.5), или специальные фильтры (сетчатые, керамические), соединяющие внутреннюю полость с окружающей средой.

Большое значение для погружных электродвигателей имеет балансировка ротора. Плохо сбалансированный ротор снижает срок службы не только электродвигателя, но и скважины.

У погружных электродвигателей небольшой срок службы (в среднем 2,4 года) и высокая аварийность. Замена электродвигателя погружного насоса вызывает большие затраты, поэтому их защите должно быть уделено особое внимание.

1.2. Особенности эксплуатации электродвигателей в сельскохозяйственном производстве

Условия эксплуатации электродвигателей в сельском хозяйстве отличаются от условий их эксплуатации в промышленности и других областях. Можно выделить четыре фактора, влияющие на электродвигатель:

- 1) окружающая среда;
- 2) качество подводимой электроэнергии (электроснабжение);
- 3) рабочая машина и режимы ее работы;
- 4) организация эксплуатации.

Окружающая среда. Ее влияние на электродвигатели обусловлено следующими особенностями:

1) наличием в воздухе птицеводческих и животноводческих помещений агрессивных примесей, аммиака и сероводорода (до $0,03 \text{ г/м}^3$), углекислого газа $0,1\text{--}0,2 \%$ [9]. Их отрицательное влияние проявляется в коррозии электродвигателей и снижении сопротивления изоляции обмоток. На рисунке 1.6 показано влияние аммиака на сопротивление изоляции обмоток [2].

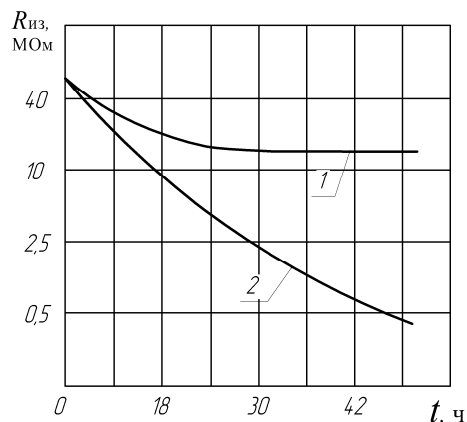


Рисунок 1.6 – Изменение сопротивления изоляции обмоток электродвигателя во влажной среде без аммиака (1) и с аммиаком (2)

Из рисунка 1.6 видно, что через 44 часа сопротивление изоляции упало ниже нормы ($0,5 \text{ МОм}$) в среде с аммиаком и 100% влажностью воздуха и осталось в допустимых пределах ($>10 \text{ МОм}$) в среде без аммиака при 100% влажности воздуха [2];

2) повышенной влажностью воздуха (до 100%) во многих помещениях, попаданием на электродвигатель дезинфицирующих растворов, навозной жижи, воды. Это приводит к коррозии металлических частей, снижению сопротивления изоляции электродвигателей и пробую изоляции;

3) повышенной запыленностью воздуха (до 240 мг/м^3 [9]), приводящей к ухудшению теплоотдачи электродвигателей и их перегреву. Около 3% электродвигателей работают в такой среде (теплицы, кормоцеха, зернотока и т. п.). Пыль поглощает из атмосферы влагу и агрессивные газы, что приводит к снижению сопротивления изоляции. Осажденная пыль ухудшает теплоотдачу двигателя.

Пыль от комбикорма осажается на влажные поверхности, уплотняется, затвердевает и ухудшает работу электродвигателей. Такая пыль на крыльчатке вентилятора вызывает вибрацию и даже заклинивание ротора электродвигателя [2];

4) резкими перепадами температуры (в наружных установках) в течение суток, приводящими к конденсации влаги на обмотках, их гидролитическому старению, коррозии и пробую изоляции обмоток;

5) повышенными температурами в некоторых помещениях, например, в помещениях топок зерносушилок и т. п.;

6) благоприятными условиями для жизнедеятельности многих микроорганизмов, насекомых и грызунов, отрицательно влияющими на состояние электропроводки и электрооборудования.

Качество подводимой электроэнергии (электроснабжение).

На работу электродвигателей влияют определенные факторы, к которым относятся:

1) сверхнормативные отклонения напряжения на зажимах электродвигателей. Например, на рисунке 1.7 показан график изменения напряжения на шинах подстанции мощностью 160 кВА . Величина напряжения меняется как в течение суток, так и по временам года.

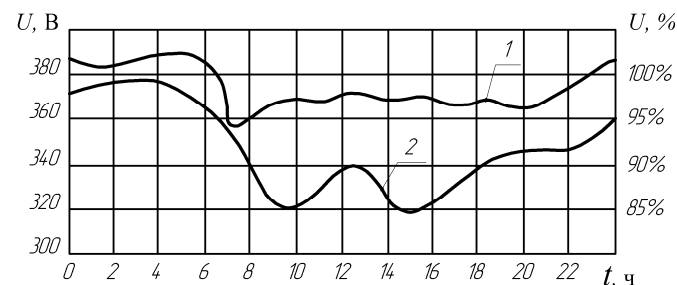


Рисунок 1.7 – Изменение напряжения на шинах сельской подстанции мощностью 100 кВА летом в течение суток (1) и зимой (2), среднее за 5 суток

Из рисунка 1.7 видно, что отклонение напряжения зимой превышает норму минус 5% и доходит до значения минус 15% .

Если при пониженном напряжении нагрузка электродвигателя такая, что ток увеличивается выше номинального значения, то наблюдается перегрев обмотки и снижение срока службы изоляции;

2) маломощные трансформаторные подстанции, затрудняющие пуск электродвигателей соизмеримой мощности;

3) длинные воздушные линии (0,4 кВ) электрической сети, приводящие к пониженному напряжению на зажимах электродвигателей;

4) асимметрия напряжений, превышающая норму (4 %).

В сельских электрических сетях средний коэффициент небаланса междуфазных напряжений может составлять 8,1 % (максимум – 12,5 %) [10].

Асимметрия напряжений приводит к увеличению скольжения электродвигателя, повышенным потерям мощности и, следовательно, к перегреву обмотки;

5) низкая надежность электроснабжения сельскохозяйственных потребителей. Особенно часто возникают неполнофазные режимы в электрической сети в связи с обрывами проводов, перегораниями плавкой вставки предохранителя в распределительном пункте.

Рабочая машина и режимы ее работы. Влияния рабочих машин на электродвигатель состоит в следующем:

1) высокий уровень вибрации рабочих машин. Это приводит к вибрации корпусов электродвигателей. В таблице 1.4 приведены показатели вибрации корпусов электродвигателей, применяемых на различных технологических процессах [7]. Под действием вибрации появляются трещины в изоляции, ослабевают крепления.

Основной причиной повышенной вибрации является неправильный монтаж оборудования, отсутствие динамической балансировки вращающихся рабочих органов машин;

Таблица 1.4 – Показатели вибрации корпусов электродвигателей, применяемых на различных технологических процессах

Технологический процесс	Среднее вибрационное смещение, мкм	Частота вибрации, Гц	Наличие ударов
Раздача корма	202	35	Нет
Уборка навоза	170	50	Есть
Приготовление корма	255	50	Нет
Доеение	75	50	Нет
Вентиляция	320	25	Нет

2) недостаточная надежность технологического оборудования, приводящая к их поломкам и заклиниваниям;

3) низкий коэффициент использования электродвигателей в течение года. Из-за малого времени работы некоторые электродвигатели не успевают подсушить свою изоляцию, увлажняются и выходят из строя. Время работы электродвигателей некоторых машин приведено в таблице 1.5 [1].

Таблица 1.5 – Время работы электродвигателей некоторых машин, применяемых на различных технологических процессах

Технологический процесс	Мощность электродвигателя, кВт	Время работы, ч	
		в течение суток	за год
Мойка корнеплодов	3	0,6	135
Измельчение соломы	24	0,65	140
Измельчение кормов	10	1,0	365
Уборка навоза (1 транспортер)	4	1,0	365
Дойка (вакуумный насос)	4	9,4	3440

4) неправильный подбор электродвигателей по мощности приводит к их перегрузкам или недогрузкам;

5) непостоянство свойств сырья, перерабатываемого машинами, или неравномерность подачи сырья в машины приводят к перегрузкам электродвигателей.

Организация эксплуатации электродвигателей. Эксплуатация электродвигателей в сельском хозяйстве имеет следующие особенности:

1) территориальная разбросанность электродвигателей усложняет их обслуживание;

2) нехватка электромонтеров не позволяет качественно обслуживать электродвигатели;

3) недостаточная материально-техническая база (отсутствие пунктов технического обслуживания);

4) недостаточный ассортимент запасных частей и материалов для обслуживания электродвигателей;

5) недостаточное обеспечение техническими нормативными правовыми актами и литературой по эксплуатации электродвигателей.

1.3. Механические, электромеханические, рабочие и энергетические характеристики асинхронного трехфазного электродвигателя

Механическая характеристика трехфазного электродвигателя описывается уравнением Клосса:

$$M = \frac{2M_k(1+\varepsilon)}{\frac{s}{s_k} + \frac{s_k}{s} + 2\varepsilon}, \quad (1.1)$$

где M , M_k – текущий и критический моменты, Н·м;

s , s_k – текущее и критическое скольжение, о.е.;

ε – коэффициент, зависящий от параметров электродвигателя, о.е.

Скольжение определяется по формуле

$$s = (\omega_0 - \omega) / \omega_0, \quad (1.2)$$

где ω_0 , ω – соответственно угловые скорости вращения электромагнитного поля статора и ротора, рад/с.

$$\omega_0 = \frac{\pi n_0}{30}; \quad \omega = \frac{\pi n}{30}, \quad (1.3)$$

где n_0 , n – частота вращения поля статора и ротора, мин⁻¹.

Коэффициент ε определяется по формуле

$$\varepsilon = s_k r_1' / r_2', \quad (1.4)$$

где r_1 , r_2' – активное сопротивление обмотки статора и приведенное активное сопротивление обмотки ротора, Ом.

Критический момент электродвигателя определяется по формуле

$$M_k = \mu_k M_n, \quad (1.5)$$

где μ_k – кратность максимального момента электродвигателя, о.е.;

M_n – номинальный момент, Н·м.

$$M_n = P_n / \omega_n, \quad (1.6)$$

где P_n – номинальная мощность электродвигателя, Вт;

ω_n – номинальная угловая скорость ротора электродвигателя, рад/с.

Критическое скольжение определяется по формуле:

$$s_k = \frac{s_n (\mu_k + \sqrt{\mu_k^2 + 2s_n (\mu_k - 1)})}{1 - 2s_n (\mu_k - 1)}. \quad (1.7)$$

Механическая характеристика трехфазного асинхронного электродвигателя имеет сложный вид (рисунок 1.8).

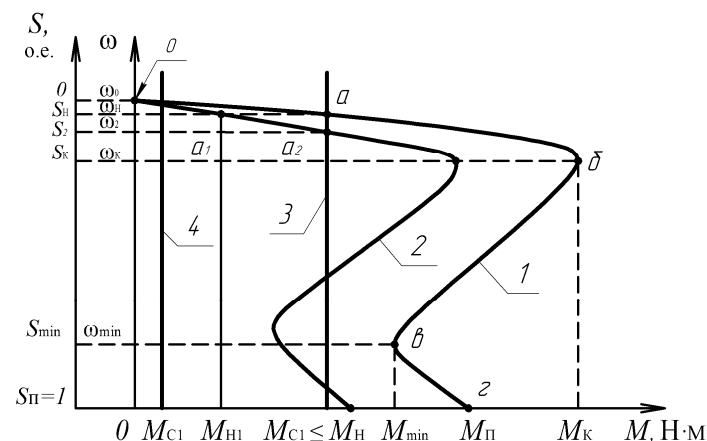


Рисунок 1.8 – Механические характеристики трехфазного асинхронного электродвигателя и ленточного транспортера:

1 – механическая характеристика электродвигателя при номинальном напряжении; 2 – механическая характеристика электродвигателя при пониженном напряжении; 3 – механическая характеристика ленточного транспортера при полной нагрузке; 4 – механическая характеристика ленточного транспортера при холостом ходе

На механической характеристике выделяют характерные точки:

0 – соответствует моменту, равному нулю, при котором скольжение $s = 0$, а угловая скорость ротора равна синхронной скорости электромагнитного поля $\omega = \omega_0$;

a – номинального момента M_n . В этой точке номинальное скольжение $s = s_n$ и номинальная угловая скорость ротора $\omega = \omega_n$. Момент сопротивления рабочей машины M_c может быть равен номинальному моменту $M_c = M_n$;

b – критического момента M_k . Электродвигатель не может развить момент выше критического. Эта точка соответствует критическому скольжению $s = s_k$ и критической скорости $\omega = \omega_k$;

v – минимального момента при пуске M_{min} . Обычно в этой точке скольжение $s = 0,85$ и угловая скорость $\omega = 0,15\omega_0$;

z – пускового момента M_n при скольжении $s = 1$ и угловой скорости $\omega = 0$.

Момент, развиваемый трехфазным асинхронным электродвигателем, определяется по следующей формуле:

$$M = \frac{m_1 p U_1^2 r_2'}{2\pi f s \left[\left(r_1 + \frac{r_2'}{s} \right)^2 + (x + x_2')^2 \right]}, \quad (1.8)$$

где m_1 – число фаз, $m_1 = 3$;

p – число пар полюсов;

U_1 – фазное напряжение обмотки статора, В;

r_1, r_2' – активное сопротивление обмотки статора и приведенное активное сопротивление ротора соответственно, Ом;

x_1, x_2' – индуктивное сопротивление обмоток статора и приведенное индуктивное сопротивление ротора соответственно, Ом;

f – частота тока питающей сети, Гц;

s – скольжение ротора, о.е.

Из выражения (1.8) следует, что момент электродвигателя пропорционален квадрату подводимого напряжения. Следовательно,

$M' = M_n (U' / U_n)^2$, где M' – момент при напряжении U' ; M_n – момент при номинальном напряжении U_n .

На рисунке 1.8 показано, что при номинальном напряжении и номинальной нагрузке $M_{c2} = M_n$, электродвигатель работает в точке a . При снижении напряжения момент, развиваемый электродвигателем при той же скорости, снижается до точки $a_1 (M_{n1})$, но момент рабочей машины M_{c2} не изменяется. Следовательно, новой точкой устойчивой работы привода будет точка a_2 . Скорость электродвигателя снизится до ω_2 , а скольжение ротора возрастет до s_2 . Возрастание скольжения ротора приводит к увеличению потерь, поскольку они в роторе электродвигателя пропорциональны скольжению:

$$\Delta P_{m2} = M \omega_0 s, \quad (1.9)$$

где M – электромагнитный момент электродвигателя, примерно равный моменту на валу, Н·м.

Электромеханическая характеристика асинхронной электрической машины $\omega = f(I_1)$ приведена на рисунке 1.9.

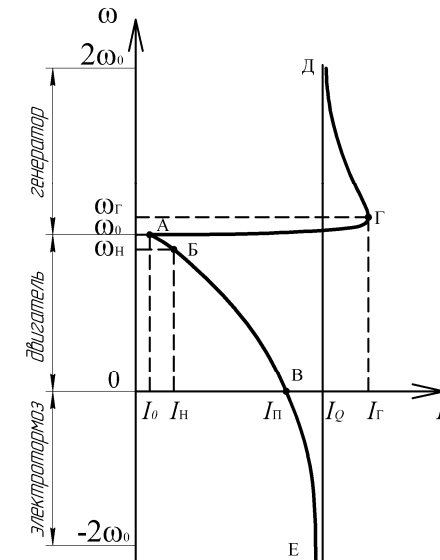


Рисунок 1.9 – Электромеханическая характеристика трехфазной асинхронной электрической машины

На этой характеристике различают три участка:

1) от точки *E* до точки *B* – участок действия электромагнитного тормоза. На этом участке ток электродвигателя больше пускового, а скорость вращения ротора противоположна направлению вращения электромагнитного поля статора;

2) от точки *B* до точки *A* – участок действия электродвигателя; на этом участке ток изменяется от пускового ($I_{\text{п}}$) до тока холостого хода (I_0);

3) от точки *A* до точки *D* – участок действия генератора; на этом участке скорость ротора больше ω_0 ; ток имеет максимальное значение в некоторой точке *G*; электрическая машина отдает энергию в сеть.

Пусковой ток электродвигателей малых мощностей больше номинального в 3–3,5 раза, а для больших мощностей – в 6–7,5 раза [5]. Тихоходные электродвигатели имеют кратность пускового тока меньше, чем быстроходные.

На рисунке 1.10 изображены *рабочие характеристики трехфазного асинхронного электродвигателя* при номинальных значениях напряжения и частоты тока.

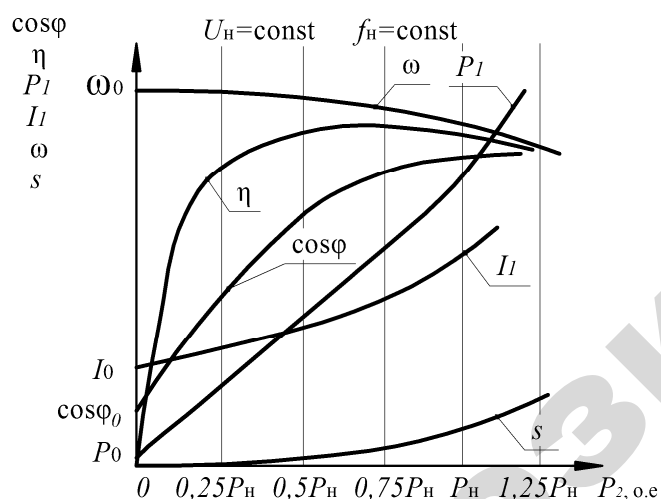


Рисунок 1.10 – Рабочие характеристики трехфазного асинхронного электродвигателя

Скоростная характеристика $\omega = \gamma(P_2)$ (или $s = f(P_2)$) характеризует изменение угловой скорости ротора (или скольжения ротора) от нагрузки на валу. По мере увеличения нагрузки угловая ско-

рость ротора уменьшается, а скольжение ротора растет, причем вначале, при малой нагрузке, эти изменения подчиняются линейному закону, а при большой нагрузке они изменяются криволинейно.

Следовательно, при перегрузке происходит увеличение скольжения и потерь в двигателе, уменьшение частоты вращения и быстрый рост температуры.

Зависимость потребляемого из сети тока от мощности на валу

$I_1 = f(P_2)$ представляет собой возрастающую кривую, имеющую начальное значение I_0 при мощности на валу $P_2 = 0$ (холостой ход). Для асинхронных электродвигателей характерны следующие зависимости [11]:

для малой мощности 0,1–0,5 кВт $I_0 = (0,55–0,95) I_{\text{н}}$;

для мощности 0,51–1 кВт $I_0 = (0,4–0,65) I_{\text{н}}$;

для средней мощности 1,1–5 кВт $I_0 = (0,35–0,6) I_{\text{н}}$;

для мощности 5,1–10 кВт $I_0 = (0,25–0,55) I_{\text{н}}$;

для мощности 10,1–25 кВт $I_0 = (0,2–0,5) I_{\text{н}}$;

для большой мощности 25–50 кВт $I_0 = (0,18–0,45) I_{\text{н}}$.

В приведенных выше данных меньшие значения тока холостого хода относятся к двухполюсным электродвигателям, а большие значения – к тихоходным восьмиполюсным электродвигателям.

Следовательно, при контроле нагрузки на валу по показателям потребляемого тока не всегда будет наблюдаться широкий диапазон их изменения. Незначительный диапазон изменения токов наблюдается для маломощных и тихоходных электродвигателей. Этот вывод относится и к случаю технологической перегрузки электродвигателя.

Зависимость потребляемой активной мощности $P_1 = f(P_2)$ характеризуется почти прямолинейным изменением потребляемой мощности P_1 от мощности на валу P_2

Мощность холостого хода асинхронных электродвигателей составляет $P_0 \approx (0,05–0,2) P_{\text{н}}$. Меньшие значения коэффициента (0,05) соответствуют электродвигателям большой мощности, а значение 0,2 – электродвигателям малой мощности.

Необходимо обратить внимание, что мощность P_1 изменяется в больших пределах, чем ток I_1 . Следовательно, отслеживать изменения нагрузки на валу по мощности можно с большей чувствительностью, чем по току.

Зависимость $\eta = f(P_2)$ претерпевает быстрое возрастание от нуля до некоторого максимального значения (обычно при $P_2 \approx (0,7-0,8) P_n$), а затем незначительно уменьшается (на 0,5–1,5 %) при перегрузке.

Зависимость $\cos\phi = f(P_2)$ представляет собой некоторую плавно возрастающую (от значения холостого хода $\cos\phi \leq 0,2$) выпуклую вверх кривую, достигающую максимума при номинальной мощности, или без максимума, но с незначительным увеличением $\cos\phi$ (на 1–2,5 %), или без изменения значения $\cos\phi$ при перегрузке [5]. Например, электродвигатель 4А112М4У3 при $P_n = 5,5$ кВт имеет $\cos\phi = 0,85$, а при $1,25P_n$ (т. е. перегрузке) имеет то же значение $\cos\phi = 0,85$. Другой электродвигатель 4А80А4У3 имеет $\cos\phi = 0,81$ при $P_n = 1,1$ кВт, и $\cos\phi = 0,85$ при перегрузке $P_2 = 1,25P_n$. Для электродвигателей больших мощностей $\cos\phi$ при перегрузке может уменьшаться. Следовательно, изменение $\cos\phi$ при перегрузке неоднозначное.

Энергетическая диаграмма асинхронного электродвигателя показывает все возможные в нем потери (рисунок 1.11).

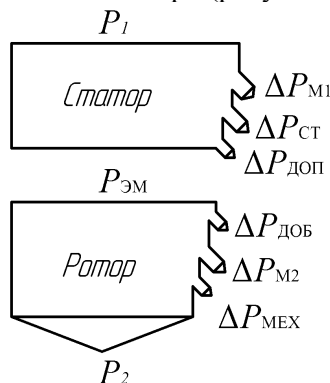


Рисунок 1.11 – Энергетическая диаграмма асинхронного электродвигателя:

P_1 – активная мощность, потребляемая из сети; P_2 – мощность на валу;

$P_{эм}$ – электромагнитная мощность, передаваемая из статора в ротор;

ΔP_{M1} , ΔP_{M2} – потери в меди статора и ротора; $\Delta P_{доб}$ – добавочные потери;

$\Delta P_{мех}$ – механические потери; $\Delta P_{ст}$ – потери в стали

Суммарные потери определяются по следующей формуле:

$$\sum \Delta P = \Delta P_{M1} + \Delta P_{M2} + \Delta P_{ст} + \Delta P_{мех} + \Delta P_{доб}, \quad (1.10)$$

где ΔP_{M1} , ΔP_{M2} – потери в меди статора и ротора, Вт;

$\Delta P_{ст}$ – потери в стали статора, Вт;

$\Delta P_{мех}$ – механические потери, Вт;

$\Delta P_{доб}$ – добавочные потери, Вт.

Обычно $\Delta P_{доб} \approx 0,5 \% P_1$, где P_1 – потребляемая из сети мощность, Вт.

Потери в меди пропорциональны квадрату тока, следовательно, они являются переменной величиной ($\Delta P_{пер}$). Потери в стали и механические потери не существенно зависят от нагрузки (на 4–8 % уменьшаются при перегрузке из-за уменьшения электромагнитного потока и частоты вращения), следовательно, являются постоянной величиной $\Delta P_{пост}$.

Отношение постоянных потерь к переменным потерям есть некоторый коэффициент потерь $\alpha = \Delta P_{пост} / \Delta P_{пер}$, который для асинхронных электро-двигателей основного исполнения при нагрузке, близкой к номинальной, составляет 0,5–0,7. При малых нагрузках этот коэффициент увеличивается, а при перегрузках быстро уменьшается.

Переменные потери в статоре пропорциональны квадрату тока электродвигателя:

$$\Delta P_{M1} = 3I_1^2 r_1, \quad (1.11)$$

где r_1 – активное сопротивление обмотки одной фазы, Ом.

Переменные потери в роторе:

$$\Delta P_{M2} = M\omega_0 s. \quad (1.12)$$

Потери в электродвигателе определяются через КПД:

$$\Delta P = P \frac{(1-\eta)}{\eta}, \quad (1.13)$$

где P – мощность на валу, Вт;

η – КПД электродвигателя при данной мощности P , о. е.

Значения $\eta = f(P_2)$ и $\cos\varphi = f(P_2)$ приводятся в справочниках, например, в [11].

КПД при любой нагрузке может быть определен по формуле:

$$\eta = \frac{1}{1 + \left(\frac{1-\eta_n}{\eta_n}\right) \frac{\frac{\alpha}{\alpha+1} + x}{\alpha+1}}, \quad (1.14)$$

где η_n – КПД при номинальной нагрузке, о. е.;

x – коэффициент нагрузки при мощности на валу P_x ; $x = P_x/P_n$;

α – коэффициент потерь, о. е.

Следовательно, КПД характеризует потери в электродвигателе; этот параметр может использоваться для реализации защиты электродвигателя. Если потери энергии превышают номинальные, то они ведут к перегреву электродвигателя.

На рисунке 1.12 показано изменение потерь в электродвигателе в зависимости от мощности на валу.

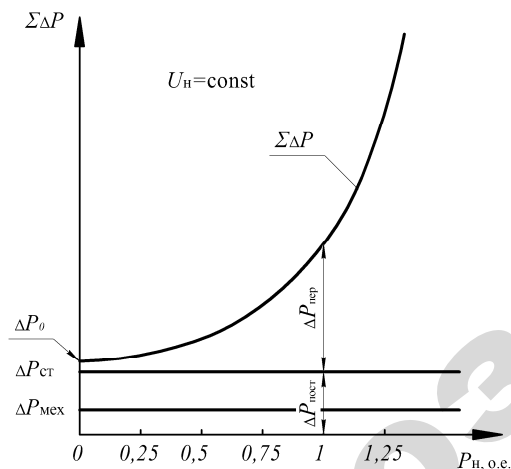


Рисунок 1.12. – Изменение потерь мощности в асинхронном электродвигателе в зависимости от нагрузки на валу

Из рисунка 1.12 следует, что при перегрузке происходит быстрое увеличение переменных потерь.

1.4. Отказы и аварийные состояния асинхронных трехфазных электродвигателей

Отказом электродвигателя называется нарушение его работоспособности.

Свойство электродвигателя сохранять работоспособность в течение некоторой наработки называется *безотказностью*.

Для электродвигателей наиболее подходящим показателем безотказности является *вероятность безотказной работы* – это вероятность того, что в пределах заданной наработки отказ электродвигателя не возникает.

Примерно 90–95 % отказов электродвигателей происходит из-за обмотки, а из-за механических повреждений – 5–10 % [12]. Основные виды отказов следующие:

- 1) обугливание обмотки – 58 % от всех повреждений;
- 2) междуфазные замыкания – 18 %;
- 3) пробой на кожух – 10 %;
- 4) витковые замыкания – 9 %;
- 5) механические повреждения (разрушение подшипников, трещины, погнутости и т. д.) – 4 %;
- 6) прочие – 1 % [7].

Отказы электродвигателей вследствие повреждения изоляции провоцируются перенапряжениями, снижением сопротивления изоляции при пуске и вибрацией обмотки. Вибрация способствует возникновению трещин в изоляции обмотки, а перенапряжения, обычно коммутационные, превышающие в 5–7 раз напряжение сети, выявляют слабые места в изоляции и пробивают ее.

Распределение причин отказов электродвигателей в процентном отношении по всем отказам исследовались многими учеными. По данным ученых Латвийской сельскохозяйственной академии, приведенным в [1], на первом месте среди причин отказов электродвигателей находится неполнофазный режим (40–50 %), далее следуют заторможенный ротор (20–25 %), технологические перегрузки (8–10 %), понижение сопротивления изоляции (10–15 %), нарушение охлаждения (8–10 %).

На рисунке 1.13 показана связь отказов с воздействиями, приводящими к отказам.

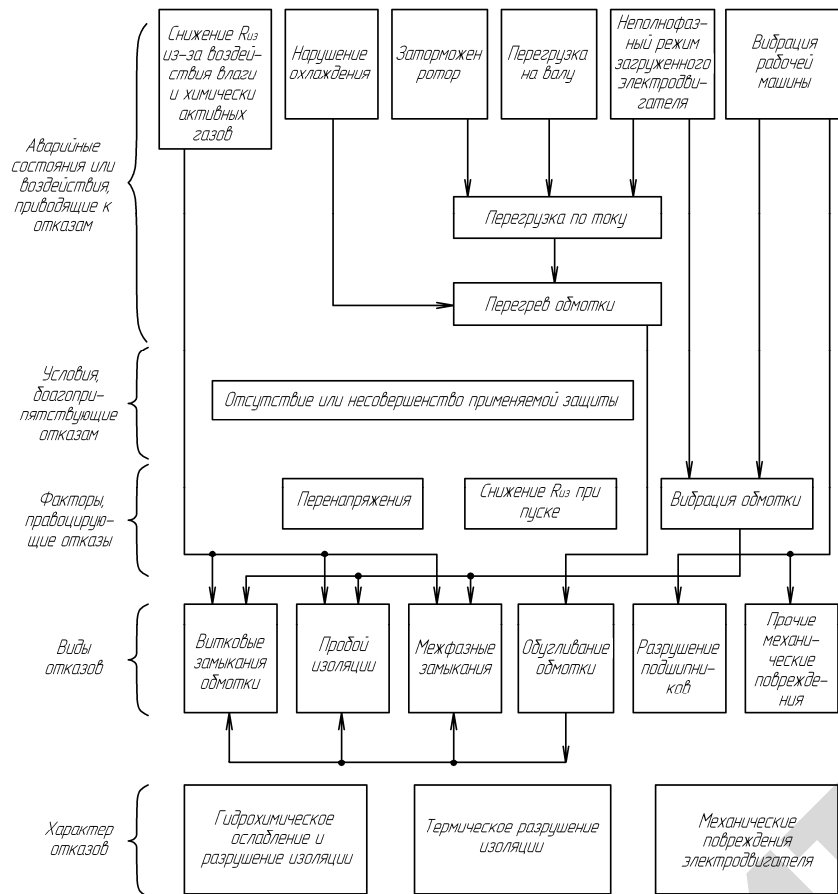


Рисунок 1.13 – Связь отказов с аварийными состояниями или воздействиями, приводящими к отказам

На рисунке 1.13 показаны не все аварийные состояния, а только основные. В частности не указаны: 1) отклонения напряжений; 2) асимметрия напряжений; 3) отклонения частоты тока; 4) частые пуски. Эти воздействия опасны только при предельных отклонениях и встречаются реже основных.

По данным ученых Всероссийского научно-исследовательского института электрификации сельского хозяйства (ВИЭСХ), приведенным в [3], на первом месте среди причин отказов электродви-

гателей находится заклинивание ротора (29,7 %), далее следуют несоответствия условиям окружающей среды (22,8 %), неполнофазный режим (15,9 %), перегрузка (9,9 %), разрушение подшипников (7,9 %) и т. д. Примерно такие же данные приведены в [13]. На животноводческих комплексах на первое место среди причин отказов электродвигателей выходят воздействия агрессивных сред (18,75 %) и низкая чувствительность защиты (18,75 %), далее следуют вибрация (15,63 %), износ подшипника (11,73 %), перегрузки (7,81 %), заклинивания рабочей машины (3,13 %), загрязнения, воздействия пыли и работа при повышенной температуре (6,25 %) и т. д. [14].

Выход из строя электродвигателей из-за неполнофазного режима является следствием низкой надежности электроснабжения и плохой организации технического обслуживания электродвигателей.

С ростом надежности электроснабжения и улучшением организации технического обслуживания основной причиной отказов электродвигателей стало увлажнение изоляции. Так, по данным украинских ученых, приведенным в [15], на первом месте по количеству отказов электродвигателей в сельскохозяйственном производстве находится увлажнение изоляции обмоток (31,7 %), далее следуют неполнофазный режим (17%), перегрузки (15,7 %), механические повреждения (15,1 %), прочие причины – 20,5 %.

Эту тенденцию подтверждают публикации в иностранных источниках. Например, в [16] указывается, что основными причинами аварийного состояния являются загрязнение электродвигателей (43 %), а в [17] – перегрузки (25 %).

Погружные асинхронные водозаполненные электродвигатели имеют следующее распределение отказов отдельных узлов к общему числу отказов, принятому за 100 %: упорный подшипник – 30 %; обмотка статора – 30 %; износные отказы других узлов – 20 %; прочие отказы – 20 % [8].

Основными причинами механических повреждений (в сумме они составляют 70 %) являются износ пар трения, биение ротора подшипников, а также пусковые ударные нагрузки, возникающие при включении электродвигателя погружного насоса и приводящие к усталостным разрушениям муфт, шпонок, болтов.

Первым видом повреждений в погружных электронасосах являются абразивный и гидроабразивный износы. Степень и характер

износа, а также время до отказа подшипников скольжения погружных водозаполненных электродвигателей зависит, в первую очередь, от наличия механических примесей (песка и ржавчины) в воде, заполняющей внутреннюю полость электродвигателя.

Вторым видом повреждения погружного электродвигателя являются коррозионные разрушения пакета ротора и статора, крепежа, муфты и т. п. Коррозия в зазоре «ротор–статор» приводит к увеличению зазора в 1,2–1,5 раза. При этом коэффициент мощности и механические потери уменьшаются, а значение тока может существенно измениться.

Третьим видом повреждений является нарушение изоляции мест сращивания кабеля с обмоткой электродвигателя. Поэтому способам изолирования мест сращивания жил кабеля, качеству выполнения этих работ должно быть уделено большое внимание.

Четвертым видом повреждений является разъедание короткозамкнутых алюминиевых колец обмотки ротора. В воде с повышенным содержанием хлор-ионов и высокой щелочностью алюминиевые короткозамкнутые кольца подвергаются интенсивной химической коррозии. В результате выделяется водород, который собирается в полости верхнего подшипникового щита электродвигателя. Через 19 часов после начала химической коррозии давление в полости электродвигателя достигает $1,21 \cdot 10^5 \text{ Н/м}^2$ [18]. Происходит разрыв диафрагмы. Выделившийся водород вытесняет часть воды из электродвигателя, и в области верхнего подшипникового щита образуется газовая подушка. Условия теплообмена и смазки подшипников ухудшаются, происходит разрушение обрешиненной втулки и оплавление изоляции лобовых частей статорной обмотки электродвигателя. При ревизии электродвигателя на поверхности короткозамкнутых колец ротора обнаруживаются крупные очаги коррозии глубиной до 0,5 мм.

Статистические данные показывают, что отказы электродвигателей погружных насосов, обусловленные разрушением короткозамкнутых колец на 40 % и более, происходят в среднем за 3000–4000 ч работы.

Наработки на отказ других элементов скважинных электронасосов характеризуются следующими величинами: подшипниковые узлы – 8000 ч; элементы рабочей ступени насоса – 14 000 ч; статорная обмотка электродвигателя – 23 000 ч [8].

Как правило, следствием любого отказа насосной установки является выход из строя обмотки электродвигателя. По этой причине сложилось неоправданное мнение о том, что обмотка электродвигателя – его слабое место. При наличии системы управления и защиты, реагирующей на возможные аварийные состояния, выхода из строя обмотки электродвигателя погружного насоса не должно быть. Низкое качество системы управления и защиты является главной причиной столь частых выходов из строя обмоток статоров погружных электродвигателей. Этот вывод распространяется и на «сухие» электродвигатели. Применение устройств защиты позволяет снизить аварийность электродвигателей в 2–3 раза.

1.5. Асинхронный трехфазный электродвигатель как объект защиты

Трехфазный асинхронный электродвигатель как объект защиты может быть представлен структурной схемой, содержащей входные и выходные параметры, а так же параметры возмущения.

Любое изменение входных параметров или возмущений приводит к соответствующему изменению выходных параметров. Следовательно, параметры, связанные с электродвигателем, могут служить параметрами контроля для устройств защиты электродвигателя.

При каждом виде аварийного состояния электродвигателя изменяются определенные параметры. Например, *при технологической перегрузке* (возрастание возмущения M_c выше номинального значения $M_{c, \text{ном}}$) увеличивается ток I_1 и мощность, потребляемая из сети P_1 , уменьшаются КПД и скорость ротора ω , увеличиваются температура обмотки, потери и магнитный поток рассеяния обмотки. Коэффициент мощности электродвигателя при перегрузке или увеличивается, или не меняется, или даже уменьшается [5]. Другие параметры не изменяются (рисунок 1.14).

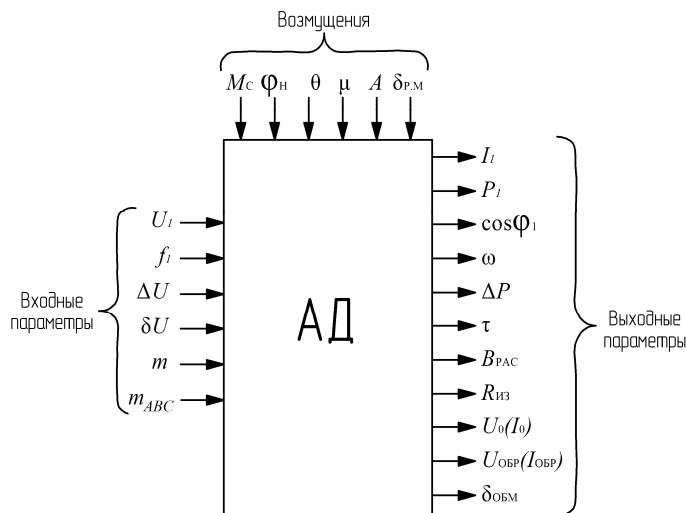


Рисунок 1.14 – Структурная схема асинхронного трехфазного электродвигателя как объекта защиты:

U_1 – напряжение; f_1 – частота тока; ΔU – отклонение напряжения от номинального; δU – асимметрия напряжений; m – число фаз; m_{ABC} – чередование фаз; M_c – момент сопротивления на валу электродвигателя; φ_n , θ , μ – относительная влажность, температура и молекулярный состав охлаждаемого воздуха; A – теплоотдача электродвигателя; $\delta_{p.m}$ – вибрация рабочей машины; I_1 , P_1 – потребляемый из сети ток и потребляемая из сети мощность; $\cos \varphi$ – коэффициент мощности; ω – угловая скорость на валу электродвигателя; ΔP – потери мощности в электродвигателе; τ – температура превышения обмотки или других частей двигателя; $B_{рас}$ – индукция электромагнитных полей рассеивания; $R_{из}$ – сопротивление изоляции обмотки; $U_0(I_0)$ – напряжение (ток) нулевой последовательности; $U_{обр}(I_{обр})$ – напряжение (ток) обратной последовательности; $\delta_{обм}$ – вибрация обмотки

В случае неполнофазного режима работы изменяется на входе число фаз m . Это влечет изменение по фазам напряжения и тока; уменьшаются КПД и угловая скорость вращения ротора, увеличиваются температура электродвигателя и потери в нем, усиливает-

ся вибрация обмотки, изменяется поле рассеяния обмотки статора $B_{рас}$, асимметрия напряжения приобретает предельное значение, возрастают напряжения и токи нулевой и обратной последовательностей.

В случае заторможенного ротора при включенном в сеть статоре (стопорный режим) угловая скорость вала двигателя $\omega = 0$, потребляемый ток и мощность имеют наибольшие значения; $\cos \varphi$ уменьшается до значения 0,45–0,55; КПД уменьшается до 0; потери в обмотках, температура электродвигателя и индукция электромагнитных полей рассеяния обмоток значительно увеличиваются.

Аналогичным образом можно проследить за изменением параметров электродвигателя при других аварийных состояниях. Значения количественных изменений этих параметров позволяют выбрать наиболее оптимальный параметр контроля для устройства защиты электродвигателя. Более глубокое изучение аварийных состояний электродвигателя позволяет выбрать наилучшие параметры защиты.

При рассмотрении характера изменения параметров электродвигателя во времени следует иметь в виду, что электродвигатель имеет 4 постоянные времени: $T_{эм} \leq T_m \leq T_n < T_0$,

где $T_{эм}$ – электромагнитная постоянная времени, характеризующая инерцию ненасыщенной магнитной цепи электродвигателя, с;

T_m – электромеханическая постоянная времени, характеризующая механическую инерцию вращающихся масс электродвигателя, с;

T_n – постоянная времени нагрева электродвигателя, характеризующая его тепловую инерцию при нагреве, мин;

T_0 – постоянная времени охлаждения электродвигателя, характеризующая его тепловую инерцию при охлаждении, мин.

1.6. Контрольные вопросы

1. Какую мощность имеет наибольшее число электродвигателей, применяемых в сельском хозяйстве?

2. Какие электродвигатели по частоте вращения наиболее часто используются в сельском хозяйстве?

3. Чем определяется разделение электродвигателей по мощности и частоте вращения?

4. Какое напряжение и какую схему соединения имеют электродвигатели серии 4А или АИР мощностью 0,06–0,37 кВт?

5. Какое напряжение и какую схему соединения имеют электродвигатели серии 4А или АИР мощностью 0,55–11 кВт?

6. Какое напряжение и какую схему соединения имеют электродвигатели серии 4А или АИР мощностью 15–110 кВт?

7. Объясните разницу в охлаждении закрытых обдуваемых и защищенных электродвигателей?

8. Какие модификации асинхронных электродвигателей встречаются в сельскохозяйственном производстве?

9. Какие подшипники имеют погружные асинхронные электродвигатели?

10. В чем проявляется влияние окружающей среды на электродвигатели, применяемые в сельском хозяйстве?

11. В чем проявляется влияние электроснабжения на электродвигатели, применяемые в сельском хозяйстве?

12. Какие отрицательные влияния оказывают рабочие машины на электродвигатель?

13. Как влияет напряжение на момент, развиваемый асинхронным электродвигателем?

14. Нарисуйте рабочие характеристики асинхронного электродвигателя.

15. Нарисуйте энергетическую диаграмму асинхронного электродвигателя.

16. Нарисуйте графики изменения потерь в меди, потерь в стали и механических потерь в электродвигателе от нагрузки на валу.

17. Что называется отказом электродвигателя?

18. Поясните понятие «безотказность».

19. Поясните понятие «вероятность безотказной работы».

20. Назовите факторы, провоцирующие отказы.

21. Назовите основные виды отказов электродвигателей.

22. Назовите аварийные состояния или воздействия, приводящие к отказам.

23. Поясните, какое влияние на электродвигатель оказывает вибрация рабочей машины?

24. Какие повреждения встречаются наиболее часто в погружных электродвигателях?

25. Назовите входные параметры асинхронного электродвигателя.

26. Назовите возмущения, действующие на электродвигатель.

27. Назовите выходные параметры электродвигателя.

28. Какими четырьмя постоянными времени характеризуется электродвигатель?

Глава 2. ЗАЩИТА АСИНХРОННЫХ ТРЕХФАЗНЫХ ЭЛЕКТРОДВИГАТЕЛЕЙ ОТ РАБОТЫ В НЕПОЛНОФАЗНОМ РЕЖИМЕ, ПРИ НЕДОПУСТИМОМ ОТКЛОНЕНИИ И АСИММЕТРИИ НАПРЯЖЕНИЙ

2.1. Изменение параметров трехфазного асинхронного электродвигателя при работе в неполнофазном режиме

Возможные случаи явного неполнофазного режима работы трехфазного асинхронного электродвигателя изображены на рисунке 2.1.

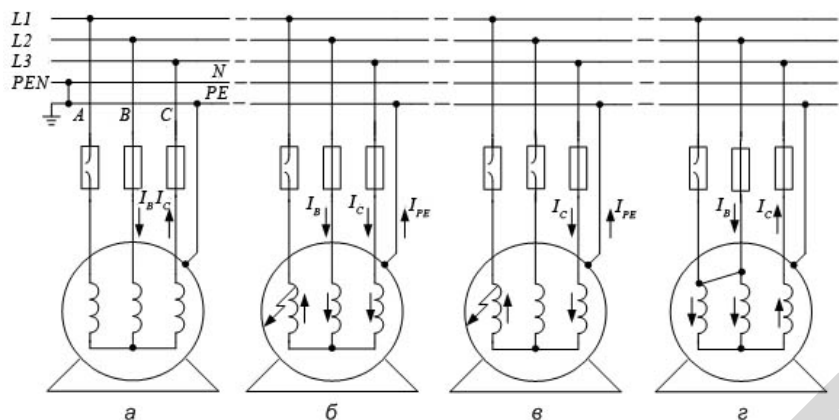


Рисунок 2.1 – Схемы питания трехфазного асинхронного электродвигателя, обеспечивающие явные неполнофазные режимы его работы:

- а* — обрыв цепи в плавком предохранителе; *б* — обрыв цепи в плавком предохранителе и однофазное короткое замыкание обмотки на корпус;
- в* — обрыв цепи в двух плавких предохранителях и однофазное короткое замыкание на корпус; *г* — обрыв цепи в одном плавком предохранителе и замыкание двух обмоток между собой

В случае, приведенном на рисунке 2.1, *а*, разрыв одного проводника возникает вследствие перегорания плавкой вставки предохранителя, потери контакта в электромагнитном пускателе, рубильнике и т. п.

В случае, приведенном на рисунке 2.1, *б*, плавкая вставка предохранителя перегорает вследствие однофазного короткого замыкания (КЗ) на корпус. Электрический контакт обмотки с корпусом сохраняется.

В случае, приведенном на рисунке 2.1, *в*, после однофазного КЗ на заземленный корпус перегорает одна плавкая вставка предохранителя и сохраняется электрический контакт обмотки с корпусом. Вслед за этим перегорает еще одна плавкая вставка.

В случае, приведенном на рисунке 2.1, *г*, после двухфазного замыкания обмоток перегорает одна плавкая вставка предохранителя и контакт обмоток в месте КЗ сохраняется.

В случаях, приведенных на рисунке 2.1, *б*, *в*, наблюдаются нарушения электробезопасности (на корпусе напряжение) и электродвигатель должен быть немедленно отключен устройством защитного отключения (УЗО).

Во всех случаях неполнофазного режима работы электродвигателя, показанных на рисунке 2.1, наблюдается увеличение скольжения, потерь мощности, температуры обмоток, вибрации и шума.

В случае, приведенном на рисунке 2.1, *в*, ток I_C протекает по обмоткам фаз C и A, поэтому на каждую обмотку приходится напряжение $0,5U_{\text{ф.ном}}$.

В случае, приведенном на рисунке 2.1, *г*, имеет место однофазный режим при линейном напряжении, причем две обмотки электродвигателя включены параллельно, отчего токи I_B и I_C увеличиваются по сравнению со схемой, приведенной на рисунке 2.1, *а*.

Отсюда следует, что неполнофазный режим характеризуется различной степенью увеличения скольжения, потерь мощности, тока и температуры в зависимости от нагрузки на валу.

В случае, приведенном на рисунке 2.1, *б*, электродвигатель развивает пусковой момент, поскольку имеет двухфазное питание и токи I_B и I_C различаются по фазам. Ток I_{PE} в заземляющем проводе равен геометрической сумме токов в фазах B и C. В остальных случаях электродвигатель не развивает пускового момента.

На рисунке 2.2 представлены механические характеристики асинхронного электродвигателя в полнофазном и неполнофазных режимах работы, соответствующие случаям, приведенным на рисунке 2.1, а также механические характеристики вентилятора и скребкового транспортера, имеющих номинальную загрузку $\mu = 1$ при трехфазном режиме работы электродвигателя (точка 1).

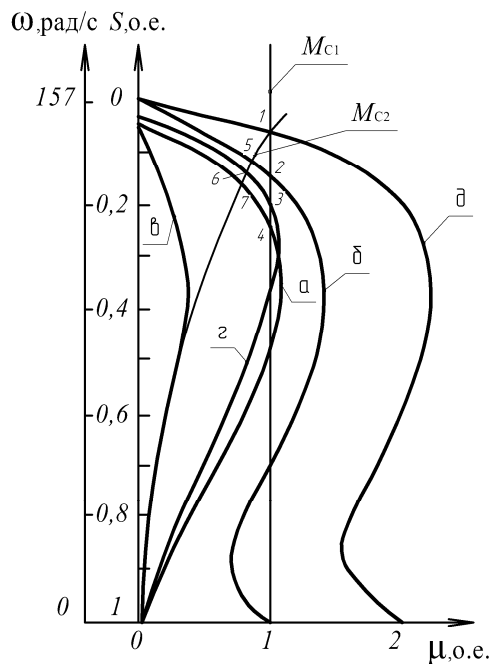


Рисунок 2.2 – Механические характеристики трехфазного асинхронного электродвигателя 4А80В4У1 (1,5 кВт) в неполнофазных (рисунок 2.1, а–з) и в трехфазном режиме работы электродвигателя (точка 1). Однако в случае, приведенном на рисунке 2.1, в, он останавливается.

Из рисунка 2.2 следует, что только в случаях, приведенных на рисунке 2.1, а, б, з, электродвигатель со скребковым транспортером может кратковременно продолжать вращаться со значительным скольжением, примерно в 3–5 раз большим (точки 2, 3, 4), чем в трехфазном режиме работы электродвигателя (точка 1). Однако в случае, приведенном на рисунке 2.1, в, он останавливается.

Электродвигатель с вентилятором на валу способен кратковременно вращаться в тех же случаях, но при меньших скольжениях (точки 5, 6 и 7), чем скребковый транспортер. Во всех описанных случаях возрастание скольжения приводит к росту потерь мощности в двигателе, тока и нагреву обмотки.

Механическая характеристика асинхронного электродвигателя в однофазном режиме приближенно описывается уравнением:

$$\mu = \frac{M}{M_H} = \frac{\mu_k(1-s)}{\frac{s_k}{s(2-s)} + \frac{s(2-s)}{s_k}}, \quad (2.1)$$

где μ_k – кратность критического момента, о. е.;

s_k – критическое скольжение электродвигателя, о. е.

Рассмотрим более подробно часто встречающийся случай явно-го неполнофазного режима (рисунок 2.1, а). Неполнофазный режим может возникать в двух следующих случаях:

- 1) до включения электродвигателя в сеть;
- 2) во время работы электродвигателя в сети.

В первом случае явно-го неполнофазного режима (с обрывом проводника до включения электродвигателя в сеть) система фазных напряжений резко деформирована.

Если измерять напряжение между точками А и А₁, В и А₁ переносным вольтметром (рисунок 2.3, а), не включая QF, то можно установить, что в точке А₁ нет потенциала.

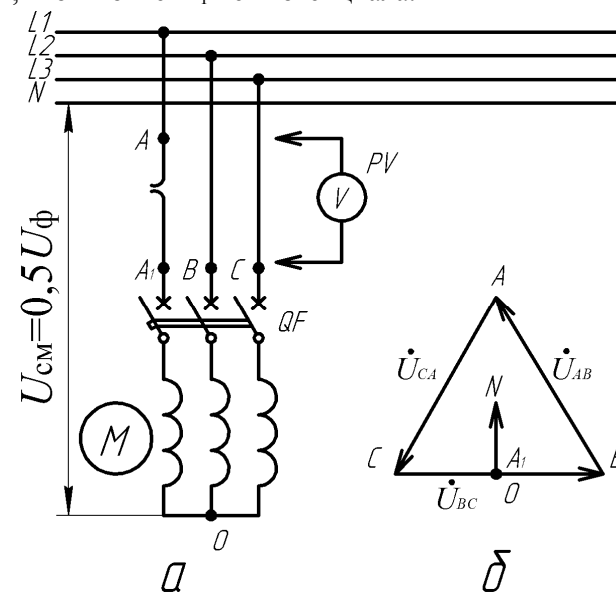


Рисунок 2.3 – Неполнофазный режим при обрыве фазы и неподвижном роторе (а) и векторная диаграмма напряжений при неподвижном роторе (б)

Если включить автоматический выключатель QF , то электродвигатель окажется включенным на линейное напряжение $\dot{U}_{\text{вс}}$. Ток фазы A равен нулю, а токи в фазах B и C противоположны по фазам и равны между собой:

$$I_B = I_C = \frac{\dot{U}_{\text{вс}}}{2Z_k} = \frac{\sqrt{3}\dot{U}}{2Z_k} = \frac{\sqrt{3}}{2} \cdot I_{\text{п}} = 0,866 \cdot I_{\text{п}}, \quad (2.2)$$

где Z_k – сопротивление фазы обмотки электродвигателя в неподвижном состоянии, Ом;

$I_{\text{п}}$ – пусковой ток электродвигателя в трехфазной схеме включения, А.

Теперь потенциал точки A_1 равен потенциалу точки 0 , а $\dot{U}_{\text{во}} = \dot{U}_{\text{ос}} = 380/2 = 190 \text{ В}$ (рисунок 2.3, б). Между точками 0 (нейтраль звезды обмотки электродвигателя) и нулевой точкой N питающей сети существует напряжение $U_{0N} = 110 \text{ В}$. Это напряжение называется *напряжением нулевой последовательности* или *напряжением смещения нейтрали*, т. е. $U_{\text{см}} = U_{0N}$. В этом случае напряжение между точками A и A_1 равно напряжению между точками 0 и A , т. е. $\dot{U}_{A_1A} = \dot{U}_{OA} = 330 \text{ В}$ (см. рисунок 2.3, б). Ротор электродвигателя не вращается, поскольку электродвигатель не развивает пускового момента. В расточке статора имеет место не вращающееся, а пульсирующее электромагнитное поле, созданное токами $I_B = I_C$. Электродвигатель в этом случае быстро нагревается под действием токов $0,866I_{\text{пуск}}$, текущих в фазах B и C . Электромагнитное поле рассеяния обмотки статора увеличивается; возрастает вибрация ротора и обмотки статора из-за одностороннего магнитного притяжения, вызванного токами только двух фаз.

Во втором случае, если явный неполнофазный режим (обрыв проводника) возникает во время работы электродвигателя, изменение параметров происходит иначе. Вращающееся электромагнитное поле наводит в фазе A обмотки статора ЭДС, величина которой зависит от угловой скорости вращения ротора. При малой нагрузке, например, при холостом ходе, угловая скорость вращения ротора незначительно отличается от синхронной угловой скорости враще-

ния, и величина ЭДС фазы A составляет $E_A = (0,90-0,93) U_{\text{ф. ном}}$. При номинальной нагрузке ЭДС фазы A снижается до значения $E_A = (0,7-0,75) U_{\text{ф. ном}}$, а при 140 % перегрузке – до $E_A = (0,45-0,5) U_{\text{ф. ном}}$.

Для определения изменения основных параметров трехфазного электродвигателя в неполнофазном режиме предположим, что в фазу A включен добавочный резистор Z , сопротивление которого при неполнофазном режиме $\dot{Z} \rightarrow \infty$ (рисунок 2.4) [19].

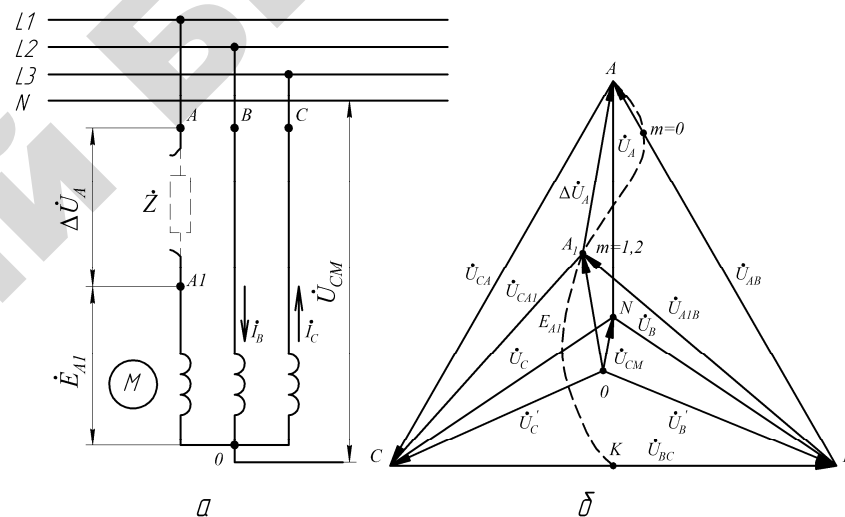


Рисунок 2.4 – Неполнофазный режим ($\dot{Z} \rightarrow \infty$) трехфазного асинхронного электродвигателя с вращающимся ротором (а) и векторная диаграмма напряжения при кратности перегрузки $m=1,2$ (б)

При $\dot{Z} \neq \infty$ падение напряжения на сопротивлении \dot{Z} обозначим $\Delta\dot{U}_A = \dot{I}_A \dot{Z}$, а в фазах B и C – $\Delta\dot{U}_B = 0$ и $\Delta\dot{U}_C = 0$, поскольку эти фазы не имеют добавочных резисторов.

По методу симметричных составляющих падение напряжения нулевой последовательности для одной фазы составит:

$$\dot{U}_0 = \frac{\Delta\dot{U}_A + \Delta\dot{U}_B + \Delta\dot{U}_C}{3} = \frac{\Delta\dot{U}_A + 0 + 0}{3} = \frac{\dot{I}_A \dot{Z}}{3}. \quad (2.3)$$

Составляющие падения напряжения прямой и обратной последовательностей будут равны $\Delta\dot{U}_1 = \Delta\dot{U}_2 = \Delta\dot{U}_0$. Но ток нулевой последовательности протекать не может (нет соединения точек O и N), поэтому $\dot{I}_C = 0$, а ток в фазе A $\dot{I}_A = \dot{I}_1 + \dot{I}_2$, т. е. равен сумме токов прямой и обратной последовательностей. Тогда составляющие падений напряжений нулевой, прямой и обратной последовательностей будут равны:

$$\Delta\dot{U}_0 = \Delta\dot{U}_1 = \Delta\dot{U}_2 = \frac{1}{3}(\dot{I}_1 + \dot{I}_2)\dot{Z}. \quad (2.4)$$

Решение уравнений Кирхгофа для симметричных составляющих напряжения, приведенное в [19], показывает, что при $\dot{Z} = \infty$ токи прямой и обратной последовательностей равны между собой:

$$\dot{I}_1 = -\dot{I}_2 = \frac{\dot{U}}{\dot{Z}_1 + \dot{Z}_2}, \quad (2.5)$$

где \dot{U} – вектор напряжения фазы A в симметричной сети, В;

\dot{Z}_1, \dot{Z}_2 – полные сопротивления прямой и обратной последовательностей обмотки одной фазы электродвигателя, Ом.

Падение напряжения нулевой последовательности, возникающее между нейтралью обмотки статора электродвигателя и нулевым проводом сети, составляет:

$$\Delta\dot{U}_0 = \dot{U}_{\text{см}} = \frac{\dot{U}}{1 + \dot{Z}_1 / \dot{Z}_2}. \quad (2.6)$$

Напряжение, возникающее между концами разомкнутого фазного проводника, равно $\Delta\dot{U}_A = \dot{I}_A \dot{Z} = 3\Delta\dot{U}_0$.

Следовательно, векторы $\Delta\dot{U}_A$ и $\dot{U}_{\text{см}}$ параллельны один другому, при этом $\Delta\dot{U}_A$ в 3 раза превышает $\dot{U}_{\text{см}}$ (рисунок 2.4, б).

Анализ показывает, что значения линейных и фазных напряжений и напряжения смещения зависят от нагрузки на валу

$m = M / M_{\text{ном}}$, где M и $M_{\text{ном}}$ – текущий и номинальный моменты на валу, Н·м.

В неполнофазном режиме численное значение напряжения смещения нейтрали в долях единиц от фазного напряжения сети U составляет [19]:

$$u_{\text{см}} = \frac{U_{\text{см}}}{U_{\text{ф.ном}}} = \frac{1}{1 + i_n \sqrt{\frac{1 + (s_k / s)^2}{i_n^2 + i_0^2 (s_k / s)^2}}}, \quad (2.7)$$

где $u_{\text{см}}$ – напряжение смещения, $u_{\text{см}} = U_{\text{см}} / U_{\text{ф.ном}}$, о.е.;

i_0, i_n – кратность тока холостого хода и пускового тока электродвигателя, о.е.;

s_k, s – критическое и текущее скольжение электродвигателя, о.е.

На рисунке 2.4, б показано положение векторов напряжений при $m = 1, 2$. Перемещение точки A_1 и точки O при увеличении m от $m = 0$ до $m = 1, 2$ обозначено пунктирной линией. Из рисунка 2.4, б

видно, что $\dot{U}_{\text{см}} = \frac{1}{3}\Delta\dot{U}_A$. При еще большем увеличении нагрузки,

вплоть до остановки ротора, точка A_1 переместится в точку K . Сюда же «дрейфует» точка O , напряжение смещения станет равным $\dot{U}_{\text{см}} = 110$ В, а $\Delta\dot{U}_A = 330$ В.

Из рисунка 2.4, б видно, что при неполнофазном режиме и явном обрыве фазы A , линейные напряжения \dot{U}_{CA} и \dot{U}_{AB} изменяются по величине и по фазе (напряжение \dot{U}_{BC} не изменяется). Все фазные напряжения изменяются по величине и по фазе, причем их изменения связаны с величиной нагрузки ротора. От нагрузки ротора зависит и напряжение нулевой последовательности \dot{U}_{ON} (напряжения смещения), а также ЭДС \dot{E}_{A1} , индуцируемая в обмотке оборванной фазы.

Положение точки A_1 (рисунок 2.4, б) зависит не только от загрузки m электродвигателя, но и от его параметров, симметрии фазных и линейных напряжений в сети. При включении в питающую сеть разных по мощности однофазных нагрузок симметричная система трехфазных

напряжений искажается и в нулевом проводе течет ток нулевой последовательности. Между нейтралью питающего трансформатора и точкой нулевого проводника, в которой включена несимметричная нагрузка, появляется напряжение нулевой последовательности, которое определяется как сумма трех фазных напряжений, т. е. $\dot{U}_0'' = \dot{U}_A + \dot{U}_B + \dot{U}_C$ (рисунок 2.5). Кроме этого, в электродвигателе из-за неодинакового сопротивления обмоток статора всегда имеется смещение нейтрали обмотки на некоторую величину. Если это смещение нейтрали обмотки обозначить \dot{U}_0' , то вместе с напряжением \dot{U}_0'' оно может дать некоторую величину \dot{U}_0 , действующую даже при симметричном трехфазном режиме работы электродвигателя.

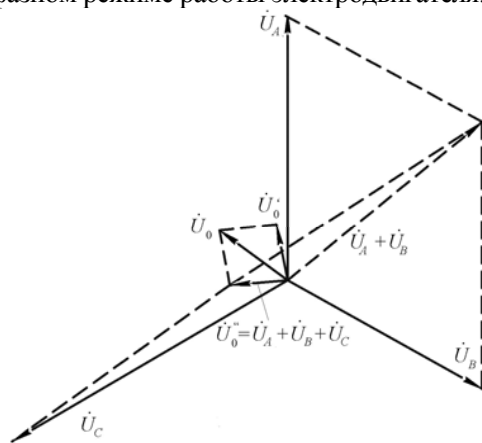


Рисунок 2.5 – Векторная диаграмма, поясняющая образование напряжения \dot{U}_0 как сумму напряжений смещения обмотки электродвигателя \dot{U}_0' и суммарного напряжения нулевой последовательности трех фаз \dot{U}_0'' в асимметричной трехфазной сети

Напряжение нулевой последовательности электродвигателя \dot{U}_0' есть величина для данного электродвигателя постоянная, а напряжение нулевой последовательности трех фаз сети \dot{U}_0'' – величина переменная не только по амплитуде, но и по фазе. Поэтому эти напряжения или складываются, или вычитаются. В самом неблагоприятном случае они скла-

дываются и могут составлять значительную величину. Фоновый уровень напряжения нулевой последовательности в трехфазной сети 380 В доходит до 15–20 В, а иногда при включении сварочного однофазного трансформатора – до 30–40 В. Если напряжение смещения электродвигателя в этом режиме сложится с напряжением \dot{U}_0 , то будет наблюдаться еще большее изменение напряжения по фазам, а напряжение смещения может стать больше 110 В.

Таким образом, при неполнофазном режиме и явном обрыве одной из фаз напряжения на обмотках электродвигателя изменяются по величине и фазе, но неоднозначно. Их значения зависят от параметров электродвигателя, его загрузки и симметрии сетевого напряжения.

Характер изменения напряжения смещения показан на рисунке 2.6.

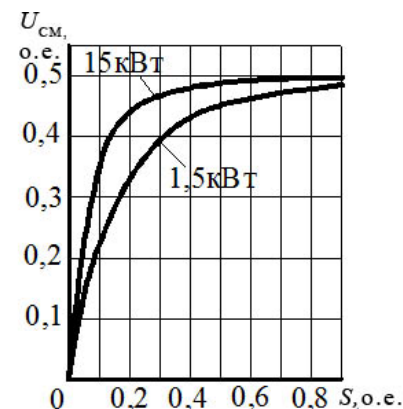


Рисунок 2.6 – Изменение напряжения смещения в зависимости от скольжения для асинхронных электродвигателей мощностью 1,5 и 15 кВт

Кривые $u_{см} = f(s)$ получены расчетным путем по уравнению (2.7) для электродвигателей 4А80В4У3 (1,5 кВт; $s_n = 0,058$; $i_n = 5,0$; $s_k = 0,345$; $\cos \varphi_n = 0,83$) и 4А160С4У3 (15 кВт; $s_n = 0,023$; $s_k = 0,16$; $i_n = 7$; $\cos \varphi_n = 0,88$). Токи холостого хода i_0 в относительных единицах в трехфазном режиме определены по формуле:

$$i_0 = \sin \varphi_n - \frac{S_n}{S_k} \cdot \cos \varphi_n. \quad (2.8)$$

Следовательно, для электродвигателя мощностью 1,5 кВт – $i_0 = 0,417$, а для электродвигателя 15 кВт – $i_0 = 0,348$.

Из рисунка 2.6 следует, что электродвигатели большей мощности имеют большие изменения напряжения смещения $u_{см}$, следовательно, и более чувствительны к неполнофазному режиму работы.

В неполнофазном режиме токи в “необорванных” фазах увеличиваются пропорционально напряжению смещения нейтрали.

В относительных единицах (кратностях тока $i = I/I_{ном}$) это условие запишется (при обрыве фазы А) в виде:

$$i_B = i_C = \sqrt{3} i_{пн} u_{см}, \quad (2.9)$$

где $i_{пн}$ – кратность пускового тока в трехфазном режиме, о.е.

В случае холостого хода электродвигателя в неполнофазном режиме ток холостого хода возрастает примерно в 1,4–1,73 раза, но может не превышать номинальный ток электродвигателя. При полном моменте нагрузки на валу для всех электродвигателей в неполнофазном режиме ток статора превышает номинальный. При расчете тока в неполнофазном режиме пользуются уравнениями (2.4)–(2.8). Для электродвигателя 1,5 кВт, параметры которого приведены выше, а механическая характеристика изображена на рисунке 2.2, при работе со скребковым транспортером кратность тока в неполнофазном режиме составит $i = 2,27$. Для определения $u_{см}$ используется график, который представлен на рисунке 2.6.

Выше рассмотрен неполнофазный режим асинхронного трехфазного электродвигателя при соединении его обмоток статора в «звезду». При соединении обмоток статора в «треугольник», при явном обрыве фазы до пуска и при включении электродвигателя в сеть будет наблюдаться пусковой ток $I_{пн}$, равный пусковому току полнофазного режима в одной из фаз обмотки (рисунок 2.7). В двух других фазах обмотки токи составят $0,5 I_{пн}$, а линейные токи

возрастут до значения $I_C = I_B = 1,5 I_{пн}$. Напряжения $\dot{U}_{BA_1} = \dot{U}_{A_1C} = 0,5 \dot{U}_{BC}$.

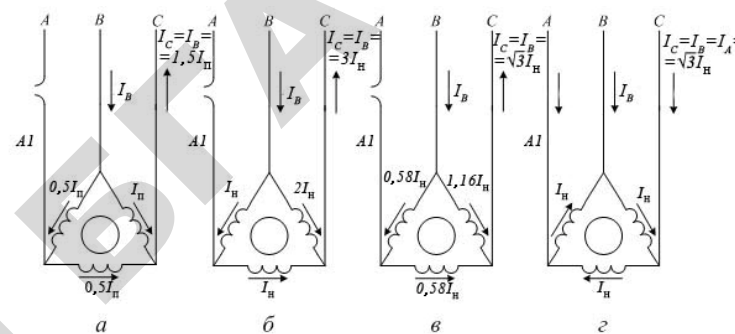


Рисунок 2.7 – Явный неполнофазный режим питания асинхронного трехфазного электродвигателя с обмотками, соединенными в «треугольник» в период пуска (а), при вращении ротора с полной нагрузкой (б), при нагрузке, обеспечивающей линейный ток $\sqrt{3} I_{пн}$ (в), в полнофазном режиме под полной нагрузкой (з)

Если неполнофазный режим возник во время вращения ротора электродвигателя, то при полной загрузке токи в обмотках (рисунок 2.7, б) будут иметь значения:

$$I_{BC} = 2 I_{пн}, \quad (2.10)$$

где I_{BC} – ток в неполнофазном режиме, А;

$I_{пн}$ – ток в трехфазном режиме, А.

В линейных проводах ток возрастает до значения $I_B = I_C = 2 I_{пн} + I_{пн} = 3 I_{пн}$ (рисунок 2.7, б). В трехфазном режиме работы линейные токи составляют $I_B = I_C = \sqrt{3} I_{пн}$.

Таким образом, линейные токи в неполнофазном режиме $I_B = I_C$ возрастут в $\sqrt{3}$ раз по сравнению с линейными токами полнофазного режима, а фазные токи возрастут в 2 раза по сравнению с фазными токами полнофазного режима. Это значит, что при схеме соединения обмоток в «треугольник» лучше контролировать токи в фазных проводниках, а не в линейных.

При линейном токе $1,73I_n$ фазные токи в трехфазном режиме не превышают номинального значения (рисунок 2.7, з), а в неполнофазном режиме при линейном токе $1,73I_n$ в одной фазе ток превышает номинальное значение на 16 % (рисунок 2.7, в).

Влияние нагрузки на ток электродвигателя в неполнофазном режиме работы при схеме соединения обмоток «треугольник» аналогично и такое же, как и при схеме соединения обмоток «звезда».

Неявная потеря фазы наблюдается в случае обрыва провода на высоковольтной линии, питающей силовой трансформатор (рисунок 2.8). В этом случае наблюдаются несимметричные токи в обмотке электродвигателя.

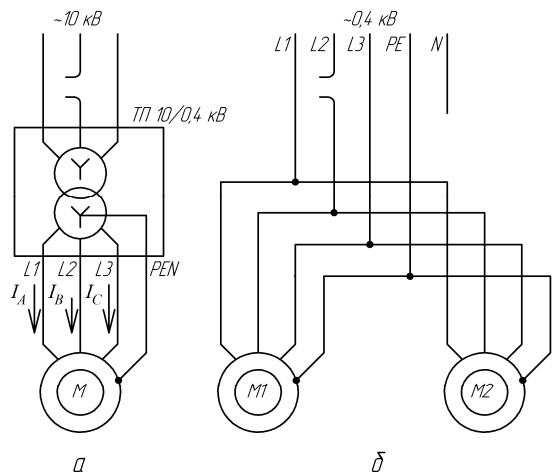


Рисунок 2.8 – Неявный неполнофазный режим питания трехфазного асинхронного электродвигателя в случае обрыва провода на стороне 10 кВ (а) и при обрыве магистрального провода, питающего группу электродвигателей (б)

Неявная потеря фазы наблюдается также в случае обрыва магистрального провода, питающего группу асинхронных электродвигателей. В этом случае за счет других вращающихся асинхронных электродвигателей, имеющих большую частоту вращения и большую мощность, а также менее нагруженных, происходит индуктирование ЭДС в оборванной фазе и выравнивание напряжений неполнофазного режима. В этом случае возникает ограниченная асимметрия напряжений, при которой включенный в сеть и недостаточно нагруженный электродви-

гатель может продолжать работать. Выявить неполнофазный режим для этого случая затруднительно.

Таким образом, можно сделать следующие выводы:

1. Неполнофазный режим не имеет однозначно определяемых значений напряжения или тока и поэтому не может быть надежно выделен на фоне явных и неявных разрывов в питающей сети.

2. В общем виде при неполнофазном режиме изменяются почти все параметры электродвигателя, за исключением чередования фаз и сопротивления изоляции. На практике для разработки устройств защиты используются следующие параметры:

- 1) напряжение (по снижению);
- 2) ток (по наличию или по величине тока);
- 3) угол α между напряжениями или токами фаз (в трехфазном режиме угол α равен 120 электрических градусов; в неполнофазном режиме – изменяется);
- 4) напряжение или ток нулевой последовательности (увеличивается);
- 5) напряжение или ток обратной последовательности (увеличивается);
- 6) постоянная составляющая напряжения трехфазного однополупериодного выпрямителя трансформаторных датчиков тока фаз в трехфазном режиме больше нуля, а в неполнофазном режиме уменьшается до нуля;
- 7) электромагнитное поле рассеяния обмоток (увеличивается переменная составляющая электромагнитного поля).

Неполнофазный режим приводит также к уменьшению частоты вращения, увеличению температуры и вибрации обмоток, увеличению потерь в статоре и роторе, изменению η и $\cos \phi$ электродвигателя. Однако на практике эти параметры для защиты электродвигателя от неполнофазного режима (за исключением температуры) не применяются.

2.2. Защита асинхронного трехфазного электродвигателя от работы в неполнофазном режиме с контролем напряжения сети

Защита с контролем напряжения сети основана на уменьшении двух линейных и всех фазных напряжений в сети при возникновении неполнофазного режима.

На рисунке 2.9 показана простая схема с двумя электромагнитными пускателями, включенными на линейные напряжения, по которой осуществляется контроль наличия напряжения в сети. Схема не позволяет включить в работу асинхронный электродвигатель при пропадании в сети любой фазы, потому что при этом $KM1$ или $KM2$ не включаются.

Если пропадание фазы происходит при работающем электродвигателе, то отключение электродвигателя может не произойти. Это связано с тем, что при вращении ротора двигателя в оборванной фазе возникает ЭДС и якорь пускателя не отпадает. Величина ЭДС, индуцируемой в обмотке, зависит от скольжения ротора электродвигателя, а скольжение, в свою очередь, – от нагрузки на валу электродвигателя.

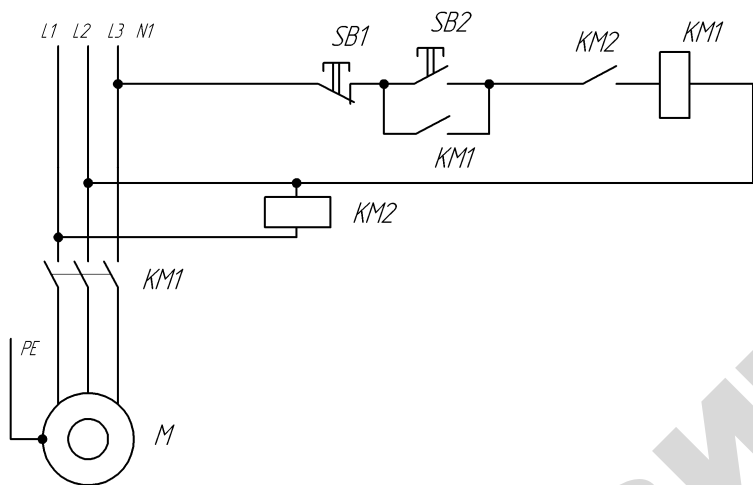


Рисунок 2.9 – Принципиальная электрическая схема защиты трехфазного асинхронного электродвигателя от включения в сеть при неполнофазном режиме с контролем двух линейных напряжений сети

На рисунке 2.10 приведены кривые зависимости фазных и линейных напряжений на зажимах электродвигателя от степени его нагрузки в однофазном режиме работы при потере фазы A . Электродвигатель имел следующие значения [19]: $S_n = 0,04$; $S_k = 0,209$; $\mu_k = 2,7$; $i_n = 7,0$; $i_0 = 0,7$.

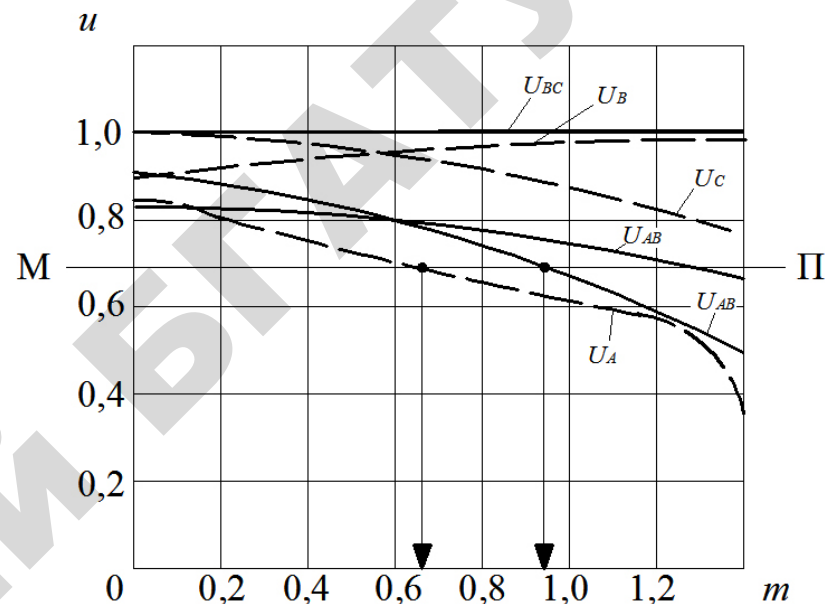


Рисунок 2.10 – Напряжения на зажимах электродвигателя в однофазном режиме в зависимости от степени его нагрузки m и граница напряжения отпускания электромагнитного пускателя (линия ПП)

Из рисунка 2.10 следует, что одно линейное напряжение (U_{BC}) не изменилось, а все другие напряжения – уменьшились, причем наибольшее изменение претерпевает напряжение в оборванной фазе. Если напряжение отпускания электромагнитных пускателей составляет $0,7U_{ном}$ (линия ПП на рисунке 2.10), то отключение его произойдет, в лучшем случае, при нагрузке $0,94P_{ном}$. Если контролировать фазные напряжения с помощью трех промежуточных реле, то отключение одного реле произойдет при меньшей нагрузке, примерно при $0,66P_{ном}$.

Для повышения чувствительности электромагнитного пускателя к снижению напряжения увеличивают его напряжение отпускания путем включения добавочного резистора в цепь катушки электромагнитного пускателя (рисунок 2.11).

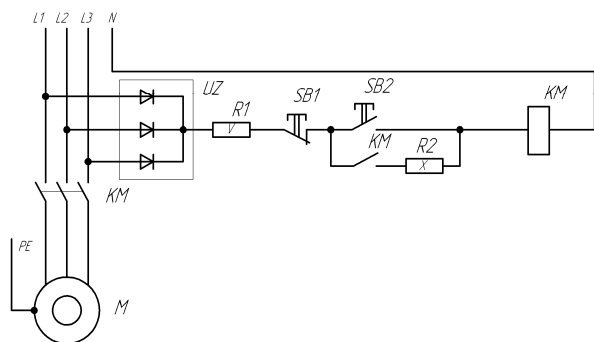


Рисунок 2.11 – Принципиальная электрическая схема защиты трехфазного электродвигателя от работы в неполнофазном режиме с контролем напряжений сети с помощью трехфазного однополупериодного выпрямителя UZ

В схеме (рисунок 2.11) применяется однополупериодный трехфазный выпрямитель UZ . Поскольку катушка электромагнитного пускателя KM рассчитана на переменный ток, а он включен в цепь постоянного тока, то для ограничения тока используется резистор $R1$. После включения KM его контакт шунтирует кнопку «Пуск» $SB2$. Теперь ток питания катушки еще больше уменьшится резистором $R2$. Поскольку ток отпускания ниже тока включения, то $R2 \gg R1$. Ток питания катушки KM выбирается таким, чтобы значительное снижение напряжения одной из фаз или пропадание одной фазы при работающем электродвигателе вызывало отключение KM .

В схеме (рисунок 2.11) включение резистора $R2$ позволило поднять напряжение отпускания KM с $0,7U_{ном}$ до $0,9U_{ном}$. Если теперь напряжение на выходе однополупериодного выпрямителя станет меньше $0,9U_{ном}$, то KM отключится. Быстрому отключению схемы способствует питание ее выпрямленным пульсирующим напряжением. Схемы, подобные этим, изложены в [1].

Контроль напряжения сети с целью защиты электродвигателя может быть организован с использованием трех электромеханических реле напряжения, чувствительных к снижению напряжения. Такое устройство защиты будет иметь большие габариты и массу. Более современным решением является использование электронных аналоговых или цифровых устройств контроля напряжения сети, например, реле серии CZF предприятия «Евроавтоматика Ф

и Ф» [20] (г. Лида). Обычно такие устройства защиты асинхронного трехфазного электродвигателя не строятся на контроле только одного параметра – напряжения сети, а дополнительно контролируется асимметрия напряжений.

Следует обратить внимание, что при обрыве фазы ниже места подключения схем, изображенных на рисунках 2.9 и 2.11, в сеть, например, после контактов электромагнитного пускателя KM , эти схемы не реагируют на неполнофазный режим работы. Это свойственно всем устройствам, контролирующим напряжение сети.

Указанные недостатки, а также нестабильность контроля по напряжению не позволяют рекомендовать этот способ защиты асинхронного трехфазного электродвигателя к применению.

2.3. Защита асинхронного трехфазного электродвигателя от работы в неполнофазном режиме с контролем напряжения или тока нулевой последовательности

Защита по напряжению или току нулевой последовательности основана на следующем. При трехфазном режиме работы электродвигателя нет напряжения (или оно незначительное) между нулевой точкой обмотки электродвигателя и нулем сети. В неполнофазном режиме работы между этими точками появляется напряжение, которое называется напряжением нулевой последовательности или напряжением смещения (см. п. 2.1). Если соединить эти точки проводником, то в нем потечет ток нулевой последовательности. Если включить между этими точками слаботочное реле, то оно сработает.

Простейшие схемы, реализующие этот принцип защиты, изложены в [1]. В отличие от схем, приведенных в [1], принцип защиты по напряжению нулевой последовательности с применением промежуточного реле постоянного тока и выпрямителя представлен на рисунке 2.12. Это позволяет использовать малогабаритные и слаботочные элементы схемы, а также создать задержку времени на срабатывание реле KV . Задержка времени необходима для отстройки от ложных срабатываний реле KV при кратковременной потере фазы в сети, вызванной, например, одновременным замыканием контактов.

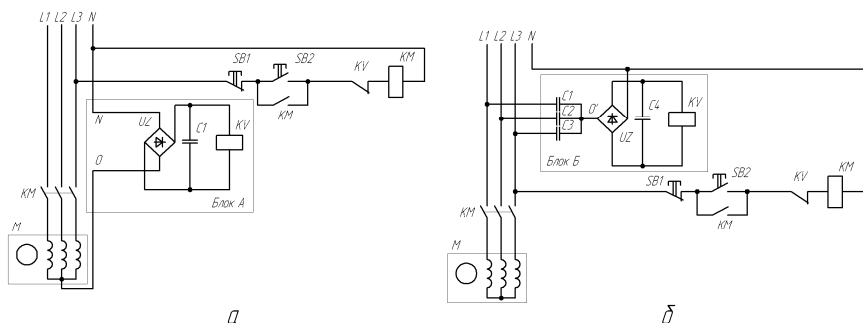


Рисунок 2.12 – Принципиальные электрические схемы защиты асинхронного электродвигателя от неполнофазного режима работы с контролем напряжения нулевой последовательности при наличии нулевой точки обмотки двигателя (а) и при отсутствии нулевой точки обмотки электродвигателя и создании искусственной точки 0 с помощью трех конденсаторов $C1-C3$ (б)

В схеме (рисунок 2.12, а) реле KV выбирается на напряжение не ниже 24 В и не выше 60 В, выпрямитель – на напряжение не ниже 200 В и на ток, определяемый сопротивлением катушки реле KV и напряжением U_{0N} . Максимальное значение напряжения ($U_{0N} = 110$ В) имеет место при неподвижном роторе. Конденсатор $C1$, подключенный параллельно катушке реле KV , обеспечивает задержку на включение реле. Тем самым обеспечивается отстройка от кратковременных неполнофазных режимов, вызванных неодновременностью замыкания контактов в коммутационной аппаратуре и другими причинами.

При недоступной нулевой точке двигателя образуют искусственную нулевую точку, например, с помощью трех резисторов или конденсаторов (рисунок 2.12, б). Емкость конденсаторов $C1-C3$ определяется током реле KV . Чем меньше ток реле KV , тем меньше нужна емкость конденсаторов. Обычно она составляет 0,22–2,2 мкФ. Схема не имеет регулировки порога срабатывания.

Для повышения чувствительности и снижения мощности резисторов (или конденсаторов), образующих нулевую точку, и для регулирования напряжения смещения применяют полупроводниковый усилитель. Схема такого устройства приведена на рисунке 2.13.

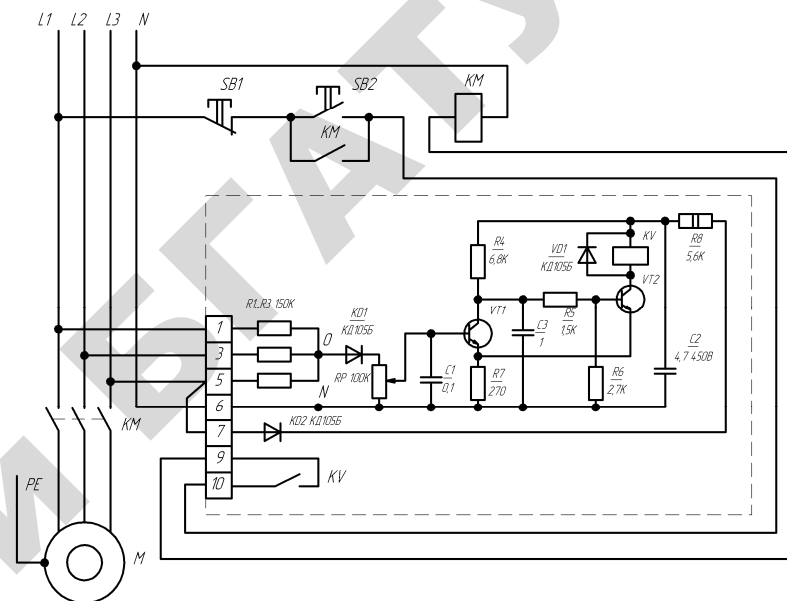


Рисунок 2.13 – Принципиальная электрическая схема электронного устройства защиты трехфазного асинхронного электродвигателя от работы в неполнофазном режиме по напряжению нулевой последовательности с образованием искусственной нулевой точки при помощи трех резисторов $R1-R3$

Резисторы $R1-R3$ образуют нулевую точку; $VD2$, $R8$, $C2$ – источник питания; $VT1$, $VT2$, $R7$, $C3$ – триггер Шмитта; KV – исполнительный орган; $VD1$, RP и $C1$ – входные цепи полупроводникового усилителя, выполненного в виде триггера Шмитта. Резистором RP регулируют порог срабатывания устройства; диод $VD3$ нужен для защиты транзистора $VT2$ от ЭДС самоиндукции катушки реле KV в момент прекращения тока в ней.

В нормальном трехфазном режиме работы на выходе искусственного нуля напряжение отсутствует, транзистор $VT1$ закрыт, а $VT2$ – открыт. Реле KV включено и его контакт замкнут в цепи катушки контактора KM . Электродвигатель можно запустить, нажав кнопку $SB2$.

При появлении неполнофазного режима между 0 и N появляется напряжение смещения. Конденсатор $C1$ заряжается и через некоторое время на базе транзистора $VT1$ появится положительное напря-

жение, транзистор $VT1$ откроется, а $VT2$ закроется и реле KV отключится. Электродвигатель нельзя запустить, нажав кнопку $SB2$. Если же электродвигатель работал, то он отключится от сети.

Величина напряжения смещения зависит от того, вращается или неподвижен ротор асинхронного электродвигателя. Если ротор вращается, то в обмотке оборванной фазы индуцируется ЭДС, которая зависит от скольжения ротора. При малом скольжении ротора величина ЭДС почти равна номинальному напряжению и поэтому напряжение смещения мало, следовательно, транзистор $VT1$ включится. При увеличении скольжения ротора ЭДС падает, а напряжение смещения возрастает, $VT1$ включится, а $VT2$ отключится.

При возрастании асимметрии фазных напряжений возрастает напряжение смещения и реле срабатывает, даже если будет трехфазный режим питания. Чувствительность устройства к напряжению смещения определяется положением движка потенциометра RP .

Если обрывается провод сети за местом подключения устройства, то оно не изменит своего состояния, поскольку от сети поступают напряжения всех фаз. В этом состоит недостаток схем защиты с искусственной нулевой точкой, основанных на контроле напряжения смещения.

На рисунке 2.14, *а* приведена схема устройства защиты по току нулевой последовательности, имеющая три трансформатора тока, соединенных параллельно и подключенных к реле тока.

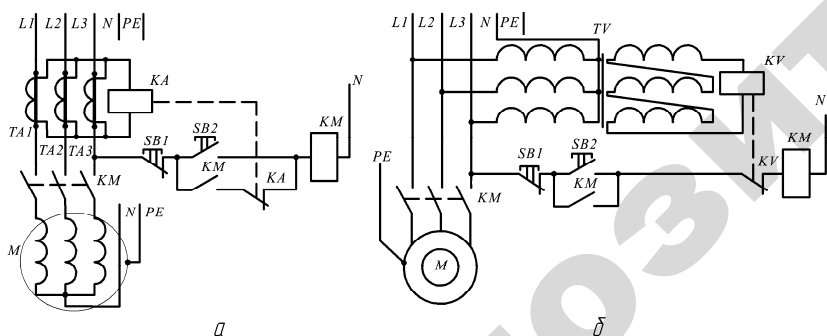


Рисунок 2.14 – Принципиальные схемы устройств защиты асинхронных трехфазных электродвигателей от работы в неполнофазном режиме работы с контролем тока нулевой последовательности с помощью трех трансформаторов тока (*а*) и с контролем напряжения нулевой последовательности с помощью трехфазного трансформатора напряжения (*б*)

В нормальном режиме работы сумма токов фаз I_A, I_B, I_C электродвигателя равна нулю. Нулевая точка обмотки статора должна быть в этом случае соединена с нулевым проводом сети. В нормальном режиме работы в этом проводе нет тока нулевой последовательности. Во вторичной обмотке трансформаторов тока $TA1, TA2$ и $TA3$ сумма токов фаз также равна нулю и реле KV отключено.

В неполнофазном режиме сумма токов фаз I_A, I_B, I_C не равна нулю, появляется ток нулевой последовательности в нулевом проводнике. Во вторичной обмотке трансформаторов тока $TA1, TA2, TA3$ сумма токов фаз также не равна нулю и реле KV включается. Его контакт разрывает цепь электромагнитного пускателя KM . Электродвигатель отключается от сети.

Устройства, построенные по схемам, приведенным на рисунках 2.12, *а* и 2.14, *а*, чувствительны к обрыву фазы в любом месте по цепи питания электродвигателя, но требуют, чтобы была доступна нулевая точка обмотки статора. В большинстве электродвигателей она недоступна.

На рисунке 2.14, *б* изображена схема устройства защиты по напряжению нулевой последовательности, имеющая трехфазный трансформатор TV , первичные обмотки которого соединены в схему «звезда». Вторичные обмотки трансформатора TV соединены в схему «открытый треугольник», включенный на промежуточное реле KV . Нулевая точка первичной обмотки трансформатора соединена с нулевым проводом сети.

В трехфазном режиме работы сети векторная сумма напряжений фаз вторичной обмотки равна нулю, реле KV отключено. В неполнофазном режиме сети появляются во вторичных обмотках фаз напряжения нулевой последовательности U_0 , которые совпадают по фазе и поэтому складываются в схеме разомкнутого треугольника в напряжение $3U_0$. От этого напряжения реле KV включается, а электродвигатель отключается от сети.

В заключение следует отметить, что защита по напряжению (току) нулевой последовательности дает ложные срабатывания в несимметрично нагруженных электрических сетях. Она используется обычно с другими видами защит асинхронного трехфазного электродвигателя.

2.4. Защита асинхронного трехфазного электродвигателя от работы в неполнофазном режиме с контролем напряжения или тока обратной последовательности

Защита от неполнофазного режима по напряжению или току обратной последовательности основана на известном из курса электротехники свойстве: всякую несимметричную трехфазную систему напряжений (или токов) можно разложить на трехфазную систему напряжений прямой, обратной и нулевой последовательностей.

Обратная последовательность напряжений или токов отличается от прямой последовательности обратным чередованием фаз. Для ее выявления используют специальные фильтры обратной последовательности (рисунок 2.15).

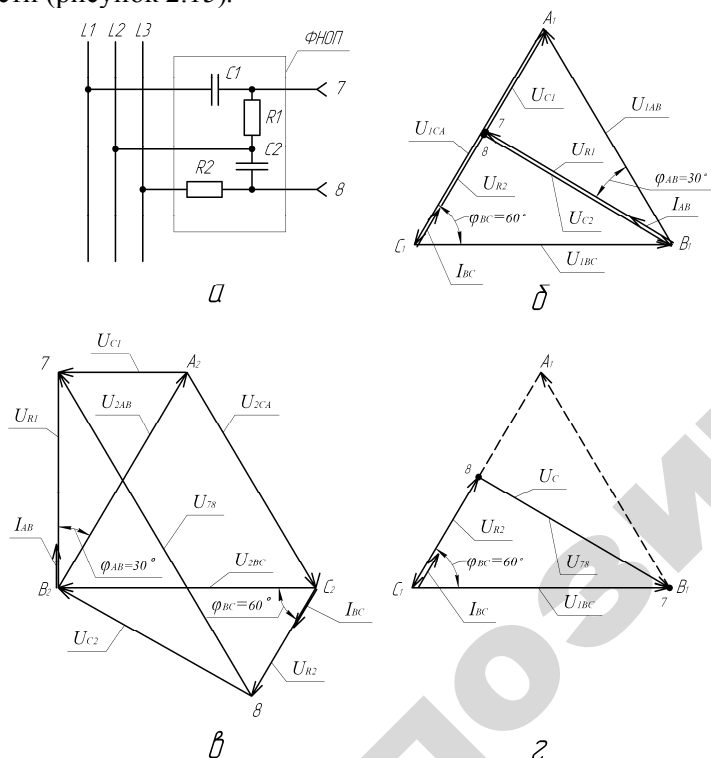


Рисунок 2.15 – Принципиальная электрическая схема фильтра напряжений обратной последовательности (ФНОП) с двумя конденсаторами и двумя резисторами в режиме холостого хода (а); его векторные диаграммы в нормальном трехфазном режиме питания (б), при обратном чередовании фаз (в) и обрыве фазы А (г)

На рисунке 2.15, а приведена одна из известных схем фильтра напряжений обратной последовательности на базе резисторно-конденсаторной цепи. Фильтр содержит две цепи, включенные на линейные напряжения. Линейные напряжения не содержат составляющих нулевой последовательности, поэтому фильтр питается ими [21].

Сопrotивления цепей подобраны таким образом, чтобы при подводе к фильтру симметричных линейных напряжений на его выходных зажимах (между точками 7 и 8) напряжение было равно нулю. В этом случае на векторной диаграмме фильтра точки 7 и 8 совпадают (рисунок 2.15, б). Ток \dot{I}_{AB} (рисунок 2.15, б) опережает напряжение \dot{U}_{AB} на угол $\varphi_{AB} = 30^\circ$. Следовательно, падение напряжения \dot{U}_{R1} совпадает по фазе с током \dot{I}_{AB} , а напряжение \dot{U}_{C1} на конденсаторе C_1 находится под углом 90° к току \dot{I}_{AB} (или к \dot{U}_{R1}), отставая от тока. Ток \dot{I}_{BC} опережает напряжение \dot{U}_{BC} на 60° , напряжение \dot{U}_{R2} совпадает с током \dot{I}_{BC} по фазе, а напряжение \dot{U}_{C2} – отстает от тока \dot{I}_{BC} по фазе на 90° .

Из векторной диаграммы (рисунок 2.15, б) видно следующее соотношение между векторами напряжений: $\dot{U}_{R2} = \dot{U}_{C1}$, а $\dot{U}_{C2} = \dot{U}_{R1}$. Можно выбрать такие фазовые углы φ_{AB} и φ_{BC} , что точки 7 и 8 будут на середине вектора \dot{U}_{AC} , и по величине падения напряжения на элементах схемы составляют: $\dot{U}_{R2} = \dot{U}_{C1} = 190$ В, $\dot{U}_{C2} = \dot{U}_{R1} = 329$ В. Из этого следует, что конденсатор C_2 надо выбирать на 600 В, а C_1 – на 400 В.

Величины сопротивлений (активных и реактивных) соотносятся между собой следующим образом: $X_{C1} = R_2 = R_1 / \sqrt{3}$; $X_{C2} = R_1$. В этом случае обеспечивается равенство токов \dot{I}_{AB} и \dot{I}_{BC} , а также наилучшие условия работы схемы. Величина емкости C (мкФ) при частоте тока 50 Гц определяется из соотношения

$$C = \frac{10^6}{314 X_c} \quad (2.11)$$

Так как конденсаторы имеют стандартные значения величины емкости, то для настройки фильтра обратной последовательности резисторы фильтра выбирают переменными. Мощность фильтра определяется величиной той нагрузки, которая будет подключаться к зажимам 7 и 8. Желательно обеспечить максимальную отдаваемую мощность. Это выполняется, если внутреннее сопротивление фильтра будет равно сопротивлению нагрузки.

При обратном чередовании фаз конденсатор $C1$ оказывается подключенным к фазе $L3$, а резистор $R2$ – к фазе $L1$ (рисунок 2.15, в). Векторная диаграмма напряжений обратной последовательности отличается от векторной диаграммы напряжений прямой последовательности тем, что линейные напряжения \dot{U}_{AB} и \dot{U}_{AC} меняются местами, а вектор напряжения \dot{U}_{BC} поворачивается на 180° (рисунок 2.15, в). При этом изменяется положение треугольников напряжений, вершины 7 и 8 смещаются относительно друг друга. Согласно рисунку 2.15, в, величина напряжения \dot{U}_{7-8} превышает линейное напряжение и составляет 570 В (при холостом ходе фильтра обратной последовательности).

В неполнофазном режиме, например, при обрыве фазы $L1$, имеет место ток только в одном плече фильтра, точки 7 и 8 расходятся (рисунок 2.15, з). В режиме холостого хода фильтра обратной последовательности величина напряжения $\dot{U}_{7-8} = 330$ В. При подключении нагрузки к выходу этого фильтра напряжение \dot{U}_{7-8} уменьшается.

На рисунке 2.16 приведена схема выпускаемого ранее реле защиты E511, которое обеспечивало защиту трехфазного электродвигателя от работы в неполнофазном режиме с использованием фильтра напряжений обратной последовательности (ФНОП).

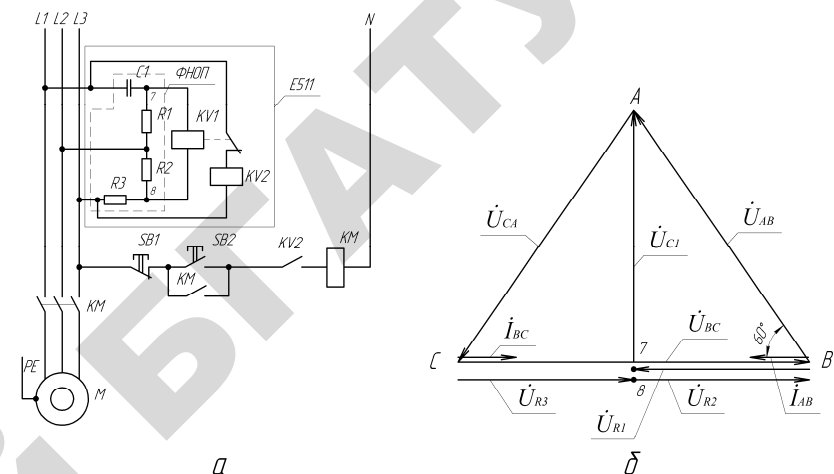


Рисунок 2.16 – Принципиальная электрическая схема устройства защиты E511, контролирующего напряжение обратной последовательности (а) и векторная диаграмма его фильтра напряжений обратной последовательности (б)

В нормальном трехфазном режиме работы электродвигателя реле $KV2$ включено. При возникновении неполнофазного режима работы или при смене чередования фаз включается реле $KV1$, а реле $KV2$ отключается от сети, разрывая цепь контактора KM .

Устройство E511 имело значительные габариты и массу. Его мощный ФНОП (рисунок 2.16, б), отличается от ФНОП, изображенного на рисунке 2.15, а. Вместо конденсатора $C2$ и резистора $R2$ (рисунок 2.15 а) ФНОП рисунка 2.16, б имеет два одинаковых резистора $R2$ и $R3$; угол ϕ_{AB} увеличен до 60° . Следовательно, выходные точки 7 и 8 ФНОП лежат посередине вектора \dot{U}_{BC} (рисунок 2.16, б).

В современных устройствах защиты с целью уменьшения массы и габаритов, а также увеличения чувствительности используются полупроводниковые усилители. В качестве примера рассмотрим реле защиты типа ФЕ-0200, принцип действия которого аналогичен принципу действия реле ЕЛ-8. Принципиальная электрическая схема реле ФЕ-0200 изображена на рисунке 2.17.

Фильтр напряжения обратной последовательности образуют элементы $C2$, $C3$, $R3$, $R2$, $R1$, а также первичная обмотка TV . В этом фильтре между точками m и n отсутствует напряжение в нормальном режиме работы сети.

Вторичная обмотка трансформатора TV , диодный мост $VD1$ - $VD4$ и конденсатор $C5$ образуют источник нестабилизированного выпрямленного напряжения. Этим напряжением питается электронная схема, построенная на транзисторе $VT1$ и триггере Шмитта (транзисторы $VT2$ и $VT3$).

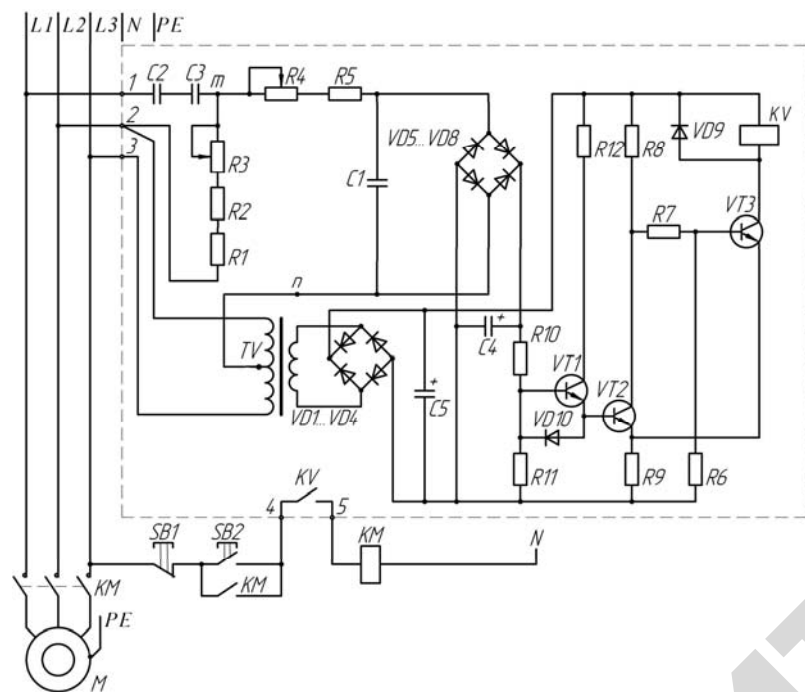


Рисунок 2.17 – Принципиальная электрическая схема включения реле контроля фаз ФЕ-0200 для защиты асинхронного трехфазного электродвигателя от работы в неполнофазном режиме по напряжению обратной последовательности

При трехфазном напряжении в сети между точками m и n нет напряжения, транзисторы $VT1$ и $VT2$ закрыты, триггер находится в положении включенного транзистора $VT3$, при этом реле KV включено и электродвигатель может быть включен в сеть. На базе транзистора $VT3$ напряжение больше, чем на эмиттере. Это достигается подбором резисторов $R7$ и $R6$. Ток эмиттера создает на $R9$ положительное падение напряжения, подпирая $VT2$.

При изменении последовательности фаз или исчезновении одной из фаз между точками m и n возникает напряжение и по цепи $R4$, $R5$, $C1$, а также через $VD5$ - $VD8$, $R10$, $R11$ потечет ток. Конденсатор $C1$ служит фильтром для частоты 50 Гц (по переменной составляющей), а конденсатор $C4$ – интегрирующим фильтром на выходе выпрямителя $VD5$ - $VD8$. При возникновении тока через резистор $R11$ и падении напряжения на резисторе $R11$ открывается транзистор $VT1$. Соответственно, увеличивается ток базы транзистора $VT2$. При некотором значении тока базы транзистора $VT2$ он скачком открывается, а транзистор $VT3$ закрывается. Реле KV отключится. Его контакт разорвет цепь питания электромагнитного пускателя KM . Электродвигатель отключится от сети.

В лаборатории автоматической защиты БГАТУ разработано и исследовано надежное устройство защиты асинхронного трехфазного электродвигателя от работы в неполнофазном режиме [22]. Его принципиальная электрическая схема представлена на рисунке 2.18.

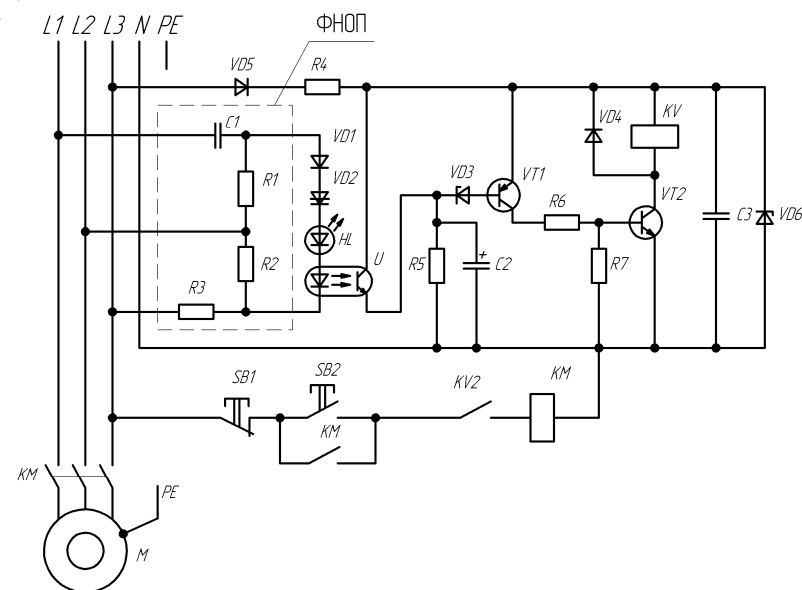


Рисунок 2.18 – Принципиальная электрическая схема устройства защиты асинхронного трехфазного электродвигателя от работы в неполнофазном режиме по напряжению обратной последовательности, разработанная в БГАТУ

В этом устройстве ФНОП собран по простой схеме на резисторах $R1-R3$ и конденсаторе $C1$. На выходе фильтра включена цепочка из последовательно включенного диода $VD1$, динистора $VD2$, светодиода HL и транзисторной оптопары U . Выход оптопары U нагружен на резистор $R5$, к которому через стабилитрон $VD3$ подключена база транзистора $VT1$. Конденсатор $C2$ обеспечивает задержку времени на включение транзисторов $VT1$ и $VT2$. Элементы $VD5, VD6, R4$ и $C3$ обеспечивают питание схемы.

В трехфазном режиме сети транзисторы $VT1$ и $VT2$ открыты и реле KV включено. Электродвигатель можно включить в сеть.

При возникновении неполнофазного режима в сети на выходе фильтра напряжений обратной последовательности появляется напряжение, под действием которого динистор $VD2$ пробивается в положительную волну напряжения. В течение действия полуволны положительного напряжения загорается светодиод $HL1$ и открывается транзистор оптопары U . Происходит заряд конденсатора $C2$. При достижении на конденсаторе $C2$ напряжения пробоя стабилитрона $VD3$ он пробивается, и транзисторы $VT1$ и $VT2$ закрываются. Реле KV отключается и вызывает отключение электромагнитного пускателя KM . Электродвигатель отключается от сети.

Схема, приведенная на рисунке 2.18, положена в основу аппарата защиты асинхронного трехфазного электродвигателя от работы на двух фазах и обратного чередования фаз питающей сети (патент на полезную модель № 4412 ВУ).

Преимущество фильтра напряжения обратной последовательности – защита асинхронного трехфазного электродвигателя от работы в неполнофазном режиме и при обратном чередовании фаз.

Общим недостатком устройств защиты с фильтром напряжения обратной последовательности является то, что они реагируют на неполнофазный режим сети, возникающий только до места включения аппарата защиты в сеть.

Этого недостатка не имеет токовая защита с фильтром обратной последовательности. Принципиальная электрическая схема такой защиты приведена на рисунке 2.19.

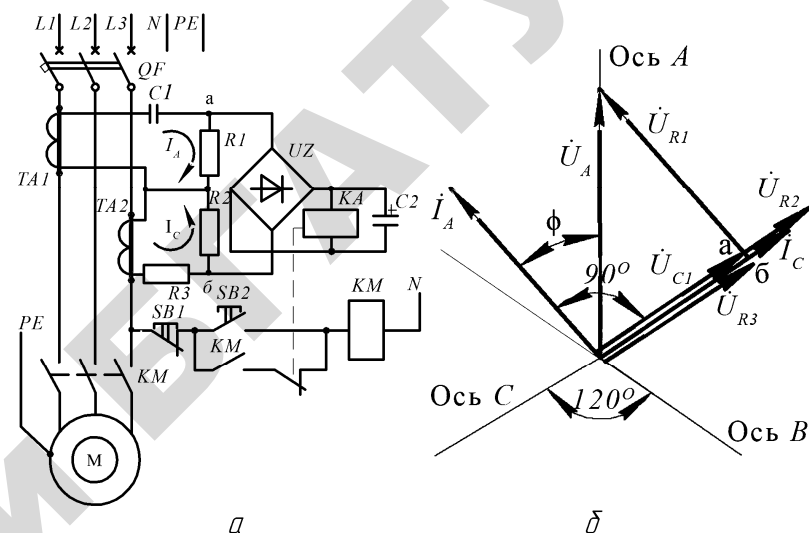


Рисунок 2.19 – Принципиальная электрическая схема устройства защиты асинхронного электродвигателя от работы в неполнофазном режиме с помощью фильтра тока обратной последовательности (а), векторная диаграмма фильтра тока обратной последовательности (б)

Устройство состоит из двух трансформаторов тока $TA1$ и $TA2$, фильтра обратной последовательности, собранного из элементов $R1, C1, R2, R3$, выпрямителя UZ , конденсатора $C2$ и исполнительного реле KA .

Напряжение на выходе фильтра обратной последовательности (между точками a и b , рисунок 2.19) зависит от симметрии токов электродвигателя. Это напряжение особенно резко возрастает при возникновении неполнофазного режима работы. Когда напряжение на конденсаторе $C2$ достигает напряжения срабатывания реле KV , оно включается и своим контактом разрывает цепь питания электромагнитного пускателя KM . Электродвигатель отключается от сети.

Недостаток схемы, приведенной на рисунке 2.19, состоит в том, что она позволяет включать двигатель на заведомо неполнофазную сеть. Кроме этого, напряжение на вторичных обмотках трансформаторов тока зависит от протекающего тока. Это требует выбора определенных параметров схемы для каждого конкретного электродвигателя.

2.5. Защита асинхронного трехфазного электродвигателя от работы в неполнофазном режиме с контролем наличия токов фаз

Защита по наличию тока фаз основана на том, что в неполнофазном режиме сети отсутствует ток в одной из фаз, питающих электродвигатель.

Для контроля наличия тока в проводах питания электродвигателя могут быть использованы три электромеханических реле минимального тока, применяемые в релейной защите ([1, с. 35]). Однако такое решение несовременно, потому что в настоящее время электромеханические реле заменяются более совершенными электронными реле тока, например, составленными по схеме рисунка 2.20.

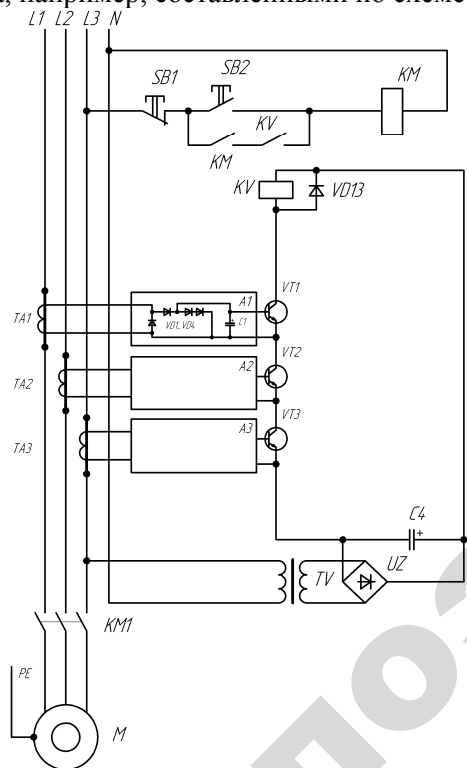


Рисунок 2.20 – Принципиальная электрическая схема устройства защиты трехфазного асинхронного электродвигателя от неполнофазного режима работы с контролем токов фаз

При наличии всех трех фаз через первичные обмотки трансформаторных датчиков тока $TA1–TA3$ протекнут токи электродвигателя. Во вторичных обмотках трансформаторных датчиков тока $TA1–TA3$ появится ЭДС. Под действием ЭДС трансформаторного датчика тока $TA1$ потекут однополупериодные токи через диоды $VD2–VD4$ и конденсатор $C1$ зарядится положительным зарядом на верхней обкладке, отчего транзистор $VT1$ откроется. Аналогичные явления произойдут в блоках $A2$ и $A3$ фаз $L2$ и $L3$. Все транзисторы $VT1–VT3$ окажутся включенными по логической схеме И, при наличии напряжения на выходе выпрямителя UZ реле KV включится. Исчезновение тока в любой из фаз вызывает закрытие одного из транзисторов $VT1–VT3$, отключение реле KV , электромагнитного пускателя KM и электродвигателя.

Достоинство схемы (рисунок 2.20) состоит в том, что она работоспособна в широком диапазоне токов. Это связано с использованием в блоках $A1–A3$ диодов, включенных в прямом направлении в качестве элементов нагрузки трансформаторных датчиков тока. Прямое падение напряжения на диодах несущественно изменяется от протекающего через них тока, поэтому схема оказывается работоспособной в широком диапазоне токов электродвигателя.

Недостаток схемы, приведенной на рисунке 2.20, состоит в том, что при отсутствии напряжения в фазах $L1$ или $L2$ электромагнитный пускатель KM можно включить. После этого устройство защиты его сразу же отключит, поскольку транзисторы $VT1$ или $VT2$ не откроются из-за отсутствия напряжения на выходе трансформаторных датчиков тока $TA1$ или $TA2$. Контакты электромагнитного пускателя KM разрывают при этом пусковые токи электродвигателя и выгорают.

Для устранения этого недостатка контролируют наличие напряжения фаз с помощью трехфазного однополупериодного выпрямителя по схеме, приведенной на рисунке 2.21. В этой схеме резистор $R4$ ограничивает ток катушки реле KV до номинальных значений. Диод $VD16$ защищают транзисторы $VT1–VT3$ от перенапряжения в момент отключения катушки реле KV .

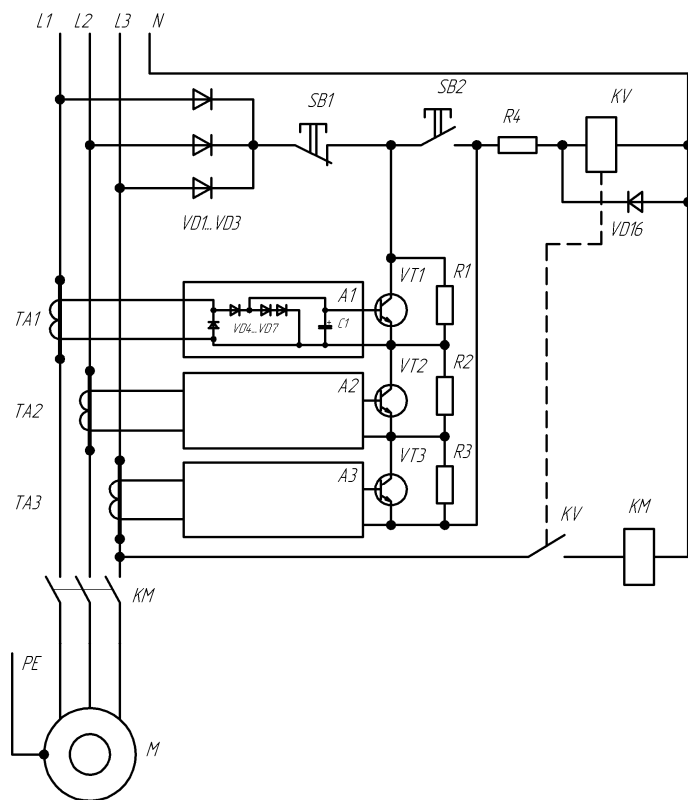


Рисунок 2.21 – Принципиальная электрическая схема устройства защиты трехфазного электродвигателя от неполнофазного режима работы с контролем тока фаз и предпускового контроля напряжения сети

Резисторы $R1-R3$ равномерно разделяют напряжение питания на последовательно включенных транзисторах $VT1-VT3$. Реле KV включится только при наличии трехфазного питания. Если в фазах будут токи, то при отпускании кнопки $SB2$ реле не отключится, поскольку кнопка $SB2$ будет зашунтирована транзисторами $VT1-VT3$. При двухфазном питании KV не включится. Если пропадает ток в одной из фаз, то соответствующий транзистор $VT1-VT3$ закрывается и реле KV отключится. В этой схеме напряжение включения реле KV должно быть больше 200 В и меньше 250 В. Это значение напряжения подбирается резистором $R4$.

Трансформаторные датчики тока в схемах, приведенных на рисунках 2.20 и 2.21, имеют малые габариты и массу. Включение их вторичных обмоток на диоды обеспечивает контроль наличия тока в широких пределах (даже при насыщении магнитопровода датчиков тока). Минимальный контролируемый ток должен вызывать не менее 0,6 В на вторичных обмотках датчиков тока.

Приведенные на рисунках 2.20 и 2.21 схемы могут применяться для защиты электродвигателей, работающих при ручном дистанционном управлении. В этих схемах включение реле KV при появлении неполнофазного режима в сети приводит к отключению электромагнитного пускателя KM и электродвигателя. Для последующего включения электродвигателя требуется нажать кнопку $SB2$ «Пуск».

В схемах автоматического управления асинхронным электродвигателем защита его от работы в неполнофазном режиме по наличию токов в фазах строится иначе. Транзисторы $VT1-VT3$ включаются параллельно к входам элемента ИЛИ и элемента И-НЕ [23].

Приведенные на рисунках 2.20 и 2.21 схемы не имеют индикации пропавшей фазы. С помощью двухобмоточных реле можно построить схемы защиты от неполнофазного режима, контролируя токи в фазах, с индикацией пропавшей фазы [24].

Принцип контроля наличия тока в фазах для защиты асинхронного трехфазного электродвигателя в неполнофазном режиме работает надежнее, чем изложенные выше принципы контроля напряжения при неполнофазном режиме работы сети.

2.6. Защита асинхронного трехфазного электродвигателя от работы в неполнофазном режиме с контролем угла между напряжениями или токами фаз

Защита по углу между напряжениями или токами фаз основана на изменении этого угла в неполнофазном режиме по сравнению с трехфазным режимом. Известно, что в трехфазном режиме угол между фазами напряжений или токов составляет 120, а в неполнофазном режиме – 180 электрических градусов.

Принцип контроля угла между напряжениями широко используется в устройствах защиты типов ЕЛ-10, ЕЛ-11 и др.

Рассмотрим в качестве примера реле ЕЛ-10, функциональная схема которого приведена на рисунке 2.22, а.

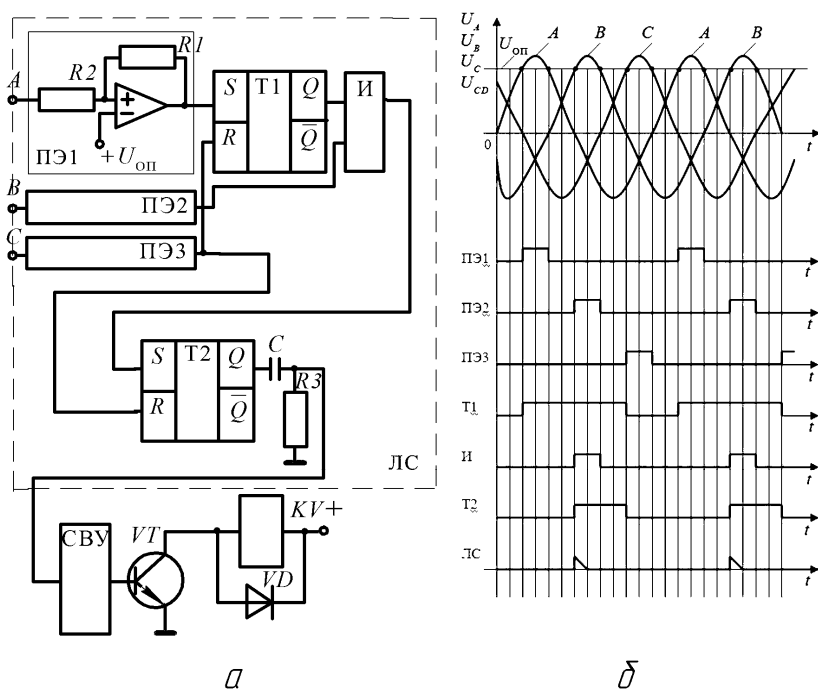


Рисунок 2.22 – Функциональная схема устройства защиты ЕЛ-10 (а) и временные диаграммы напряжений ее отдельных элементов (б)

Логическое устройство на каждом входе (каждой фазе) имеет пороговый элемент ПЭ. Пороговый элемент представляет собой компаратор, на вход которого подаются два напряжения. Первое напряжение пропорционально напряжению сети, а второе – опорное, постоянного тока. Пока опорное напряжение больше, чем синусоидальное, компаратор не переключается. Как только синусоидальное напряжение превысит опорное, компаратор переключается и на его выходе появляется положительное напряжение. Таким образом, формируются импульсы на выходе пороговых элементов при каждой положительной полуволне напряжения (см. рисунок 2.22, б).

Устройство содержит также два триггера. На вход S первого триггера $T1$ подаются импульсы запуска триггера с выхода элемен-

та ПЭ1, а на вход R «сброс» триггера подается импульс от элемента ПЭ3. Таким образом, на выходе триггера $T1$ появляется длинный импульс (рисунок 2.22, б).

Устройство содержит также логический элемент И. На первый вход его подается длинный импульс напряжения от триггера, а на второй вход – импульс напряжения от элемента ПЭ2. Когда на входах существуют оба импульса напряжения, то на выходе элемента И появляется импульс напряжения. Далее этот импульс напряжения запускает триггер $T2$, а импульс напряжения от элемента ПЭ3 закрывает его. Появляется короткий импульс напряжения на выходе триггера $T2$. Дифференцирующая цепочка $C-R$ обеспечивает остроконечные импульсы напряжения на входе схемы временной уставки (СВУ). После СВУ напряжение поступает на исполнительный орган, состоящий из транзистора и реле KV , обеспечивая его включение.

При возникновении неполнофазного режима в сети, при недопустимом изменении фазного напряжения или при изменении порядка чередования фаз изменяются фазы напряжений на входе логической схемы. На выходе логической схемы исчезает последовательность импульсов. По истечении выдержки времени схема временной уставки (СВУ) выдает сигнал на отключение выходного реле.

Устройства защиты по углу между напряжениями имеют те же недостатки, что и устройства защиты, контролирующие напряжения. По этой причине предпочтительно использование устройств защиты с контролем угла между токами фаз.

Рассмотрим *фазочувствительное устройство защиты (ФУЗ)*, которое в свое время широко применялось в сельскохозяйственном производстве [1].

В устройстве ФУЗ датчиками тока используются два фазовращающих трансформатора тока. Каждый трансформатор состоит из трех обмоток. Две первичные обмотки принадлежат разным фазам и имеют разное число витков. Благодаря этому электромагнитному полю сердечника можно придать различную фазу. Примем, например, что первый трансформатор $T1$ имеет 12 витков, включаемых в фазу A , и 8 витков, включаемых в фазу B , причем катушка фазы B встречная по отношению к фазе A (соотношение витков обмоток фаз $W_1/W_2 = 3/2$). На рисунке 2.23, а изображены магнитные потоки, создаваемые токами фаз A и B , и суммарный электромагнитный поток Φ_1 трансформатора $T1$.

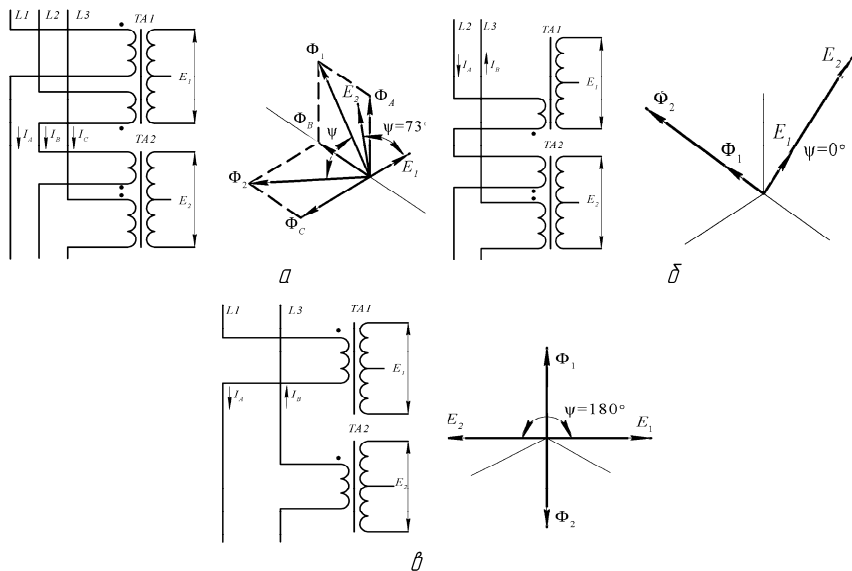


Рисунок 2.23 – Схемы и векторные диаграммы магнитных потоков и ЭДС фазовращающих трансформаторов в трехфазном режиме (а), при обрыве фазы А (б) и при обрыве фазы В (в)

Второй трансформатор *ТА2* имеет 8 витков, включаемых в фазу В, и 12 витков, включаемых в фазу С, причем намотаны витки в разные стороны. Точка возле символа обмотки на рисунке 2.23 означает начало обмотки. Токи фаз В и С создают электромагнитный поток Φ_2 . Между потоками Φ_1 и Φ_2 получается угол $\psi = 73^\circ$. Следовательно, между ЭДС E_1 и E_2 также угол $\psi = 73^\circ$ (рисунок 2.23, а).

При обрыве фазы А картина меняется. Теперь токи текут от фазы В к фазе С и фазы электромагнитных потоков Φ_1 и Φ_2 изменяются (рисунок 2.23, б); угол $\psi = 0$.

В случае обрыва фазы В токи протекают от фазы А к фазе С и фазы электромагнитных потоков Φ_1 и Φ_2 изменяются (рисунок 2.23, в). Теперь $\psi = 180^\circ$.

При обрыве фазы С получается такой же результат, как и при обрыве фазы А.

Из рассмотренных случаев следует, что ЭДС E_1 и E_2 при обрыве фазы первичного тока изменяются и становятся равными $\psi = 0^\circ$ или $\psi = 180^\circ$. В трехфазном режиме угол между ЭДС E_1 и E_2 равен 73° .

Эти соотношения справедливы примерно в двукратном диапазоне рабочих токов.

Для «улавливания» фазы служит фазочувствительный кольцевой детектор на диодах *VD1–VD4* с балластными резисторами *R1–R4* (рисунок 2.24, а). Исполнительное реле подключено к средним выводам вторичных обмоток трансформаторов *ТА1* и *ТА2*.

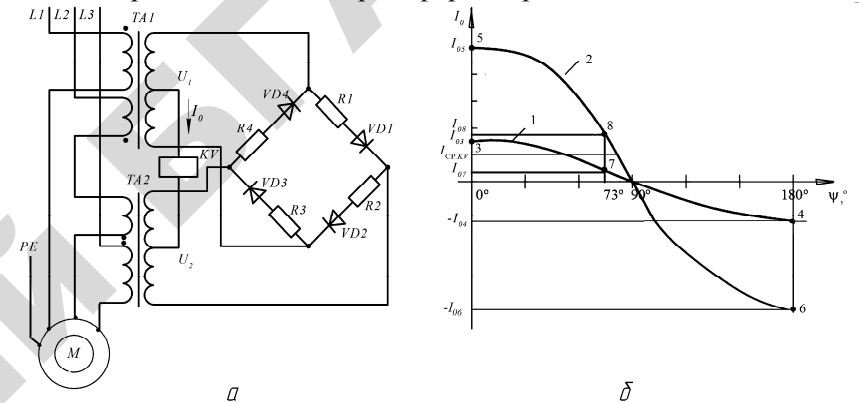


Рисунок 2.24 – Принципиальная электрическая схема устройства защиты ФУЗ (а) и косинусная характеристика фазового детектора (б): 1 – при номинальном токе; 2 – при токе стопорного режима

Фазочувствительный кольцевой детектор имеет фазовую характеристику $I_0 = \varphi(\psi)$, изменяющуюся по закону косинуса (рисунок 2.24, б), где I_0 – ток в катушке реле *KV*; ψ – угол между ЭДС E_1 и E_2 . Ток в катушке реле *KV* зависит от величины напряжений U_1 и U_2 , а также от угла ψ между ними и величины токов в фазах А, В и С.

В нормальном трехфазном режиме через катушку реле *KV* течет ток I_{07} (точка 7 при $\psi = 73^\circ$). Этот ток меньше, чем ток срабатывания $I_{ср.KV}$ реле *KV*, отчего реле *KV* не срабатывает.

При обрыве фазы угол ψ становится равным 0° или 180° , а ток катушки *KV* имеет положительное значение I_{03} (точка 3 при $\psi = 0^\circ$) или отрицательное значение I_{04} (точка 4 при $\psi = 180^\circ$), причем эти токи больше, чем ток срабатывания реле $I_{ср.KV}$, отчего реле *KV* включается. Электродвигатель отключается от сети.

При обрыве фазы и незапустившемся электродвигателе (стопорный режим) токи электродвигателя возрастают до пусковых, а ток в катушке реле KV – до значения I_{05} (точка 5 при $\psi = 0^\circ$) или до значения I_{06} (точка 6 при $\psi = 180^\circ$), отчего реле KV включается. Электродвигатель отключается от сети.

При заторможенном роторе все токи фаз возрастают до пусковых значений, угол ψ остается прежним – $\psi = 73^\circ$, но ток в реле KV возрастает до значения I_{08} (точка 8, рисунок 2.24, б), превышающий ток срабатывания реле $I_{ср.KV}$, отчего реле KV включается. Электродвигатель отключается от сети.

Таким образом, устройство ФУЗ осуществляет защиту не только от неполнофазного режима, но и от режима заторможенного ротора.

Устройство ФУЗ надежно работает при обрыве фазы в любом месте по цепи питания электродвигателя. В этом состоит *преимущество* токовых фазочувствительных устройств защиты электродвигателя.

Недостаток токовых фазочувствительных устройств защиты электродвигателя состоит в том, что они допускают пуск электродвигателя на заведомо неполнофазную сеть.

В дальнейшем на базе устройства ФУЗ в Латвийской сельскохозяйственной академии были разработаны устройства ФУЗ-М (дополнительно обеспечивающие защиту от перегрузки), ФУЗ-У (дополнительно к ФУЗ-М – контроль температуры корпуса), ФУЗ-И (дополнительно к ФУЗ-У – контроль сопротивления изоляции обмотки).

2.7. Защита асинхронного трехфазного электродвигателя от работы в неполнофазном режиме с контролем постоянной составляющей выпрямленного напряжения датчиков тока фаз

Этот способ защиты основан на следующем принципе. В трехфазном режиме работы электродвигателя в выпрямленном напряжении трансформаторных датчиков тока фаз присутствует постоянная составляющая напряжения, а в двухфазном режиме работы импульсы выпрямленного напряжения смещаются друг относительно друга на 180° и постоянная составляющая уменьшается до нуля (рису-

нок 2.25). Первопричиной этого является фазовый сдвиг токов, а следствием – изменение постоянной составляющей выпрямленного напряжения.

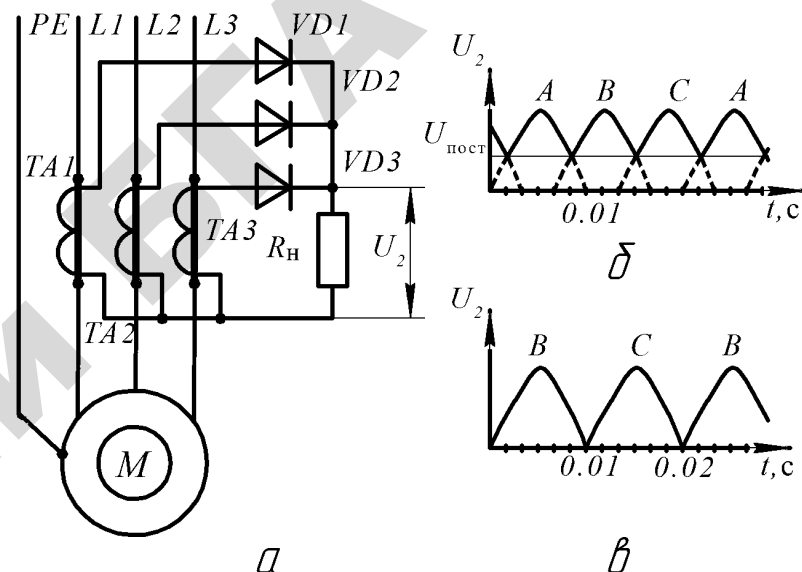


Рисунок 2.25 – Принципиальная электрическая схема блока формирования постоянной составляющей выпрямленного напряжения (а) и временные диаграммы напряжений на резисторе в трехфазном (б) и двухфазном (в) режимах работы электродвигателя

Достоинством этого принципа является то, что угол фазового сдвига между импульсами напряжения не существенно зависит от величины тока электродвигателя и места подключения устройства защиты. В то же время амплитуда импульсов напряжения зависит от тока электродвигателя, а форма импульсов напряжения – от насыщения сердечников трансформаторных датчиков тока. Эти особенности могут быть использованы для дополнительной защиты электродвигателя от режима заторможенного ротора.

Наиболее просто контроль постоянной составляющей выпрямленного напряжения осуществляется с помощью быстродействующего герконового реле [25].

Устройство защиты работает следующим образом (рисунок 2.26).

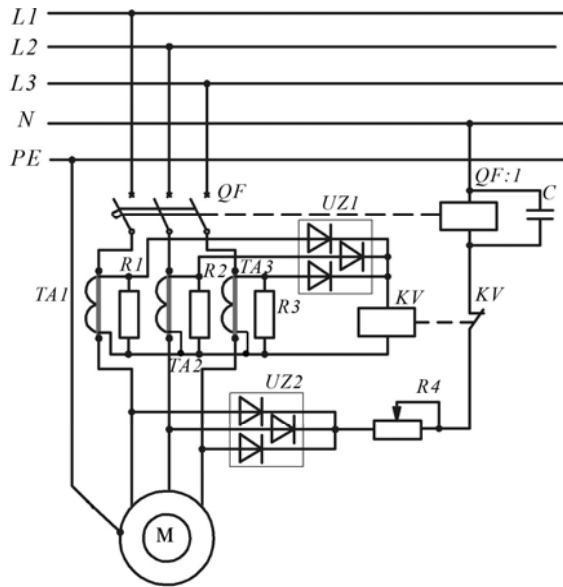


Рисунок 2.26 – Принципиальная электрическая схема устройства защиты асинхронного электродвигателя от работы в неполнофазном режиме по авторскому свидетельству СССР №904077

При включении автоматического выключателя QF и электродвигателя в сеть возникают пусковые токи. Во вторичных обмотках трансформаторов тока $TA1-TA3$ появляются ЭДС, под действием которых по катушке герконового реле KV потечет выпрямленный ток. Реле KV включится и разомкнет контакт в цепи катушки независимого расцепителя автоматического выключателя QF раньше, чем напряжение на катушке независимого расцепителя достигнет величины напряжения его срабатывания. После разбега электродвигателя его токи уменьшатся, но реле KV останется включенным, поскольку значение постоянной составляющей выпрямленного напряжения больше напряжения отпущения герконового реле KV .

При обрыве фазы в питающей сети токи в других фазах становятся равными по величине, но противоположными по фазе. От выпрямителя $UZ1$ поступает пульсирующее выпрямленное напряжение, постоянная составляющая которого падает до нуля (рисунок 2.25, в). Благодаря быстродействию герконового реле KV начинает периодически замыкать

и размыкать цепь катушки независимого расцепителя автоматического выключателя QF . Конденсатор C при этом заряжается до напряжения срабатывания независимого расцепителя автоматического выключателя QF . Происходит отключение автоматического выключателя QF и электродвигателя. Задержка на срабатывание автоматического выключателя QF настраивается с помощью резистора $R4$ и конденсатора C и выбирается минимальной, но большей, чем время срабатывания герконового реле KV и время пуска электродвигателя (с целью отстройки от пускового режима).

На рисунке 2.26 представлена схема с автоматическим выключателем в качестве исполнительного органа. При управлении электродвигателем с помощью электромагнитного пускателя рекомендуется использовать вместо катушки независимого расцепителя автоматического выключателя QF промежуточное реле, размыкающий контакт которого включен в цепь катушки электромагнитного пускателя [26]. Промежуточное реле должно иметь напряжение 5 В, если включить его по схеме, представленной на рисунке 2.27.

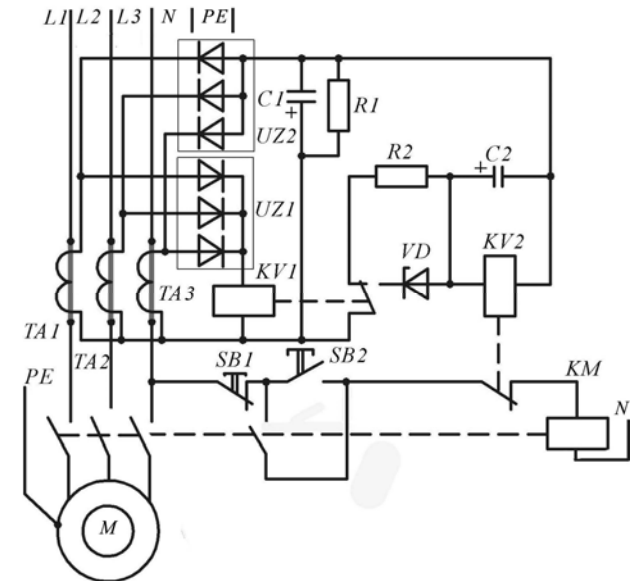


Рисунок 2.27 – Принципиальная электрическая схема устройства фазоимпульсной защиты на базе герконового реле по авторскому свидетельству СССР №1275630

При включении электромагнитного пускателя *KM* на выходе первого выпрямителя *UZ1* появляется напряжение, постоянная составляющая которого больше напряжения срабатывания герконового реле *KV1*. Реле *KV1* включается и его контакт переключается раньше, чем напряжение на обмотке промежуточного реле *KV2* достигает величины напряжения срабатывания. Одновременно переключающий контакт *KV1* подключает второй выпрямитель *UZ2* к обмотке реле *KV2* через стабилитрон *VD*. Напряжение на выходе второго выпрямителя сглаживается конденсатором *C1* и по величине меньше напряжения пробоя стабилитрона *VD*.

В случае двухфазного режима работы постоянная составляющая напряжения первого выпрямителя *UZ1* становится равной нулю, т.е. ниже напряжения отпускания герконового реле *KV1*, отчего переключающий контакт реле *KV1* начинает периодически включать и отключать цепь реле *KV2*. Конденсатор *C2* при этом заряжается до напряжения срабатывания реле *KV2*, после чего размыкающий контакт *KV2* отключает электромагнитный пускатель *KM*. Электродвигатель отключается от сети.

В режиме заторможенного ротора возрастают токи первичных обмоток трансформаторов тока *TA1–TA3* в 4–7 раз. Это вызывает увеличение напряжения, поступающего от выпрямителей. Стабилитрон *VD* пробивается, происходит быстрая зарядка конденсатора *C2* до напряжения срабатывания реле *KV2*. Реле *KV2* срабатывает. Отключается электромагнитный пускатель *KM*, а следовательно, и электродвигатель от сети. Задержка времени на срабатывание реле *KV2* настраивается с помощью резистора *R* и конденсатора *C2* и выбирается минимальной, но большей, чем время срабатывания герконового реле *KV1* и время пуска электродвигателя (с целью отстройки от пускового режима).

Контроль постоянной составляющей выпрямленного напряжения можно осуществить, дифференцируя выпрямленное выходное напряжение трансформаторов тока. При этом герконовое реле заменяется более чувствительным и бесконтактным узлом контроля постоянной составляющей выпрямленного напряжения [27–29]. Принципиальная электрическая схема одного из таких устройств защиты показана на рисунке 2.28 [30].

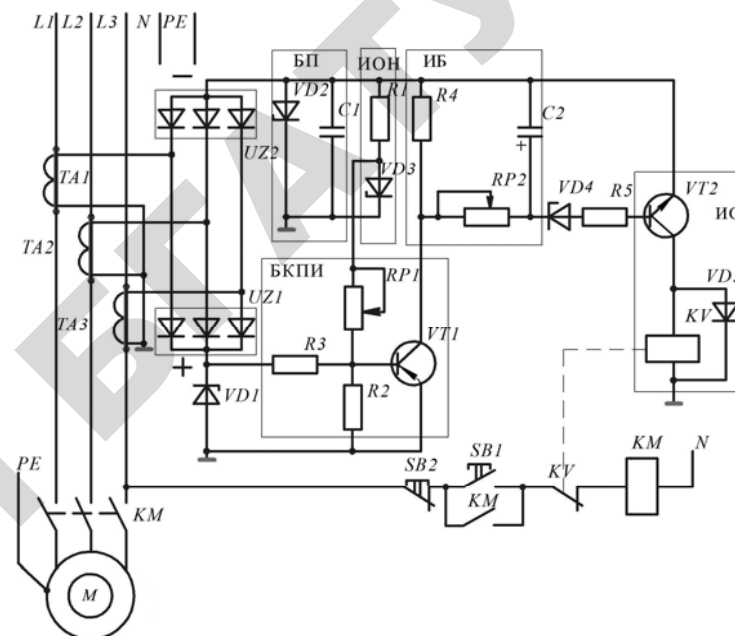


Рисунок 2.28 – Принципиальная электрическая схема устройства защиты с контролем постоянной составляющей выпрямленного напряжения трансформаторов тока фаз по авторскому свидетельству СССР №1390692

Устройство защиты состоит из быстронасыщающихся трансформаторов тока *TA1–TA3*, трехфазных однополупериодных выпрямителей *UZ1* и *UZ2*, стабилитронов *VD1–VD4*. Выпрямитель *UZ2*, стабилитрон *VD2* и конденсатор *C1* образуют стабилизированный блок питания (БП) с напряжением, достаточным для питания реле *KV* малой мощности. Переменный резистор *RP1* и резистор *R2* образуют делитель напряжения, средняя точка которого соединена с базой транзистора *VT1*. Эти элементы образуют блок контроля последовательности импульсов (БКПИ). Конденсатор *C2* и переменный резистор *RP2* образуют интегрирующий блок (ИБ). Транзистор *VT2* и реле *KV* образуют исполнительный орган (ИО).

Устройство защиты работает следующим образом. В нормальном режиме работы электродвигателя на выходе выпрямителя *UZ1* присутствует постоянная составляющая выпрямленного напряжения, отчего напряжение средней точки делителя положительное и транзистор *VT1* закрыт. Настройка напряжения средней точки

делителя напряжения производится переменным резистором $RP1$ таким образом, чтобы транзистор $VT1$ был закрыт. В этом режиме транзистор $VT2$ также закрыт и реле KV отключено.

При возникновении двухфазного режима работы постоянная составляющая напряжения на выходе выпрямителя $UZ1$ уменьшается до нуля и от выпрямителя $UZ1$ поступает однопериодное выпрямленное напряжение. В средней точке делителя напряжения периодически, с частотой 100 Гц, отрицательное напряжение становится по величине больше положительного напряжения, отчего в эти моменты транзистор $VT1$ открывается, а конденсатор $C2$ заряжается положительным зарядом на нижней обкладке. Далее транзистор $VT1$ начинает периодически, с частотой 100 Гц, открываться и закрываться, а конденсатор $C2$ периодически заряжается и разряжается. При достижении на конденсаторе $C2$ напряжения пробоя стабилитрона $VD4$ транзистор $VT2$ открывается и включается реле KV . Электродвигатель отключается от сети.

В случае возникновения режима заторможенного ротора возрастают токи в питающих электродвигатель проводах, отчего трансформаторы тока $TA1$ – $TA3$ насыщаются. Это приводит к искажению формы кривых выпрямленных напряжений. Вместо синусоидальных кривых появляются остроконечные кривые, отчего постоянная составляющая выпрямленного напряжения уменьшается. В средней точке делителя напряжений периодически возникают отрицательные импульсы напряжения, отчего транзистор $VT1$ периодически, с частотой 150 Гц, начинает закрываться и открываться, вызывая периодический заряд (и разряд) конденсатора $C2$. Далее, как описано выше для двухфазного режима работы, происходит отключение электродвигателя от сети. Задержка времени на отключение регулируется резистором $RP2$ и выбирается большей, чем время пуска электродвигателя с целью отстройки от пусковых токов.

Таким образом, устройство (рисунок 2.28) защищает асинхронный электродвигатель от работы в неполнофазном и стопорном режимах. Однако оно не имеет самоконтроля работы схемы.

На рисунке 2.29 приведена схема устройства аналогичного назначения, отличающаяся тем, что обеспечивает самоконтроль. Устройство защиты построено на базе авторского свидетельства СССР № 1432652 [27]. Работает устройство следующим образом.

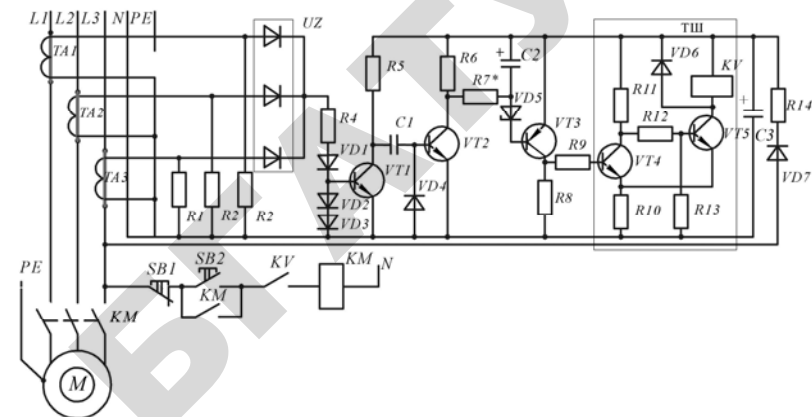


Рис. 2.29. Принципиальная электрическая схема устройства защиты с контролем постоянной составляющей выпрямленного напряжения трансформаторов тока фаз по авторскому свидетельству СССР №1432652

При наличии напряжения в сети и отключенном двигателе транзисторы $VT1$ и $VT2$ закрыты. Транзистор $VT4$ триггера Шмитта закрыт, а транзистор $VT5$ триггера Шмитта открыт. Реле KV включено и получает питание через диод $VD7$ и резистор $R14$.

В нормальном режиме работы электродвигателя на выходе выпрямителя UZ присутствует постоянная составляющая выпрямленного напряжения. Транзистор $VT1$ открыт, а конденсатор $C1$ блока дифференцирования разряжен.

При возникновении двухфазного режима работы постоянная составляющая выпрямленного напряжения на выходе выпрямителя UZ уменьшается до нуля, транзистор $VT1$ начинает периодически, с частотой 100 Гц, открываться и закрываться, а конденсатор $C1$ периодически заряжаться и разряжаться, вызывая периодическое открытие транзистора $VT2$. При этом импульсы напряжения заряжают конденсатор $C2$. При достижении на конденсаторе $C2$ напряжения пробоя стабилитрона $VD5$ открываются транзисторы $VT3$ и $VT4$, а транзистор $VT5$ закрывается. Отключается реле KV и электродвигатель от сети.

В случае возникновения режима заторможенного ротора возрастают токи в питающих электродвигатель проводах, отчего трансформаторы тока $TA1$ – $TA3$ насыщаются. Далее происходят процессы, описанные выше при работе устройства, схема которого представлена на рисунке 2.28, приводящие к отключению электродвигателя от сети.

По своим функциональным возможностям устройства, описанные в п. 2.7, аналогичны устройствам ФУЗ, но имеют меньшие габариты и массу. Разработка устройств этой группы показала, что они могут использоваться в двух-трехкратном диапазоне токов. Для использования одного устройства в широком диапазоне токов применяются усилители-ограничители сигналов датчиков тока [31]. Принципиальная электрическая схема одного такого устройства защиты показана на рисунке 2.30 [32].

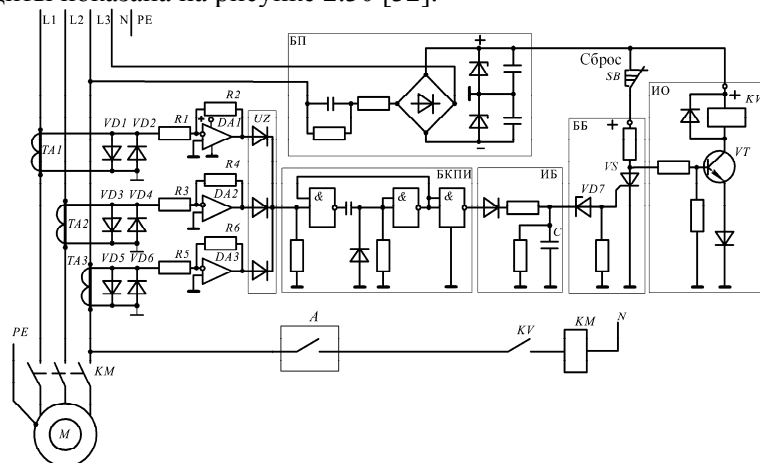


Рисунок 2.30 – Принципиальная электрическая схема устройства защиты с контролем постоянной составляющей выпрямленного напряжения трансформаторов тока фаз по авторскому свидетельству СССР №1390693

Устройство имеет три малогабаритных датчика тока $TA1-TA3$, включенных на диоды $VD1-VD6$ и далее на входы усилителей-ограничителей $DA1-DA3$. Выходы элементов $DA1-DA3$ через диодную сборку UZ связаны с входом блока контроля последовательности импульсов (БКПИ). Выход этого блока связан с входом интегрирующего блока (ИБ), выход которого подан на вход блока блокировки (ББ), а выход последнего связан с входом исполнительного органа (ИО). Питание элементов схемы обеспечивает блок (БП).

При подаче напряжения питания на устройство исполнительный орган (ИО) срабатывает, реле KV включается и контакт реле KV в цепи катушки электромагнитного пускателя замыкается. Электродвигатель может быть включен в сеть при срабатывании технологического датчика A .

При наличии всех фаз сети на выходе блока UZ присутствует постоянная составляющая напряжения. Импульсов напряжения на входе блока БКПИ нет, поэтому на выходе этого блока присутствует логический 0. Такой же сигнал присутствует на выходе интегрирующего блока, отчего тиристор VS закрыт, а транзистор VT открыт и реле KV включено.

При исчезновении одной фазы сети, например фазы $L1$, на выходе усилителя-ограничителя $DA1$ напряжение отсутствует, отчего в напряжении выпрямителя UZ постоянная составляющая напряжения уменьшается до нуля и наблюдаются импульсы напряжений. Они вызывают переключения в блоке БКПИ, отчего на выходе этого блока с частотой 100 Гц возникает напряжение логической 1. Через короткое время на выходе интегрирующего блока ИБ появляется напряжение, достаточное для пробоя стабилитрона $VD7$. Это вызывает открытие тиристора VS и шунтирование входа транзистора VT , в результате транзистор VT закрывается, а реле KV отключается. Электродвигатель тоже отключается от сети. Теперь его нельзя включить в сеть, поскольку тиристор VS остается включенным. После устранения неисправности нажимают кнопку $SB3$ «Сброс». Тиристор VS отключается. Теперь электродвигатель может быть включен в сеть при нажатии кнопки $SB2$.

Снабжение устройства тремя операционными усилителями-ограничителями $DA1-DA3$ позволяет использовать трансформаторные датчики тока малых габаритов и малого уровня сигнала ($< 0,6$ В) в широком диапазоне мощностей защищаемых электродвигателей (от 0,55 кВт до 55 кВт).

Выполнение блока БКПИ в виде формирователя длительности импульсов (ждущего мультивибратора или одновибратора) позволяет обеспечить одинаковую выдержку на отключение независимо от мощности защищаемого электродвигателя.

Включение интегрирующего блока ИБ на выходе блока БКПИ повышает надежность устройства при импульсных помехах, а включение входа исполнительного органа ИО параллельно тиристорному VS блока блокировки ББ обеспечивает контроль неисправности блока питания и невозможность повторного пуска электродвигателя при работе в системах автоматического управления.

Преимущество способа защиты, основанного на контроле постоянной составляющей напряжения трехфазного однополупериодного выпрямителя трансформаторных датчиков тока фаз, состоит в том, что

они надежно работают при обрыве фазы в любом месте по цепи питания электродвигателя. Кроме того, они осуществляют защиту не только от неполнофазного режима, но и от режима заторможенного ротора, если используются быстроснабжающиеся датчики тока.

Недостаток этих устройств защиты электродвигателя состоит в том, что они допускают пуск электродвигателя на заведомо неполнофазную сеть.

2.8. Защита асинхронного трехфазного электродвигателя от работы в неполнофазном режиме с контролем электромагнитных полей рассеяния обмоток статора

Защита от неполнофазного режима с контролем электромагнитных полей рассеяния обмоток статора основана на изменении величины и фазы электромагнитного поля рассеяния обмоток трехфазного электродвигателя при возникновении неполнофазного режима.

На рисунке 2.31, *a* представлена схема двухслойной обмотки трехфазного асинхронного электродвигателя и условно изображены ее поля рассеяния в трехфазном режиме работы. Суммарное электромагнитное поле состоит из электромагнитных полей всех трех фаз и имеет почти постоянную амплитуду.

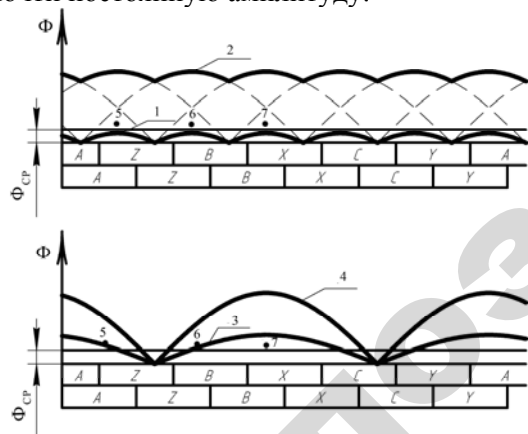


Рисунок 2.31 – Развернутая схема двухслойной обмотки трехфазного асинхронного электродвигателя с полями рассеяния:
1 – при номинальном токе; 2 – при пусковом токе;
3 – в неполнофазном режиме; 4 – в стопорном режиме работы

Амплитуда электромагнитного поля зависит от тока электродвигателя. Линия 1 показывает результирующее электромагнитное поле при номинальном токе, а линия 2 – при пусковом токе электродвигателя.

При неполнофазном режиме, например, при обрыве фазы *A*, токи фаз *B* и *C* образуют пульсирующее электромагнитное поле. При номинальном токе результирующее электромагнитное поле изображено линией 3, а при стопорном режиме – линией 4.

Для выявления неполнофазного режима используют магниточувствительные датчики. В качестве простейшего датчика используют геркон, который размещается возле фазной обмотки, например, в точке 5.

В трехфазном режиме работы электродвигателя геркон не срабатывает, потому что электромагнитное поле обмотки при номинальном токе (линия 1) меньше, чем электромагнитное поле срабатывания геркона $\Phi_{ср}$.

В пусковом или стопорном режиме геркон срабатывает (линия 2 выше линии $\Phi_{ср}$). На геркон действует примерно постоянное по величине электромагнитное поле.

В неполнофазном режиме электромагнитные поля отдельных фаз возрастают и пульсируют, отчего геркон начинает периодически включаться и отключаться. Аналогичное явление происходит при стопорном неполнофазном режиме работы.

Таким образом, изменение параметров электромагнитного поля рассеяния обмотки позволяет контролировать неполнофазный режим работы электродвигателя. Дополнительно можно контролировать стопорный режим.

На рисунке 2.32 приведена принципиальная электрическая схема устройства защиты трехфазного асинхронного электродвигателя с контролем полей рассеяния обмотки статора.

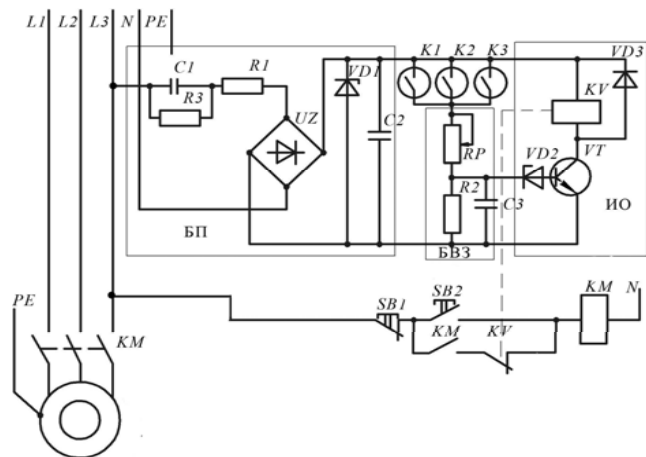


Рисунок 2.32 – Принципиальная электрическая схема устройства защиты с контролем полей рассеяния обмоток статора

Устройство защиты имеет блок питания (БП), блок временной задержки (БВЗ), транзистор VT и выходное реле KV . Три геркона $K1$ – $K3$ размещены в зоне полей рассеяния лобовых частей обмотки по окружности, концентричной валу электродвигателя, через 60° для двухполюсного электродвигателя, через 30° – для четырехполюсного, через 20° – для шестиполюсного и т. д., причем каждый по оси поля рассеяния одной фазы.

Устройство работает следующим образом. В пусковом (или стопорном) режиме все герконы срабатывают, потому что на них действует примерно постоянное по величине электромагнитное поле, большее, чем при номинальном токе (см. рисунок 2.32). Происходит заряд конденсатора $C3$ через резистор RP . За время пуска конденсатор $C3$ не успевает зарядиться до напряжения пробоя стабилитрона $VD2$. Но если электродвигатель не запускается, то конденсатор $C3$ успевает зарядиться до напряжения пробоя стабилитрона $VD2$. После этого откроется транзистор VT и включится реле KV . Произойдет отключение электромагнитного пускателя KM и электродвигателя.

В неполнофазном режиме электромагнитные поля отдельных фаз возрастают и пульсируют, отчего два геркона начинают периодически включаться и отключаться. Происходит заряд конденсато-

ра $C3$ через резистор RP . Через некоторое время конденсатор $C3$ зарядится до напряжения пробоя стабилитрона $VD2$, откроется транзистор VT и включится реле KV . Произойдет отключение электромагнитного пускателя KM и электродвигателя. Задержка времени регулируется резистором RP и выбирается большей, чем время пуска электродвигателя с целью отстройки от пусковых токов.

Таким образом, по своим функциональным возможностям устройство, контролирующее электромагнитное поле рассеяния обмотки статора, аналогично устройству ФУЗ и устройству, контролирующему постоянную составляющую напряжения трехфазного выпрямителя датчиков тока фаз. Устройство надежно работает при обрыве фазы в любом месте по цепи питания электродвигателя. В этом состоит его *преимущество*.

Однако такое устройство требует разборки электродвигателя и размещения датчиков, чувствительных к магнитному полю, внутри электродвигателя, возле лобовых частей обмотки. В этом состоит *недостаток* рассматриваемого способа. Еще один недостаток этих устройств защиты электродвигателя состоит в том, что они допускают пуск электродвигателя на заведомо неполнофазную сеть.

Если используется температурная защита, требующая установки термодетекторов в обмотке электродвигателя, то сочетание ее с рассматриваемой защитой, контролирующей электромагнитные поля рассеяния обмоток статора, может повысить быстродействие температурной защиты в неполнофазных и стопорных режимах работы. Такие решения изложены в [33] и [34].

Использование электромагнитного поля рассеяния обмоток асинхронных электродвигателей для реализации защиты от несимметричных режимов работы описано в [35]. В [36] приведено описание защиты Motor Guard. Она имеет 2 коаксиальные валу асинхронного электродвигателя чувствительные катушки, расположенные с внешних сторон подшипниковых щитов. Составляющая наведенного в катушках напряжения, имеющая частоту, близкую к двухкратной частоте сети, зависит от асимметрии электромагнитных полей рассеяния обмоток электродвигателя. При повреждениях в обмотке, неполнофазном режиме питания асимметрия электромагнитных полей рассеяния обмоток электродвигателя возрастает. Это позволяет обнаружить как витковые замыкания обмотки и неполнофазный режим питания, так и повышенный износ подшипников, приводящий к асимметрии воздушного зазора электродвигателя.

2.9. Обеспечение непрерывности работы асинхронного трехфазного электродвигателя при неполнофазном режиме сети

Технология промышленного производства продукции животноводства и птицеводства предъявляет высокие требования к надежности работы установок. Недостаточная надежность электроснабжения потребителей сельского хозяйства, низкое качество получаемой ими электроэнергии снижает эти показатели. При неполнофазных режимах сети нарушается непрерывная работа установок в связи с отключением электродвигателей аппаратами защиты. Поддержание непрерывной работы, например, вентиляционных установок микроклимата при неполнофазных режимах сети имеет большое значение для хозяйств [37].

Непрерывность работы электродвигателя при неполнофазных режимах сети обеспечивается переводом его в однофазный или двухфазный режимы работы. Для этого в обмотки электродвигателя включаются фазосдвигающие элементы, в качестве которых применяются дроссель совместно с конденсатором (обеспечивается 100 % мощности на валу), или только конденсаторы (обеспечивается 60 % мощности на валу). Можно не использовать фазосдвигающие элементы, если включать электродвигатель по схеме «неполной звезды с нулем». При этом обеспечивается 58 % номинальной мощности на валу. Рабочие характеристики асинхронных электродвигателей, включенных по схеме «неполной звезды с нулем» и трехфазных, включенных в однофазную сеть с рабочей емкостью, практически совпадают [38].

Рассмотрим схему, приведенную на рисунке 2.33 [37].

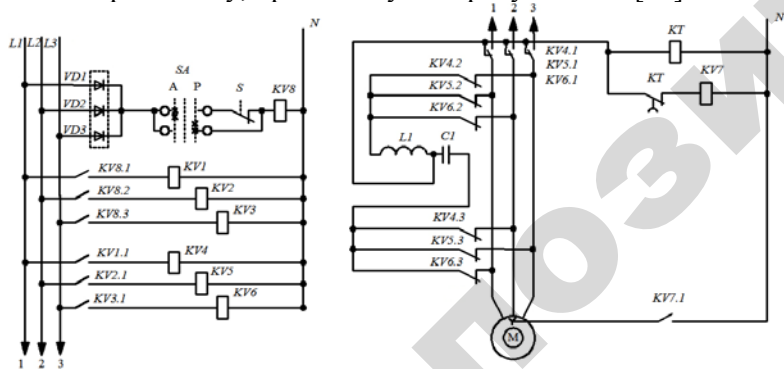


Рисунок 2.33 – Принципиальная электрическая схема устройства защиты на базе контроля напряжения фаз, обеспечивающего непрерывный режим работы асинхронного электродвигателя при неполнофазном режиме сети

Устройство содержит три реле напряжения $KV1-KV3$, выпрямитель, выполненный на диодах $VD1-VD3$, переключатель режима работы SA , датчик S (уровня, давления или температуры), промежуточное реле $KV8$, три электромагнитных реле $KV4-KV6$, реле времени KT и блок фазосдвигающих элементов, состоящий из конденсатора C и дросселя L . Общая точка звезды статорной обмотки двигателя подключена к нулевому проводу сети через замыкающий контакт $KV7.1$ электромагнитного реле $KV7$.

При полнофазном режиме сети порядок включения электродвигателя определяется положением переключателя SA . В режиме автоматического управления промежуточное реле $KV8$ включается или отключается в зависимости от положения контактов датчика S . При замыкании контакта датчика реле $KV8$ срабатывает, его контакты $KV8.1$, $KV8.2$, $KV8.3$ замыкаются и получают питание реле напряжения $KV1-KV3$. Через контакты $KV1.1$, $KV2.1$, $KV3.1$ срабатывают электромагнитные реле $KV4-KV6$, их переключающие контакты подсоединяют фазы двигателя к фазам сети. Электродвигатель нормально запускается и работает.

Теперь допустим, что напряжение в фазе $L1$ исчезло. Реле $KV1$ размыкает свой контакт $KV1.1$ в цепи электромагнитного реле $KV4$, последнее обесточивается и контактом $KV4.1$ подключает фазу $L1$ электродвигателя к общей точке фазосдвигающих элементов. Через замыкающие контакты $KV4.2$ и $KV4.3$ свободный вывод дросселя подключается к фазе $L3$, а от конденсатора – к фазе $L2$. При этом фаза $L1$ получает энергию от фазы $L3$ через дроссель, а от фазы $L2$ – через конденсатор.

При пусках или переключениях с уже работающим электродвигателем подключаются реле времени KT и электромагнитное реле $KV7$. Реле $KV7$ своим контактом $KV7.1$ подключает общую точку звезды фаз статорной обмотки к нулевому проводу сети. Увеличивается пусковой момент электродвигателя и улучшаются условия пуска. Реле времени KT через несколько секунд размыкает свой контакт в цепи электромагнитного реле $KV7$, оно обесточивается, контакт $KV7.1$ размыкается, что снижает искажение синусоиды тока восстановленной фазы электродвигателя [37].

При пуске двигателя с оборванной фазой сети (например, фазой $L1$) реле напряжения $KV1$ не срабатывает. Его контакт $KV1.1$ остается разомкнутым, а контакты электромагнитного реле $KV4$ в прежнем положении. Далее устройство работает так же, как и при асимметрии напряжения.

Известно много устройств, предназначенных для обеспечения непрерывной работы трехфазных асинхронных электродвигателей при

неполнофазном режиме сети. Например, в [39] описано устройство, подключающее конденсаторы для обеспечения работы электродвигателя в неполнофазном режиме сети. При работе электродвигателя и исчезновении напряжения в одной фазе обесточивается соответствующее токовое реле и электродвигатель подключается по схеме с рабочей емкостью в исчезнувшей фазе.

Наиболее простое схемное решение получается, если включать электродвигатель по схеме «неполной звезды с нулем» [40]. В этом случае при пропадании фазы *C* трехфазное реле напряжения размыкает свой контакт, напряжение фаз *A* и *B* прикладывается к двум фазным обмоткам двигателя, а средняя точка звезды статорной обмотки электродвигателя присоединяется к нулю источника питания, и электродвигатель продолжает работу.

На рисунке 2.34 представлена принципиальная электрическая схема устройства, разработанного в лаборатории автоматической защиты электрооборудования в БГАТУ. Устройство содержит блок контроля токов фаз (БКТФ), описанный в пояснениях к рисунку 2.21.

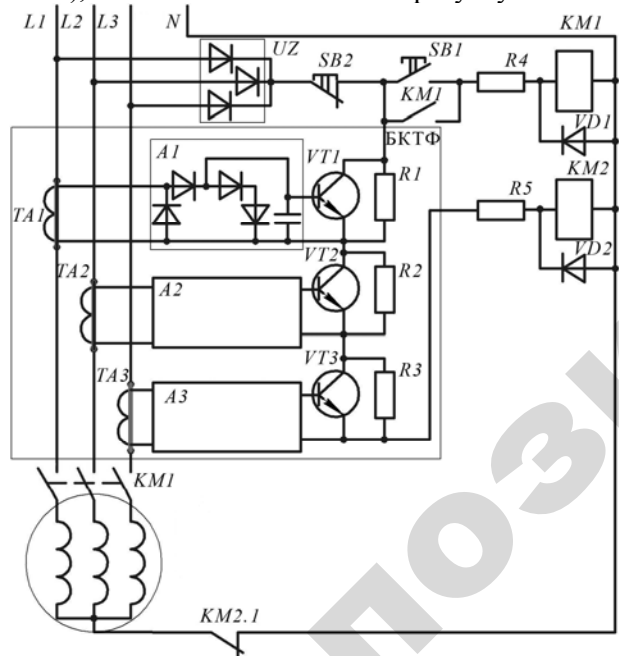


Рисунок 2.34 – Принципиальная электрическая схема устройства защиты на базе реле контроля токов фаз, обеспечивающего непрерывный режим работы асинхронного электродвигателя при неполнофазном режиме сети

В трехфазном режиме работы транзисторы *VT1–VT3* открыты и электромагнитный пускатель *KM2* включен. Его контакт *KM2.1* разомкнут.

При возникновении неполнофазного режима в сети исчезнет ток в одной из фаз, один из транзисторов *VT1–VT3* закроется, электромагнитный пускатель *KM2* отключится. Его контакт *KM2.1* замкнется и соединит нулевую точку обмотки электродвигателя с нулем сети. Электродвигатель продолжит работу. При появлении трехфазного режима электромагнитный пускатель *KM2* включится и его контакт *KM2.1* разомкнется.

В системе заземления электрической сети TN-S (нулевой рабочий и нулевой защитный проводники разведены, корпус электродвигателя соединяется с РЕ-проводником) рекомендуется нулевой рабочий проводник соединять с общей точкой обмоток фаз, включенных звездой (рисунок 2.34, но без контакта *KM2.1*). При возникновении неполнофазного режима электродвигатель оказывается включенным по схеме неполной звезды с нулем и продолжает работать (возможно, с перегрузкой). Его режим работы в этом случае более благоприятный, чем в схеме звезда (без нулевого проводника) [40]. Непрерывный режим работы асинхронного электродвигателя при неполнофазном режиме сети обеспечивается автоматически (без использования специальной схемы рисунка 2.34).

Устройства защиты асинхронных электродвигателей, описанные в п. 2.9, целесообразно применять на насосных и вентиляционных установках, т. е. там, где нарушение работы электродвигателей приводит к большим технологическим ущербам.

2.10. Защита асинхронного трехфазного электродвигателя от работы при недопустимом отклонении и асимметрии напряжений

Отклонением напряжения δU от номинального значения называется, относительная разность действительного U и номинального $U_{ном}$ значения напряжений:

$$\delta U = \frac{U - U_{ном}}{U_{ном}} \cdot 100\% \quad (2.12)$$

Номинальным допустимым считается отклонение напряжения $\pm 5\%$.

Большие отклонения напряжения приводят к существенному ухудшению характеристик нагруженного электродвигателя. В частности, увеличиваются скольжение ротора и потери в нем. При изменении напряжения изменяется и ток электродвигателя: его реактивная составляющая приблизительно пропорциональна напряжению, а активная составляющая – обратно пропорциональна ему. В результате ток статора электродвигателя увеличивается. Он вычисляется по следующей формуле [11]:

$$i = \sqrt{i_0^2 u^8 + (1 - i_0^2) \left(\frac{m}{u}\right)^2}, \quad (2.13)$$

где i – относительный ток статора, $i = I / I_n$;

i_0 – относительный ток холостого хода, $i_0 = I_0 / I_n$;

u – относительное напряжение, $u = U / U_n$;

m – относительный момент нагрузки, $m = M / M_n$.

По формуле (2.13) построены кривые для электродвигателей, имеющих значения $i_0 = 0,3$ (быстроходные или большой мощности) и $i_0 = 0,5$ (малой мощности или тихоходные) при нагрузках на валу $0,5P_n$ и P_n (рисунок 2.35).

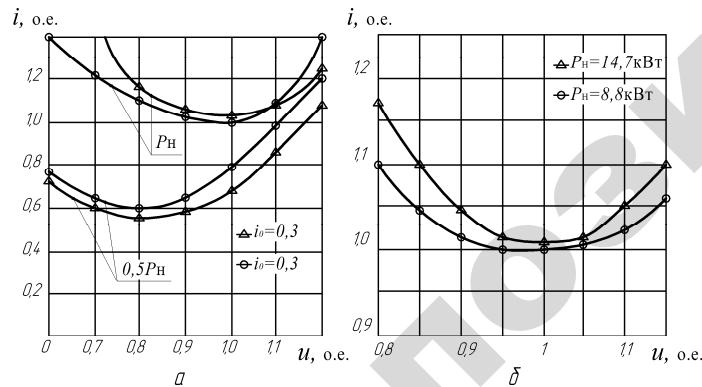


Рисунок 2.35 – Изменение относительного тока статора асинхронного электродвигателя при изменении напряжения и различных токах холостого хода и нагрузках (а), экспериментальные данные для погружных электродвигателей (б)

Из рисунка 2.35, а следует, что при номинальной мощности на валу отклонение напряжения приводит всегда к току больше номинального значения, следовательно, к опасному перегреву обмоток электродвигателя.

При мощности $0,5P_n$ ток меньше номинального значения, следовательно, он не опасен с точки зрения перегрева электродвигателя.

На рисунке 2.35, б представлены экспериментальные данные, подтверждающие вывод о возрастании тока при отклонении напряжения на зажимах электродвигателей.

Таким образом, отключать асинхронный электродвигатель при отклонении напряжения выше допустимого значения требуется только в том случае, если его ток превысит номинальное значение. Устройство защиты должно контролировать ток электродвигателя. Эту функцию выполняет защита электродвигателя от перегрузки (токовая, температурная, тепловая).

Система напряжений в трехфазной сети никогда не бывает идеально симметричной. Причина асимметрии напряжений – неравномерное распределение однофазной нагрузки по фазам.

Известно, что асимметричную трехфазную систему напряжений, подводимых к асинхронному электродвигателю, можно разложить на три симметричные системы напряжений:

- 1) прямой последовательности U_1 ;
- 2) обратной последовательности U_2 ;
- 3) нулевой последовательности U_0 .

Коэффициент обратной последовательности системы напряжений определяется по формуле:

$$K_{2u} = \frac{U_2}{U_1}. \quad (2.14)$$

Действующими нормами (ГОСТ 13109–97) допускается иметь коэффициент обратной последовательности системы напряжений не более 2%, максимальное его значение – не более 4%.

В асинхронном электродвигателе системе напряжений U_1 прямой последовательности соответствует симметричная система то-

ков I_1 прямой последовательности, прямое вращающееся электромагнитное поле и прямой (двигательный) момент M_1 на валу.

Система напряжений U_2 обратной последовательности приводит к возникновению токов I_2 обратной последовательности в цепях машины, обратного кругового электромагнитного поля в ее магнитной системе и обратного (тормозного) момента M_2 на валу. При этом следует иметь в виду, что скольжение ротора в обратном электромагнитном поле равно $S_2 = 2 - S$, где S – скольжение ротора в прямом электромагнитном поле двигательного режима работы.

Применим формулу (1.1) к прямому и обратному моментам, а потом найдем отношение этих моментов. Получим следующее выражение [11]:

$$\frac{M_2}{M_1} = \frac{S/S_k + S_k/S + E}{(2-S)/S_k + S_k/(2-S) + E} \cdot K_{2u}^2. \quad (2.15)$$

Пусковой момент (скольжение $S = 1$) примет вид:

$$\frac{M_{2п}}{M_{1п}} = K_{2u}^2. \quad (2.16)$$

Результирующий пусковой момент равен:

$$M_{п} = M_{1п} - M_{2п} = M_{1п}(1 - K_{2u}^2) = M_{сн}(1 - K_{2u}^2), \quad (2.17)$$

где $M_{сн}$ – пусковой момент при номинальной симметричной системе напряжений; $M_{сн} \approx M_{1п}$.

Уравнение (2.16) позволяет оценить влияние обратной последовательности на пусковой момент. Примем $K_{2u} = 0,1$ (что в 2,5 раза больше допустимого значения), тогда $K_{2u}^2 = 0,01$ и $M_{п} \approx M_{сн}$.

Таким образом, обратный момент, обусловленный наличием симметричной составляющей обратной последовательности напряжений, практически не оказывает влияния на пусковой момент электродвигателя.

Исследование влияния асимметрии напряжений на номинальный момент электродвигателя показало, что в этом случае отношение моментов равно [11]:

$$\frac{M_2}{M_1} \approx 2S_k K_{2u}^2, \quad (2.18)$$

а результирующий момент электродвигателя равен:

$$M = M_1 - M_2 \approx M_1(1 - 2S_k K_{2u}^2) \approx M_c(1 - 2S_k K_{2u}^2), \quad (2.19)$$

где M_c – момент сопротивлений на валу электродвигателя, Н·м.

При коэффициенте обратной последовательности $K_{2u} = 0,1$ (что в 2,5 раза превышает норму) и $S_k = 0,3$ уменьшение момента сопротивлений на валу по сравнению с симметричным режимом составит около 0,6 %.

Таким образом, влияние асимметрии напряжений на номинальный момент электродвигателя незначительное, им можно пренебречь.

При асимметрии напряжений ток в фазах асинхронного электродвигателя содержит симметричные составляющие прямой и обратной последовательности:

$$\dot{I} = \dot{I}_1 + \dot{I}_2. \quad (2.20)$$

Коэффициент асимметрии токов можно записать в виде:

$$K_{2i} = \frac{\dot{I}_2}{\dot{I}_1} = \frac{U_2/Z_2}{U_1/Z_1}, \quad (2.21)$$

где Z_1, Z_2 – полное сопротивление прямой и обратной последовательностей машины.

Напряжение U_2 с учетом (2.14) запишется в виде:

$$U_2 = K_{2u} U_1 \approx K_{2u} U_{н}. \quad (2.22)$$

При угловых скоростях вала электродвигателя, близких к номинальному значению, можно считать, что

$$\frac{U_1}{Z_1} \approx \frac{U_n}{Z_n} = I_n, \quad (2.23)$$

где Z_n – полное сопротивление фазы двигателя в номинальном симметричном режиме.

Примем, что намагничивающий ток равен нулю и что $S \ll 2$ при работе машины в диапазоне нагрузок от холостого хода до номинальной нагрузки. Тогда с достаточной для практических расчетов точностью можно считать, что сопротивление обратной последовательности равно сопротивлению короткого замыкания, т. е. $Z_2 \approx Z_k \approx Z_n$, а пусковой ток $I_n = U_n / Z_n$.

С учетом (2.22) и принятых допущений уравнение (2.21) запишется в виде:

$$K_{2i} = \frac{I_2}{I_1} \approx \frac{K_{2u} U_n}{I_n Z_k} \approx \frac{K_{2u} I_n}{I_n} = K_{2u} K_i, \quad (2.24)$$

где K_i – кратность пускового тока; $K_i = 4-7,5$ для асинхронного электродвигателя с короткозамкнутым ротором.

Следовательно, асимметрия токов в фазах АД в 4–7,5 раз превышает асимметрию подведенных к ней напряжений. По этой причине следует контролировать устройством защиты не напряжения в сети, а токи электродвигателя и их асимметрию.

По уравнению (2.24) можно установить предельную величину токов асимметрии электродвигателя, которая зависит от кратности пускового тока K_i . Например, для защищаемого электродвигателя АИР90L4У1 мощностью 2,2 кВт кратность пускового тока $K_i = 6,5$. При допустимой величине предельной асимметрии напряжений в сети $K_{2u} = 4\%$ получим асимметрию токов $K_{2i\max} \leq 0,04 \cdot 6,5 = 0,26$ или 26 %.

Наиболее неблагоприятный случай асимметрии наблюдается, когда в одной из фаз ток имеет наибольшее значение (при данной

асимметрии напряжений), равное арифметической сумме токов прямой и обратной последовательностей [11]:

$$I_A = I_1 + I_2 = I_1(1 + K_{2u} K_i). \quad (2.25)$$

Токи в двух других фазах будут одинаковые:

$$I_B = I_C = I_1 \sqrt{1 - K_{2u} K_i + K_{2u}^2 K_i^2}. \quad (2.26)$$

Если подставить в (2.25) и (2.26) значения $K_{2u} = 0,1$ и $K_i = 7,5$,

то будем иметь: $I_A = 1,75 I_n$; $I_B = I_C = 0,90 I_n$. Следовательно, в фазе А будет наблюдаться значительная перегрузка по току.

Уравнения (2.25) и (2.26) соответствуют самому неблагоприятному стечению обстоятельств. Однако при любой асимметрии напряжений ток, по крайней мере, в одной фазе статорной обмотки больше его составляющей прямой последовательности. Наблюдается перегрев обмотки этой фазы.

Таким образом, асимметрия напряжений приводит к еще большей по величине асимметрии токов и перегреву одной фазной обмотки. Асимметрию напряжений необходимо контролировать по асимметрии токов с помощью токовой защиты или использовать температурную защиту.

Необходимо помнить, что асимметрия напряжений вызывает дополнительную вибрацию электродвигателя, вследствие чего сокращается срок его службы. Поэтому ее действие должно быть ограничено. С помощью токовой защиты электродвигатель может быть отключен с некоторой задержкой, как только появится предельное значение асимметрии токов.

Температурная защита отключит только при достижении определенной температуры, также обеспечивая некоторую задержку. Эти особенности надо учитывать при выборе вида защиты электродвигателя от асимметрии напряжений.

2.11. Контрольные вопросы

1. Какие возможные случаи явного неполнофазного режима работы асинхронного электродвигателя знаете?
2. Что такое напряжение смещения?

3. Как изменяется напряжение смещения от скольжения ротора асинхронного электродвигателя?

4. Какие семь параметров электродвигателя используются для контроля неполнофазного режима?

5. Нарисуйте принципиальную электрическую схему защиты асинхронного электродвигателя от работы в неполнофазном режиме с контролем напряжения сети, объясните ее работу и укажите недостатки.

6. Нарисуйте принципиальную электрическую схему защиты асинхронного электродвигателя от работы в неполнофазном режиме с контролем напряжения нулевой последовательности при наличии нулевой точки обмотки электродвигателя, объясните принципы ее работы и укажите недостатки.

7. Нарисуйте принципиальную электрическую схему защиты асинхронного электродвигателя от работы в неполнофазном режиме с контролем напряжения нулевой последовательности при отсутствии нулевой точки обмотки электродвигателя, объясните принципы ее работы и укажите недостатки.

8. Нарисуйте принципиальную электрическую схему фильтра напряжений обратной последовательности.

9. Нарисуйте принципиальную электрическую схему устройства защиты E511, объясните принципы ее работы и укажите недостатки.

10. Объясните работу схемы, приведенной на рисунке 2.11.

11. То же, приведенных на рисунках 2.13, 2.17, 2.18, 2.19, 2.20, 2.21, 2.24, 2.26, 2.27, 2.28, 2.29, 2.31, 2.34, 2.35.

12. Как обеспечивается непрерывность работы асинхронного трехфазного электродвигателя при неполнофазном режиме сети?

13. Во сколько раз асимметрия токов в фазах асинхронного электродвигателя превышает асимметрию подведенных к ней напряжений?

14. Как изменяется ток электродвигателя в зависимости от величины подводимого напряжения?

15. Что больше, асимметрия токов или асимметрия напряжений?

16. Как можно контролировать асимметрию токов?

Глава 3. ЗАЩИТА АСИНХРОННЫХ ТРЕХФАЗНЫХ ЭЛЕКТРОДВИГАТЕЛЕЙ ПРИ ТЕХНОЛОГИЧЕСКОЙ ПЕРЕГРУЗКЕ

3.1. Изменение параметров асинхронного трехфазного электродвигателя при технологической перегрузке

Под технологической перегрузкой асинхронного электродвигателя понимается возрастание мощности или момента на валу выше номинальных значений. Обычно технологическая перегрузка вызвана возрастанием момента сопротивления M_c рабочей машины (основного возмущения по данным п. 1.7).

При перегрузке выходные параметры изменяются следующим образом (рисунок 3.1):

- 1) момент электродвигателя $M_{дв}$ увеличивается;
- 2) частота вращения ротора уменьшается или скольжение ротора увеличивается;
- 3) потребляемая мощность P_1 увеличивается;
- 4) потребляемый ток I_1 увеличивается;
- 5) коэффициент мощности $\cos\phi_1$ или увеличивается, или уменьшается, или не изменяется;
- 6) коэффициент полезного действия η_1 уменьшается;
- 7) увеличиваются потери ΔP и возрастает количество выделяемого в электродвигателе тепла Q ;
- 8) температура обмотки θ увеличивается;
- 9) электромагнитная индукция $B_{рас}$ электромагнитных полей рассеяния $\Phi_{рас. обм}$ лобовых частей обмотки увеличивается.

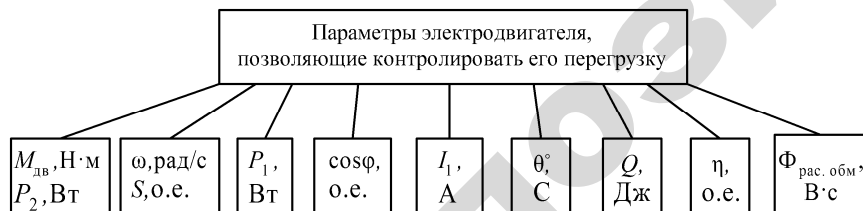


Рисунок 3.1 – Параметры электродвигателя, позволяющие контролировать его перегрузку

Входные параметры считаются постоянными величинами: напряжение $U = U_{ном} = const$; частота тока $f_1 = 50 Гц = const$; число фаз $m = 3$; прямое чередование фаз m_{ABC} ; отклонение напряжения ΔU и асимметрии напряжения δU равны нулю ($\Delta U = 0$; $\delta U = 0$).

Контролировать момент электродвигателя $M_{дв}$ или мощность на валу P_2 можно, используя датчики момента и мощности, устанавливаемые между валами электродвигателя и рабочей машины. Такой контроль имеет большие трудности в реализации из-за сложности датчиков момента (мощности), их дороговизны и необходимости устанавливать их между валами. В частности, для защиты от предельной перегрузки, стопорного режима (неподвижный ротор при включенном в сеть статоре) используются различные по конструкции предохранительные муфты предельного значения. В целом, контроль момента или мощности на валу электродвигателя для защиты от перегрузки практически не используется.

Контроль скорости ω_2 на валу электродвигателя или скольжения ротора также требует установки соответствующих датчиков скорости или скольжения на валу электродвигателя. Монтаж этих датчиков и проводников их связи со шкафом управления значительно усложняет задачу, поэтому эти параметры для защиты не используются. Однако там, где датчик скорости используется для контроля скорости вращения вала, можно использовать его и для защиты электродвигателя. Известно использование этого параметра для контроля стопорного режима, который можно считать предельным случаем перегрузки [41].

Потребляемая из сети мощность P_1 успешно может быть использована для защиты АД от перегрузки, поскольку она пропорциональна мощности на валу. Особенно эффективно применять контроль потребляемой мощности для электродвигателей малой мощности, имеющих малое изменение тока при возрастании нагрузки. Этот же параметр можно использовать для электродвигателей малой синхронной частоты вращения, у которых коэффициент мощности претерпевает значительные изменения, а ток изменяется незначительно. Этот способ не получил должного применения. В связи с появлением интегральных микросхем типа АД7755 или КР1095ПП1 для электронных счетчиков электроэнергии, или самих электронных счетчиков электроэнергии, имеющих цифровой выход мгновенной мощности, возникла возможность построения устройств защиты от перегрузки с контролем потребляемой мощности. Однако такие устройства защиты не получили распространения.

Коэффициент мощности $\cos \varphi$ при перегрузке для разных электродвигателей изменяется неоднозначно. Для электродвигателей с низкой синхронной частотой вращения или двигателей малой мощности он может возрастать при перегрузке, для других электродвигателей он может не изменяться или даже уменьшаться. Такая неопределенность не позволяет рекомендовать этот параметр для контроля перегрузки электродвигателей в широком диапазоне мощностей. Если для электродвигателя $\cos \varphi$ при перегрузке возрастает, то параметр $\cos \varphi$ может быть использован для построения аппарата защиты.

Ток I_1 , потребляемый электродвигателем, является главным источником потерь в электродвигателе и причиной его нагрева. Этот параметр широко используется для построения устройств защиты, которые называются токовыми устройствами защиты.

Температура обмотки электродвигателя θ (или его частей) также широко используется для контроля перегрузки электродвигателя. Температура обмотки вторична по отношению к току. В то же время температура обмотки зависит не только от тока, но и от потерь в стали, роторе, подшипниках, а также от условий охлаждения электродвигателя. Наконец, температура является тем параметром, который ограничивает мощность электродвигателя, т. е. играет главную роль в определении его долговечности. Этот параметр наиболее подходит для построения устройств защиты электродвигателя в широком диапазоне мощностей. Устройства защиты, контролирующие температуру, получили название температурных защит.

Тепло, выделенное в обмотке от протекающего тока ($Q = \Delta Pt = I^2 R_{\text{обм}} t$) изменяется пропорционально выделенному теплу на нагревателе электротеплового биметаллического токового реле ($Q = I^2 R_{\text{наг}} t$), включенного последовательно с обмоткой электродвигателя. Следовательно, контролируя тепло от нагревателя электротеплового реле, можно косвенно контролировать тепло, выделенное в обмотке электродвигателя. Устройства защиты, контролирующие нагрев электротеплового токового реле, получили название тепловой защиты электродвигателя.

КПД двигателя как параметр защиты может быть использован для контроля перегрузки только при применении микропроцессора в устройстве защиты. КПД определяется расчетным путем через потери мощности электродвигателя с учетом многих коэффициентов для конкретных (обычно мощных) электродвигателей. Из-за сложности реализации этот параметр не применяется в аппаратах защиты, используемых в сельском хозяйстве.

Контроль электромагнитной индукции $B_{\text{рас}}$ электромагнитных полей рассеяния $\Phi_{\text{рас. обм}}$ электродвигателя осуществляется установкой детекторов электромагнитного поля возле обмоток электродвигателя. Электромагнитное поле рассеяния пропорционально току электродвигателя, поэтому при перегрузке оно возрастает. Однако этот параметр в устройствах защиты электродвигателей используется очень редко в связи с необходимостью установки детекторов электромагнитного поля внутри электродвигателей и прокладки проводников от них до шкафа управления. За рубежом известны устройства фирмы *Adwell* (Великобритания), построенные на использовании полей рассеяния обмоток [42]. Аналогичная защита описана в [36].

Следовательно, для защиты электродвигателя при перегрузке могут использоваться следующие параметры:

- 1) потребляемая мощность;
- 2) ток;
- 3) температура;
- 4) коэффициент мощности;
- 5) потери мощности или количество выделенного в обмотке тепла.

Проведем анализ изменения этих параметров при переходе электродвигателя с номинальной нагрузки к перегрузке 25 %, используя приведенные в [5] технические данные электродвигателей серии 4А при этих нагрузках.

Анализ изменения потребляемой мощности P_1 . При номинальном моменте на валу электродвигатель потребляет из сети мощность $P_{1н}$. Она определяется по формуле

$$P_{1н} = \frac{P_n}{\eta_n}, \quad (3.1)$$

где P_n – номинальная (на валу) мощность электродвигателя, кВт;
 η_n – коэффициент полезного действия (КПД) при номинальной нагрузке, о.е.

По аналогичной формуле определяется потребляемая мощность при перегрузке 25 %, т. е. при нагрузке на валу $P_2 = 1,25P_n$. В этом случае:

$$P_{1,25} = \frac{1,25P_n}{\eta_{1,25}}, \quad (3.2)$$

где $\eta_{1,25}$ – КПД при нагрузке $1,25P_n$, о.е.

Следовательно, изменение потребляемой мощности при перегрузке в процентах к мощности при номинальной нагрузке определяется по выражению:

$$P^* = \frac{P_{1,25} - P_n}{P_n} \cdot 100 \% .$$

После преобразований получим:

$$P^* = \frac{1,25\eta_n - \eta_{1,25}}{\eta_{1,25}} \cdot 100 \% . \quad (3.3)$$

Анализ изменения потребляемого тока I_1 . При номинальной нагрузке на валу электродвигатель потребляет номинальный ток, который определяется по формуле

$$I_{1n} = \frac{P_n}{\sqrt{3}U_n \cos\varphi_n \eta_n} . \quad (3.4)$$

При перегрузке $1,25P_n$ ток определяется по формуле

$$I_{1,25} = \frac{1,25P_n}{\sqrt{3}U_n \cos\varphi_{1,25} \eta_{1,25}} . \quad (3.5)$$

Относительное изменение тока при перегрузке в процентах к номинальному току определяется по выражению:

$$I_1^* = \frac{I_{1,25} - I_{1n}}{I_{1n}} \cdot 100 \% . \text{ После преобразований получим:}$$

$$I_1^* = \frac{(1,25 \cos\varphi_n \eta_n - \cos\varphi_{1,25})}{\cos\varphi_{1,25} \eta_{1,25}} \cdot 100 \% . \quad (3.6)$$

Анализ изменения коэффициента мощности $\cos\varphi$. При номинальном моменте на валу коэффициент мощности равен $\cos\varphi_n$. При перегрузке $1,25P_n$ коэффициент мощности равен $\cos\varphi_{1,25}$.

Численное изменение $\cos\varphi$ в процентах к номинальному значению определяется по выражению:

$$\cos\varphi^* = \frac{\cos\varphi_{1,25} - \cos\varphi_n}{\cos\varphi_n} \cdot 100 \% . \quad (3.7)$$

Анализ изменения температуры. Будем считать, что теплоотдача при перегрузке не изменяется по сравнению с номинальным режимом. При номинальной мощности на валу температура перегрева обмоток электродвигателя равна $\tau_{\text{раб}}$. При перегрузке температура повышается. Обозначим температуру перегрева обмоток при перегрузке мощностью $1,25P_n$ через $\tau_{1,25}$. Тогда в относительных единицах изменение температуры превышения составит:

$$\tau^* = \frac{\tau_{1,25} - \tau_{\text{уст.н}}}{\tau_{\text{уст.н}}} \cdot 100 \% = \frac{\frac{1,25P_n(1-\eta_{1,25})}{A_n \eta_{1,25}} - \frac{P_n(1-\eta_n)}{A_n \eta_n}}{\frac{P_n(1-\eta_n)}{A_n \eta_n}} \cdot 100 \% , \quad (3.8)$$

где A_n – номинальная теплоотдача электродвигателя, Вт/°С.

В этом уравнении установившаяся температура определяется по выражению:

$$\tau_{\text{уст}} = \frac{\Delta P}{A_n} , \quad (3.9)$$

где ΔP – потери в электродвигателе, Вт.

В номинальном режиме потери равны:

$$\Delta P_n = P_n \left(\frac{1-\eta_n}{\eta_n} \right) . \quad (3.10)$$

При нагрузке $1,25P_n$ потери равны:

$$\Delta P_{1,25} = 1,25P_n \left(\frac{1-\eta_{1,25}}{\eta_{1,25}} \right) . \quad (3.11)$$

Следовательно:

$$\tau_{\text{уст.н}} = \frac{P_n \left(\frac{1-\eta_n}{\eta_n} \right)}{A_n} ; \quad \tau_{1,25} = \frac{1,25P_n \left(\frac{1-\eta_{1,25}}{\eta_{1,25}} \right)}{A_n} . \quad (3.12)$$

Решая уравнение (3.8), получим:

$$\tau^* = \frac{1,25\eta_n - \eta_{1,25} - 0,25\eta_n\eta_{1,25}}{(1 - \eta_n)\eta_{1,25}} \cdot 100 \% . \quad (3.13)$$

Анализ изменения потерь мощности. Потери мощности при номинальной нагрузке равны ΔP_n и определяются по уравнению (3.10).

При перегрузке $1,25P_n$ потери определяются по уравнению (3.11). Относительное изменение потерь составит:

$$\Delta P^* = \left(\frac{\Delta P_{1,25} - \Delta P_n}{\Delta P_n} \right) \cdot 100 \% . \quad (3.14)$$

После преобразований получим:

$$\Delta P = \frac{1,25\eta_n - \eta_{1,25} - 0,25\eta_n\eta_{1,25}}{(1 - \eta_n)\eta_{1,25}} \cdot 100 \% . \quad (3.15)$$

В качестве примера на рисунке 3.2 приведены результаты расчетов изменения P_1^* , I_1^* , $\cos\varphi^*$, τ^* для электродвигателей серии 4А [43].

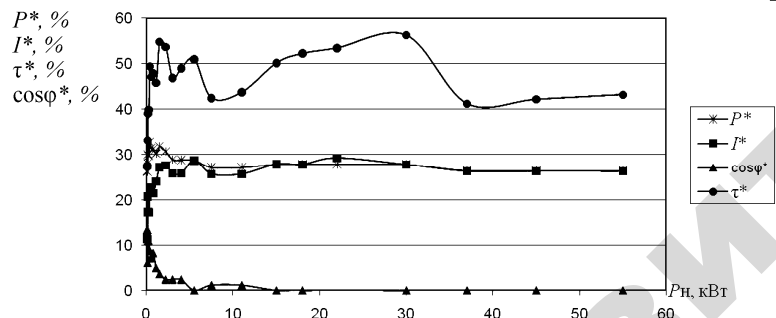


Рисунок 3.2 – Относительное изменение параметров электродвигателей основного исполнения (до 55 кВт при синхронной частоте вращения 1500 мин⁻¹) при перегрузке 25 % в зависимости от номинальной мощности электродвигателей

Анализ полученных результатов позволяет сделать следующие выводы:

1. Наибольшее процентное изменение при перегрузке 25 % для всех частот вращения и мощностей имеет параметр τ^* (температура).
2. Наименьшее процентное изменение при перегрузке 25 % для всех частот вращения и мощностей имеет параметр $\cos\varphi^*$, причем этот па-

раметр приемлем только для электродвигателей малой мощности (от 0,06 до 4 кВт). При больших мощностях этот параметр не используется из-за нулевых или отрицательных значений его приращения.

3. Если сравнивать изменение параметров P_1^* и I_1^* при перегрузке 25 %, то для всех синхронных частот вращения вначале (до мощности 5,5 кВт) лидирует P_1^* , а при больших номинальных мощностях имеется примерно одинаковое изменение P_1^* и I_1^* .

4. В сельскохозяйственном производстве 75 % всех электродвигателей имеют мощность до 5 кВт [2]. Следовательно, в электроприводах сельскохозяйственного назначения контроль перегрузки наиболее целесообразно выполнять по температуре (она имеет наибольшее процентное изменение), затем – по потребляемой мощности или току.

3.2. Перегрузочная характеристика асинхронного электродвигателя и защитная характеристика устройства защиты электродвигателя от перегрузки по току

Перегрузочной характеристикой электродвигателя называется зависимость допустимого времени существования перегрузки от тока

$t_{доп} = f(I_{пер})$. Имеется в виду, что за допустимое время перегрузки происходит допустимый нагрев обмотки электродвигателя. Обычно вместо тока перегрузки записывают кратность тока перегрузки по току $k_{пер} = I_1/I_{ном}$. Тогда перегрузочную характеристику электродвигателя можно записать в виде $t_{доп} = f(k_{пер})$.

Под защитной характеристикой устройства защиты понимается зависимость времени срабатывания защитного устройства от тока перегрузки, т. е. зависимость $t_{ср} = f(I_{пер})$ или $t_{ср} = f(k_{пер})$.

Следовательно, защитная характеристика устройства защиты $t_{ср} = f(k_{пер})$ должна проходить на графике ниже перегрузочной характеристики электродвигателя $t_{доп} = f(k_{пер})$ или соответствовать перегрузочной характеристике электродвигателя, т. е. должно выполняться условие $t_{ср} \leq t_{доп}$. Отсюда следует, что для защиты электродвигателя от перегрузки важно знать перегрузочную характеристику защищаемого электродвигателя.

Известны две методики определения перегрузочной характеристики асинхронного электродвигателя.

В первой методике рассчитывается износ изоляции обмотки при заданной кратности тока перегрузки и известном числе перегрузок в году за срок службы электродвигателя.

Р. М. Славин в [19] использует метод расчета, основанный на зависимости срока службы изоляции от температуры. Расчетная формула имеет вид:

$$D = B \cdot e^{-k\theta}, \quad (3.16)$$

где D , B – текущий и начальный срок службы изоляции (лет, месяцев, дней, часов, секунд);

k – коэффициент; $k = 0,088 \text{ } ^\circ\text{C}^{-1}$ – для класса нагревостойкости изоляции A , $k = 0,069 \text{ } ^\circ\text{C}^{-1}$ – для класса нагревостойкости изоляции B ;

θ – длительно действующая температура нагрева изоляции, $^\circ\text{C}$.

Обозначим длительно действующую рекомендуемую температуру нагрева изоляции θ_p . Соответствующий ей рекомендуемый срок службы изоляции обозначим D_0 . Тогда, по аналогии с формулой (3.16) можно записать:

$$D_0 = B \cdot e^{-k\theta_p}. \quad (3.17)$$

Произвольную температуру нагрева выразим следующим образом:

$$\theta = \theta_p + \Delta\theta, \quad (3.18)$$

где $\Delta\theta$ – разница между действительной и рекомендуемой температурами, $^\circ\text{C}$.

Подставляя выражение (3.18) в формулу (3.17), с учетом уравнения (3.16) можно записать:

$$D = D_0 \cdot e^{-k\Delta\theta}. \quad (3.19)$$

В уравнении (3.19), изменяя $\Delta\theta$, можно получить новое значение срока службы изоляции обмотки.

В [19] показано, что при расчете перегрузочной характеристики следует учитывать число встречаемых перегрузок в год (50–100),

число часов использования электродвигателя в год, постоянные времени нагрева и охлаждения электродвигателя.

Первая методика расчета перегрузочной характеристики электродвигателя, изложенная в [19], основана на линейной аппроксимации кривой нагрева и кусочно-линейной аппроксимации кривой охлаждения. На графике естественных износов изоляции строятся кривые зависимости дополнительного износа от времени. В точке пересечения кривых естественного и дополнительного износов изоляции получаем выдержку времени, соответствующую данной кратности тока перегрузки и выбранным значениям постоянных времени нагрева и охлаждения. Выполняя этот расчет для различных кратностей тока перегрузки, получаем перегрузочную характеристику электродвигателя. Анализ показывает, что эта методика сложная и не приемлема для устройств защиты, рассчитанных обеспечивать защиту электродвигателей в широком диапазоне их мощностей.

И. А. Сыромятников, исследуя износ изоляции электродвигателя при перегрузке, делает 2 вывода:

1) «износ изоляции обмотки происходит практически только за время охлаждения обмотки» (т.е. износ изоляции в период перегрузки незначительный, поскольку период нагрева во время перегрузки длится меньше, чем период охлаждения) [44, с. 149];

2) «перегрузочная характеристика электродвигателя, построенная из условия одинакового износа, практически не отличается от перегрузочной характеристики, построенной из условия одинакового значения допустимого превышения температуры. Поэтому при определении допустимого времени перегрузки можно не производить громоздких вычислений износа изоляции...» [44, с. 150].

По второй методике расчета перегрузочной характеристики электродвигателя определяется допустимое время нахождения его под током перегрузки, в течение которого обмотка электродвигателя нагревается до допустимой температуры. Эта методика не требует указанных выше данных и поэтому более приемлема для универсальных устройств защиты. Но она требует знания допустимой температуры обмотки (по классу изоляции) и температуры обмотки электродвигателя при номинальном токе, расчет которых затруднителен.

ГОСТ 51689-2000 [45] определяет допустимую температуру срабатывания защиты, измеренную методом сопротивления (таблица 3.1).

Таблица 3.1 – Допустимая температура обмотки при срабатывании защиты

Режим	Обозначение температуры	Допустимая температура обмотки, °С, для классов нагревостойкости изоляции	
		<i>B</i>	<i>F</i>
Перегрузки	$\theta_{\text{доп. пер}}$	145	170
Пусковой или стопорный	$\theta_{\text{доп. стоп}}$	200	225

Значения температур установившегося теплового режима электродвигателей приведены в таблице 3.2.

Таблица 3.2 – Значения температур для различных классов нагревостойкости изоляции электродвигателей серий 4А и АИР

Тепловой режим	Температура	Значения температуры, °С, для классов нагревостойкости	
		<i>B</i>	<i>F</i>
Установившийся	Предельно допустимая (максимальное значение) $\theta_{\text{доп. макс}}$	130	155
	Предельно допустимая (среднее значение, определяемое методом сопротивления) $\theta_{\text{доп. ср}}$	120	140

Исследование допустимого времени нагревания электродвигателя при перегрузках необходимо производить с горячего состояния, поскольку режим перегрузки с горячего состояния всегда опаснее режима перегрузки с холодного состояния.

И. А. Сыромятников, исследуя превышения температуры обмоток при перегрузках с горячего состояния, предложил [44] определять допустимое время перегрузки без учета теплоотдачи по формуле:

$$t_{\text{доп}} = \frac{T_{\text{м}}}{(k_{\text{пер}}^2 - 1)} \frac{(\theta_{\text{доп}} - \theta_{\text{ном}})}{\tau_{\text{м. ном}}}, \quad (3.20)$$

где $T_{\text{м}}$ – постоянная времени нагрева обмотки, с;

$\theta_{\text{доп}}$, $\theta_{\text{ном}}$ – температуры допустимая, определяемая классом изоляции, и номинальная (при номинальном токе), °С;

$\tau_{\text{м. ном}}$ – превышение температуры обмотки над окружающей средой, определяемое ее собственными потерями, т. е. без учета составляющих потерь, которые обусловлены притоком теплоты от других источников, в частности, потерь в стали, вентиляционных и других потерь, °С.

Превышение температуры:

$$\tau_{\text{м. ном}} = \theta_{\text{м. ном}} - 40, \quad (3.21)$$

где $\theta_{\text{м. ном}}$ – температура обмотки от ее собственных потерь, °С;

40 – температура окружающей среды по нормам МЭК 34-1, °С.

Постоянная времени нагрева обмотки по [44]:

$$T_{\text{м}} = \frac{150}{j_{\text{ном}}^2} \tau_{\text{м. ном}}, \quad (3.22)$$

где $j_{\text{ном}}$ – номинальная плотность тока, А/мм².

Подставляя выражение (3.22) в формулу (3.20), можно найти:

$$t_{\text{доп}} = \frac{150(\theta_{\text{доп}} - \theta_{\text{ном}})}{j_{\text{ном}}^2 (K_{\text{пер}}^2 - 1)}. \quad (3.23)$$

В уравнении (3.23) номинальная температура обмотки $\theta_{\text{ном}}$ в самом худшем случае, при температуре наружного воздуха $\theta_{\text{нар. возд}} = 40$ °С, не может превышать значений $\theta_{\text{доп. ср}}$ (таблица 3.2), а $\theta_{\text{доп}}$ не может превышать значений температуры обмотки при срабатывании защиты (таблица 3.1). Кроме того, следует учитывать, что номинальная температура нагрева обмотки изменяется с изменением температуры наружного воздуха, что можно учесть коэффициентом [46]:

$$K_{\theta} = \frac{235 + \theta_{\text{нар. возд}}}{275}. \quad (3.24)$$

С учетом этих особенностей уравнение (3.23) будет иметь вид:

$$t_{\text{доп}} = \frac{150(\theta_{\text{доп. пер}} - K_{\theta} \theta_{\text{доп. ср}})}{j_{\text{ном}}^2 (K_{\text{пер}}^2 - 1)} = \frac{150 \Delta\theta}{j_{\text{ном}}^2 (K_{\text{пер}}^2 - 1)}, \quad (3.25)$$

где $\Delta\theta = \theta_{\text{доп. пер}} - K_{\theta} \theta_{\text{доп. ср}}$.

Уравнение (3.25) является основным уравнением для определения $t_{\text{доп}}$ с горячего состояния, которое учитывает температуру окружающей среды.

В таблице 3.3 приведены значения температуры, используемые в расчетах для электродвигателей серий 4А и АИР различных габаритов.

Таблица 3.3 – Параметры, характеризующие нагрев электродвигателя серий 4А и АИР при перегрузках

Параметр	Значения номинальных температур, °С, для серий электродвигателей				
	4А		АИР		
Высота оси вращения, мм	50-132	160-355	45-63	71-250	≥280
Класс нагревостойкости	<i>B</i>	<i>F</i>	<i>B</i>	<i>B(F)</i>	<i>F</i>
Допустимая средняя температура, определенная методом сопротивления, $\theta_{\text{доп. ср}}$, °С *	120	140	120	120	140
Температура срабатывания защиты при перегрузке $\theta_{\text{ср. защ}}$, °С	145	170	145	145(170)	170
$\Delta\theta = \theta_{\text{доп. пер}} - K_{\theta} \theta_{\text{доп. ср}}$ (при $K_{\theta} = 1$), °С	25	30	25	27,5 **	30

* Указанная средняя допустимая температура соответствует температуре окружающей среды +40 °С. ** Среднее значение $\Delta\theta$ для классов *B* и *F*.

С учетом данных таблицы 3.3 уравнение (3.25) запишется, например, для электродвигателей класса нагревостойкости *B* серии 4А (с высотой оси вращения 50–32 мм) и серии АИР (с высотой оси вращения 45–63 мм) в виде:

$$t_{\text{доп}} = \frac{3750}{j_{\text{ном}}^2 (K_{\text{пер}}^2 - 1)} = \frac{C_1}{(K_{\text{пер}}^2 - 1)}, \quad (3.26)$$

где $C_1 = 3750/j_{\text{ном}}^2$.

Для электродвигателей класса нагревостойкости *F* серии 4А (с высотой оси вращения 160 мм и более) и серии АИР (с высотой оси вращения 280 мм и более):

$$t_{\text{доп}} = \frac{4500}{j_{\text{ном}}^2 (K_{\text{пер}}^2 - 1)} = \frac{C_2}{(K_{\text{пер}}^2 - 1)}, \quad (3.27)$$

где $C_2 = 4500/j_{\text{ном}}^2$.

Используя данные, приведенные в [5], в качестве примера по уравнениям (3.26) и (3.27) выполнены расчеты перегрузочных характеристик электродвигателей серии 4А мощностью 0,37, 2,2, 7,5 и 55 кВт (рисунок 3.3).

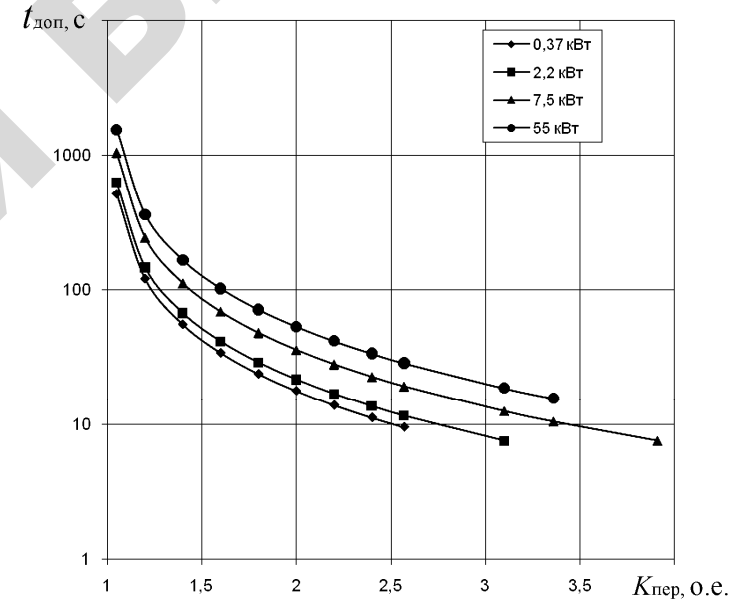


Рисунок 3.3 – Перегрузочные характеристики электродвигателей серии 4А различной мощности при температуре окружающей среды + 40 °С, вычисленные по формулам (3.26) – (3.27) до кратностей тока перегрузки, соответствующих критическому скольжению

Из рисунка 3.3 следует, что чем больше мощность электродвигателя, тем больше допустимое время работы электродвигателя при перегрузке.

Выше отмечено, что минимальная перегрузочная способность электродвигателя может быть принята в качестве защитной характеристики устройства защиты от перегрузки. Следовательно, будем

считать, что уравнения (3.26) и (3.27) определяют защитную характеристику устройств защиты электродвигателей от перегрузки с горячего состояния. Кроме того, имеется запас времени на срабатывание защиты в связи с тем, что в действительности электродвигатели редко эксплуатируются при температуре + 40 °С.

Значения коэффициентов C_1 и C_2 для электродвигателей номинальной мощности до 90 кВт серии 4А приведены в таблице 3.4.

Таблица 3.4 – Значения коэффициентов C_1 и C_2 для электродвигателей серии 4А

Мощность, кВт	Значения коэффициента C_1 при числе полюсов				Значения коэффициента C_2 при числе полюсов			
	2	4	6	8	2	4	6	8
0,06	-	185,2	-	-	-	-	-	-
0,09	193,7	156,2	-	-	-	-	-	-
0,12	223,1	97,6	-	-	-	-	-	-
0,18	81,1	78,8	64,9	-	-	-	-	-
0,25	81,1	81,1	91,6	72,3	-	-	-	-
0,37	68,5	53,1	78,8	81,1	-	-	-	-
0,55	58,6	78,8	66,7	70,4	-	-	-	-
0,75	70,4	51,9	61,6	76,5	-	-	-	-
1,1	51,9	64,9	70,4	70,4	-	-	-	-
1,5	100,8	58,6	74,4	91,6	-	-	-	-
2,2	88,8	64,9	94,5	78,8	-	-	-	-
3	91,6	86,1	78,8	83,5	-	-	-	-
4	138,7	94,5	74,4	78,8	-	-	-	-
5,5	119,6	74,4	76,5	74,4	-	-	-	-
7,5	115,4	107,7	78,8	-	-	-	-	113,4
11	107,7	100,8	-	-	-	-	94,52	100,2
15	-	-	-	-	113,4	138,5	94,52	109,9
18	-	-	-	-	106,5	148,8	113,38	120,9
22	-	-	-	-	143,5	154,3	148,76	100,2
30	-	-	-	-	166,4	148,8	125	133,8
37	-	-	-	-	195,3	129,3	138,5	129,3
45	-	-	-	-	187,4	143,5	173,01	154,3
55	-	-	-	-	180	160,2	148,76	-
75	-	-	-	-	232,4	243,4	-	-
90	-	-	-	-	212,7	232,4	-	-

В работе [47] определены значения защитной характеристики устройства защиты (таблица 3.5) для электродвигателей серии 4А.

Для обоснования величин выдержки времени была использована характеристика ресурса изоляции в зависимости от температуры ее нагрева.

Таблица 3.5 – Времятоковая характеристика устройств защиты асинхронного электродвигателя при перегрузке [47]

Кратность тока перегрузки	1	1,1	1,2	1,3	1,4	1,5	1,6	1,7	1,8	1,9	2	5
Время срабатывания устройства, с	∞	1800	700	300	150	120	90	70	60	50	40	5

Защитная характеристика (таблица 3.5) одна для всех мощностей, что ошибочно и противоречит приведенным выше выводам. По этой причине значения выдержек времени в таблице 3.5 большие, чем на графиках рисунка 3.3, особенно при малой перегрузке по току и для электродвигателей малых мощностей. Эти значения более соответствуют работе защиты с холодного состояния электродвигателя.

ГОСТ 183-74 определяет одну точку защитной характеристики для электродвигателей мощностью более 0,55 кВт: при кратности перегрузки 1,5 время срабатывания устройства защиты должно составлять не более 120 с.

Введем некоторые ограничения для защитных характеристик устройств защиты электродвигателей.

Первое ограничение устройств защиты электродвигателей от перегрузки связано с реальными значениями кратности тока перегрузки асинхронного электродвигателя. Обычно защитные характеристики устройств защиты электродвигателей изображаются на графиках при кратностях тока перегрузки, которые соответствуют пусковым токам электродвигателей. В действительности же ток перегрузки, обусловленный перегрузкой момента на валу, изменяется до критического значения тока i_k , после чего в процессе остановки ротора быстро увеличивается до пускового значения i_n (рисунок 3.4). Поэтому защитная характеристика устройств защиты электродвигателей от перегрузки должна быть ограничена значением кратности тока перегрузки $k_{пер.к}$, которое соответствует критическому току i_k .

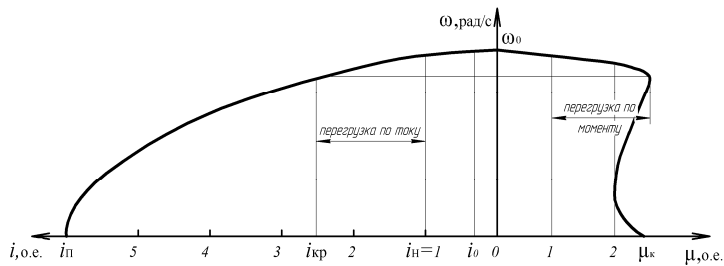


Рисунок 3.4 – Механическая $\omega = f_1(\mu)$ и электромеханическая $\omega = f_2(i)$ характеристики трехфазного асинхронного электродвигателя:
 i – кратность тока; μ – кратность момента; ω – угловая скорость

Ток электродвигателя при критическом скольжении, о. е., может быть определен [48] по формуле

$$i_k = \sqrt{i_0^2 + (1 - i_0^2)\mu_k(\mu_k + \sqrt{\mu_k^2 - 1})}, \quad (3.28)$$

где μ_k – кратность критического (максимального) момента электродвигателя, о.е.;

i_0 – ток электродвигателя при холостом ходе, о. е.:

$$i_0 = \sqrt{1 - \cos^2 \varphi_n} - \frac{\cos \varphi_n}{\mu_k + \sqrt{\mu_k^2 - 1}}, \quad (3.29)$$

где $\cos \varphi_n$ – номинальный коэффициент мощности электродвигателя, о.е.

Второе ограничение защитной характеристики устройств защиты электродвигателей от перегрузки связано с допустимым временем пуска электродвигателя с холодного состояния и с допустимым временем нахождения электродвигателя в стопорном режиме при горячем состоянии обмоток статора.

Допустимое время пуска электродвигателя не может превышать допустимого времени нахождения электродвигателя под пусковым током с холодного состояния обмотки:

$$t_{\text{доп. пуск}} \leq \frac{\theta_{\text{доп. стоп}} - 40}{v_t}, \quad (3.30)$$

где $\theta_{\text{доп. стоп}}$ – температура обмотки при срабатывании защиты (по табл. 3.1, °C);

v_t – скорость роста температуры обмотки в режиме неподвижного ротора, °C/c [5].

Допустимое время нахождения электродвигателя в стопорном режиме с горячего состояния:

$$t_{\text{доп. стоп}} \leq \frac{\theta_{\text{доп. стоп}} - \theta_{\text{доп. ср}}}{v_t}, \quad (3.31)$$

где $\theta_{\text{доп. стоп}}$ и $\theta_{\text{доп. ср}}$ находятся по таблицам 3.1 и 3.2 с учетом класса нагревостойкости изоляции, °C.

На рисунке 3.5 изображены зависимости допустимого времени нахождения электродвигателя в стопорном режиме с холодного состояния от номинальной мощности электродвигателей.

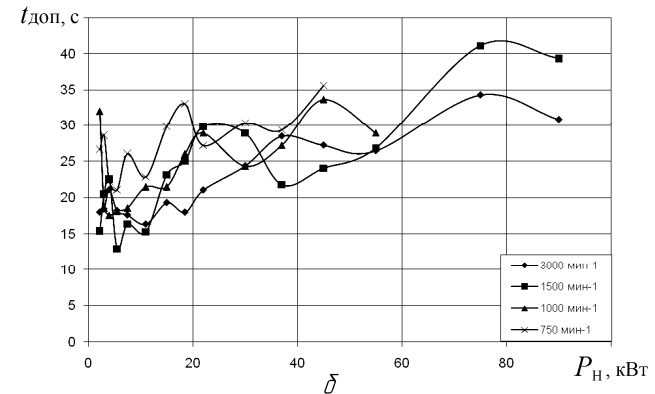
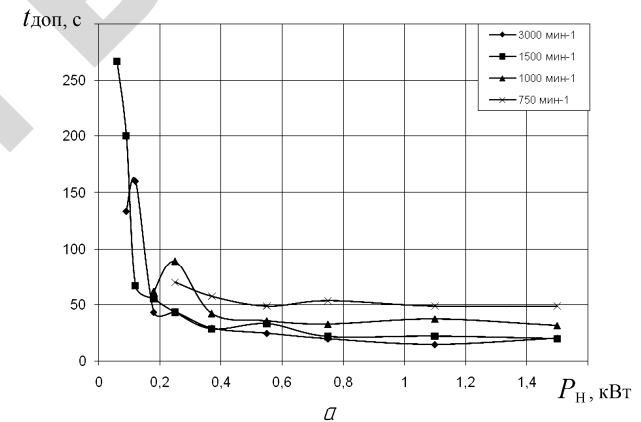


Рисунок 3.5 – Допустимое время нахождения под током в стопорном режиме с холодного состояния электродвигателей серии 4А мощностью до 1,5 кВт (а) и до 90 кВт (б)

Из рисунка 3.5 следует, что наиболее опасен режим заторможенного ротора для электродвигателей мощностью 1,1 кВт (3000 мин^{-1}), 2,2 кВт (1500 мин^{-1}), 5,5–11 кВт при 1500 мин^{-1} . Допустимое время менее 20 с нахождения в стопорном режиме электродвигателя с холодного состояния имеют большинство двух и четырехполюсных электродвигателей мощностью от 1,1 до 18,5 кВт.

На рисунке 3.6 изображены зависимости допустимого времени нахождения электродвигателя в стопорном режиме с горячего состояния от номинальной мощности электродвигателей.

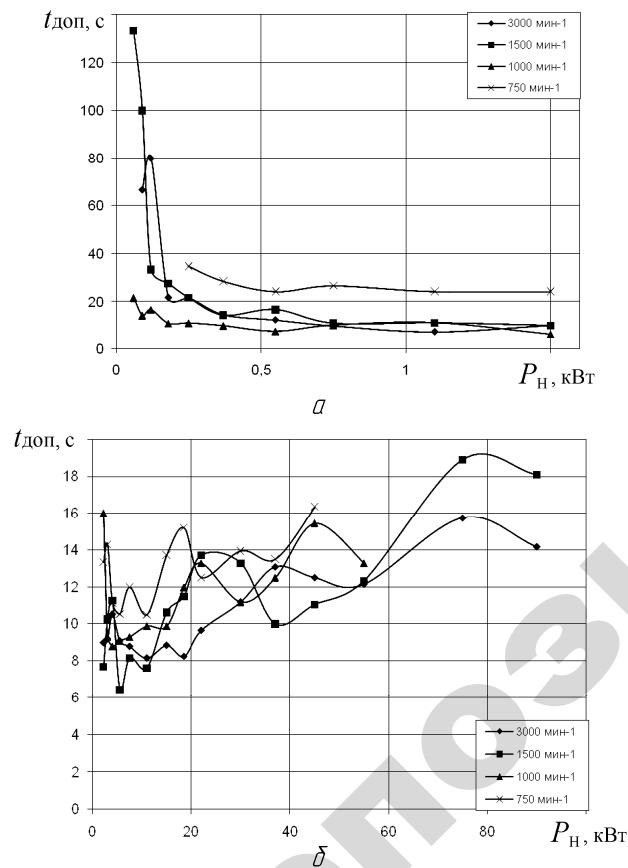


Рисунок 3.6 – Допустимое время нахождения под током в стопорном режиме с горячего состояния электродвигателей серии 4А до 1,5 кВт (а) и до 90 кВт (б)

Из рисунка 3.6 следует, что наиболее опасен режим заторможенного ротора с горячего состояния для электродвигателей мощностью 2,2–11 кВт при 1500 мин^{-1} . Для них допустимое время нахождения в стопорном режиме электродвигателя с горячего состояния составляет менее 8 с.

Расчеты показывают, что режим заторможенного ротора очень неблагоприятен для электродвигателей повышенного скольжения. Их допустимое время нахождения под током меньше, чем электродвигателей основного исполнения, в среднем на 20 % (в интервале мощности от 1 до 11 кВт). Наименьшее допустимое время нахождения под током в стопорном режиме имеют многоскоростные электродвигатели. Для многих их типоразмеров допустимое время нахождения под током в стопорном режиме составляет 4–8 с. Это обстоятельство следует учитывать при выборе устройств защиты.

С учетом принятых ограничений защитная характеристика устройства защиты имеет вид, соответствующий рисунку 3.7.

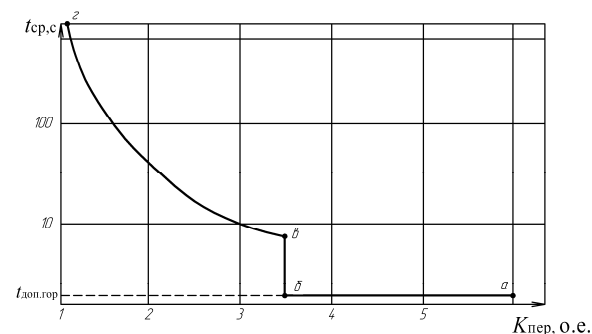


Рисунок 3.7 – Защитная характеристика устройства защиты электродвигателя от перегрузки по току с горячего состояния:

a-b-v – участок защитной характеристики, соответствующий пусковому и стопорному режимам; *z-v* – участок защитной характеристики, соответствующий режиму перегрузки

Линия *a-b-v* – участок защитной характеристики с горячего состояния, соответствующий пусковому и стопорному режимам электродвигателя, линия *z-v* – участок защитной характеристики с горячего состояния, соответствующий режиму перегрузки электродвигателя.

В заключение можно отметить следующее:

1. Для построения универсальных устройств защиты, рассчитанных для группы электродвигателей, целесообразно использовать

расчет перегрузочной характеристики электродвигателя по допустимой температуре нагрева.

2. Защитную характеристику устройства защиты электродвигателя от перегрузки по току с горячего состояния рекомендуется определять по формуле:

$$t_{\text{доп}} = \frac{C}{(K_{\text{пер}}^2 - 1)}, \quad (3.32)$$

где C – коэффициент C_1 или C_2 , определяемый по таблице 3.4.

3. Защитная характеристика устройства защиты от перегрузки по току ограничивается кратностью перегрузки, соответствующей критическому току, допустимым временем пуска электродвигателя с холодного состояния и допустимым временем пребывания его в стопорном режиме с горячего состояния [49].

3.3. Токовая защита асинхронного трехфазного электродвигателя от перегрузки

В токовых устройствах защиты контролируется ток электродвигателя. Обычно для этого используют трансформаторы тока или малогабаритные датчики тока трансформаторного типа, которые обеспечивают гальваническую развязку силовых и измерительных цепей.

Классификация токовых защит электродвигателя приведена на рисунке 3.8 [43].

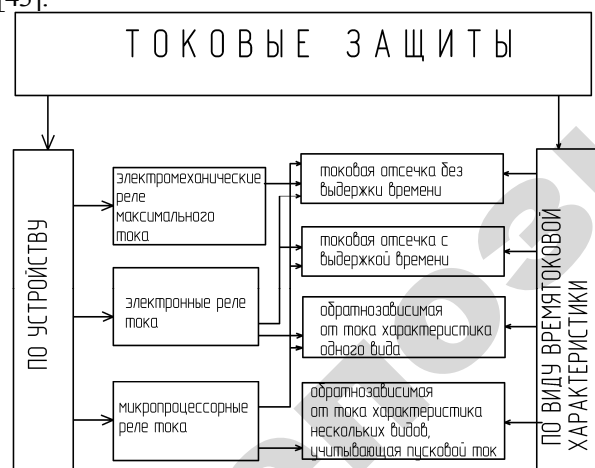


Рисунок 3.8 – Виды токовых защит электродвигателей

Электромеханические реле тока, например РЭ12-2 на токи 0,6–630 А, отключают электродвигатель при превышении тока уставки реле мгновенно, без выдержки времени (токовая отсечка).

На рисунке 3.9, а приведена принципиальная электрическая схема защиты асинхронного электродвигателя от перегрузки на базе трех реле максимального тока. При нажатии кнопки $SB1$ включается электромагнитный пускатель. Его силовые контакты включают электродвигатель в сеть, а блок-контакт шунтирует кнопку $SB1$. От действия пускового тока все контакты реле тока $KA1-KA3$ разомкнутся, поэтому кнопку $SB1$ следует держать нажатой до полного разбега электродвигателя. Как только токи станут меньше уставки реле, контакты $KA1-KA3$ замкнутся и схема будет готова к контролю тока. При токовой перегрузке ($K_{\text{пер}} \geq 1$) срабатывает одно или несколько реле тока $KA1-KA3$, электромагнитный пускатель и электродвигатель отключаются.

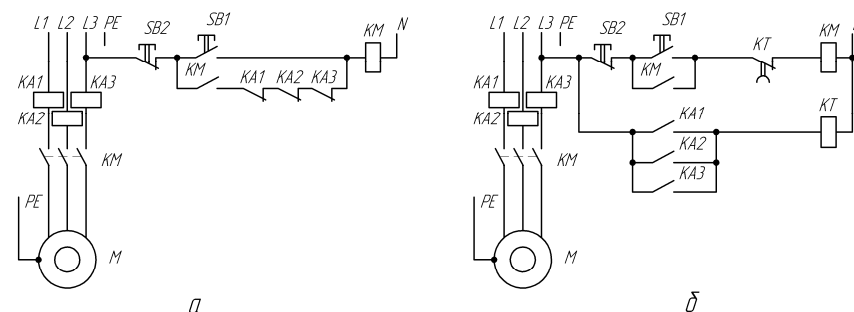


Рисунок 3.9 – Принципиальные электрические схемы защиты асинхронного электродвигателя от перегрузки на базе трех реле максимального тока (а) и на базе трех реле максимального тока и реле времени (б)

Если токовые реле были настроены на перегрузку $K_{\text{пер}} \geq 1,2$, то защитная характеристика такого устройства защиты имеет вид линии 3 (рисунок 3.10).

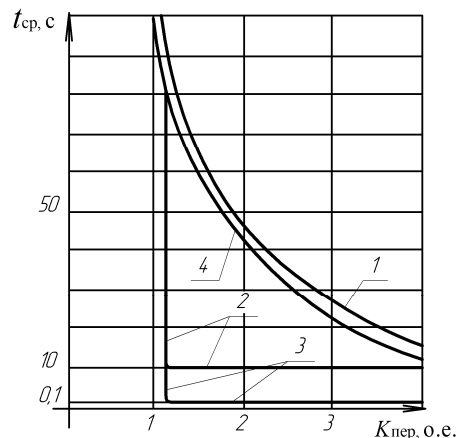


Рисунок 3.10 – Перегрузочная характеристика электродвигателя и времятоковые характеристики устройств токовой защиты:

1 – допустимая перегрузочная характеристика электродвигателя; 2 – токовая отсечка при $K \geq 1, 2$ с выдержкой времени 10 с; 3 – токовая отсечка при $K \geq 1, 2$ без выдержки времени; 4 – обратнозависимая от тока характеристика аппарата защиты

Эти же токовые реле вместе с реле времени могут обеспечить токовую отсечку с выдержкой времени. На рисунке 3.9, б представлена принципиальная электрическая схема защиты асинхронного электродвигателя от перегрузки на базе трех реле максимального тока и реле времени. При пуске реле максимального тока $KAI-KA3$ срабатывают и включается реле времени KT . Выдержка времени KT выбирается большей, чем время пуска электродвигателя. Поэтому реле $KAI-KA3$ отключатся раньше, чем сработает контакт KT . Если теперь произойдет перегрузка по току, то одно или все реле $KAI-KA3$ сработают, с выдержкой времени отключится асинхронный электродвигатель от сети. Предположим, реле тока настроены на перегрузку $K_{пер} \geq 1, 2$, а реле времени – на 10 с. В этом случае защитная характеристика такого устройства защиты имеет вид линии 2 (рисунок 3.10).

Недостаток такой защиты состоит в том, что она рассчитана на одну выдержку времени независимо от величины перегрузки электродвигателя. Кроме того, электромеханические реле максимального тока невозможно отрегулировать на небольшие перегрузки. Эти реле имеют большой габарит и массу.

Некоторые электронные реле защиты от перегрузки асинхронных электродвигателей с целью упрощения устройства также имеют одно время срабатывания при перегрузке по току. Такую характеристику обеспечивает, например, электронное реле защиты электродвигателей EOCR-DS3 компании EOCR (Южная Корея). Они имеют настраиваемую выдержку времени (0,2–10 с) при задаваемом токе уставки.

Получение одной выдержки времени не достаточно для обеспечения токовой защиты электродвигателя от перегрузки. Например, при перегрузке 130 % с помощью реле времени обеспечивается выдержка времени 30 с. Если же перегрузка по току будет 125 %, то реле максимального тока не сработает. Этого нельзя допускать из-за снижения срока службы обмотки, потому что работа электродвигателя с температурой всего лишь на 8–10 °С превышающей номинальную температуру сокращает срок службы изоляции обмотки в 2 раза. По указанной причине электромеханические и электронные реле с отсечкой не могут обеспечить защиту электродвигателя при различных перегрузках.

Для защиты электродвигателей от перегрузки наиболее приемлемы *электронные реле перегрузки, обеспечивающие обратнозависимую от тока характеристику* (линия 4 на рисунке 3.10).

На рисунке 3.10 характеристика 1 представляет собой допустимую перегрузочную характеристику асинхронного электродвигателя. Защитная характеристика аппаратов защиты 4 должна проходить ниже перегрузочной характеристики электродвигателя 1 во всем диапазоне значений кратностей тока перегрузки.

Пример электронного токового реле, обеспечивающего обратнозависимую от тока характеристику, приведен на рисунке 3.11. Такое реле защиты используется в станциях управления ШЭТ (ШЭП) и КАСКАД для защиты погружных электродвигателей. Электронное токовое реле обеспечивает зависимость от тока выдержку времени в пределах 20–6 с при перегрузке 120–200 %. В этом случае обратнозависимая от тока характеристика строится на базе интегрирующего конденсатора $C2$. В нормальном режиме работы напряжение на выходе моста UZ недостаточное для пробоя стабилитрона VD , поэтому конденсатор $C2$ не заряжен (рисунок 3.11).

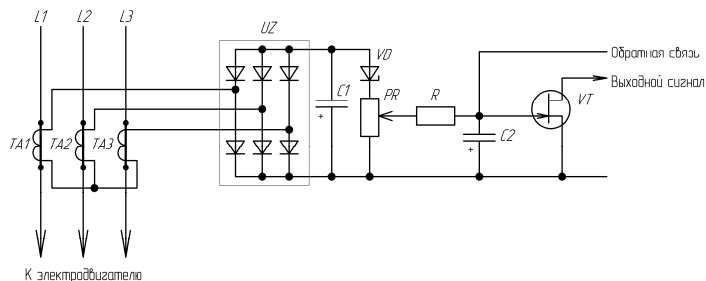


Рисунок 3.11 – Узел токовой защиты электродвигателя, применяемый в станциях управления ШЭТ (ШЭП) 5801

При перегрузке напряжение на выходе моста UZ возрастает, стабилитрон VD пробивается и конденсатор $C2$ начинает заряжаться через резистор R . Время заряда пропорционально произведению $R \cdot C2$. Через некоторое время конденсатор $C2$ зарядится до напряжения, достаточного для переключения транзистора VT . Далее включится исполнительный орган защиты, электромагнитный пускатель и электродвигатель будет отключен.

Малое время заряда конденсатора $C2$ в этой схеме (порядка 6–20 с) объясняется тем, что он заряжается постоянным током. Увеличить выдержку времени на срабатывание токовой защиты при заряде интегрирующего конденсатора $R-C$ цепочки позволяет импульсный заряд-разряд конденсатора. Такой импульсный заряд-разряд конденсатора используется в схеме фазочувствительной защиты ФУЗ-М (рисунок 3.12) [1].

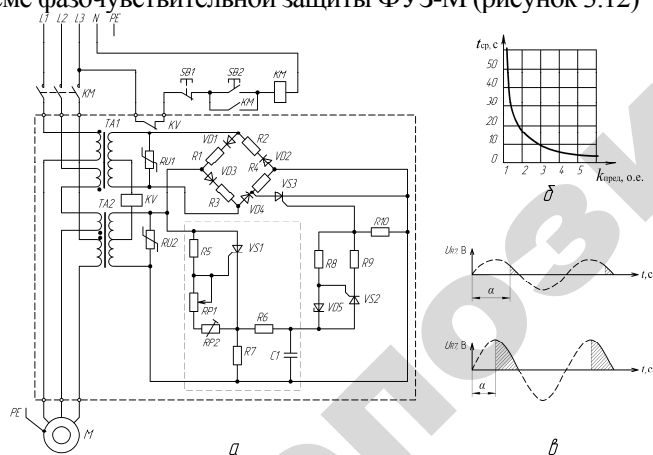


Рисунок 3.12 – Принципиальная электрическая схема устройства ФУЗ-М (а), его защитная характеристика (б) и импульсы разряда интегрирующего конденсатора (в)

Устройство ФУЗ-М предназначено для защиты не только от неполнофазного режима и заторможенного ротора, как устройство ФУЗ, но и от перегрузки.

На рисунке 3.12 узел защиты от перегрузки обведен тонкой пунктирной линией. Узел перегрузки включает тиристор $VS1$, управляемый по аноду с помощью резисторов $R5$, $RP1$ и $RP2$, нагрузочного резистора $R7$, зарядной цепи $R6-C1$. Конденсатор $C1$ интегрирующий. Его постоянная времени заряда пропорциональна произведению $R6 \cdot C1$.

В нормальном режиме работы тиристор $VS1$ закрыт. При перегрузке тиристор $VS1$ приоткрывается в каждую положительную волну напряжений $U2$, причем таким образом, что чем больше напряжение $U2$ по амплитуде, тем больший импульс поступает на конденсатор $C1$ (рисунок 3.12, в). В промежутке между зарядными импульсами конденсатор $C1$ разряжается на резисторы $R6$, $R7$. Таким образом, импульсный заряд и разряд конденсатора $C1$ удлиняет выдержку времени на срабатывание устройства защиты. Когда напряжение на $C1$ достигнет порога открытия стабилитрона $VD5$, последний пропустит заряд тока на тиристор $VS2$, а тот, в свою очередь, откроет тиристор $VS3$. Открытие тиристора $VS3$ приводит к шунтированию резистора $R4$, разбалансированию кольцевого фазочувствительного детектора, построенного на диодах $VD1-VD4$ и резисторах $R1-R4$. Это вызовет срабатывание реле KV , отключение KM и электродвигателя от сети.

Общим недостатком устройств защиты от перегрузки по току с использованием интегрирующего конденсатора является невозможность получения большого диапазона выдержек времени на срабатывание устройств защиты при всех кратностях тока перегрузки. Для устранения этого недостатка используют нелинейные преобразователи сигналов. В качестве примера рассмотрим работу нелинейного преобразователя (рисунок 3.13), используемого в [50].

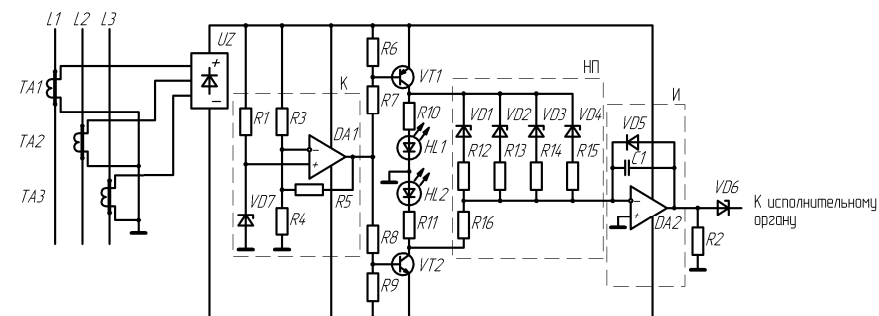


Рисунок 3.13 – Принципиальная электрическая схема нелинейного преобразователя, используемого в авторском свидетельстве СССР №1534608

Входной сигнал датчиков тока, пропорциональный току электродвигателя, питает всю схему, представленную на рисунке 3.13. Входной сигнал датчиков тока поступает также на вход первого делителя напряжений, составленного из резисторов $R1$ и стабилитрона $VD7$, а также на вход второго делителя напряжений, собранного из резисторов $R3$ и $R4$. Выход первого делителя соединен с неинвертирующим входом операционного усилителя $DA1$, а выход второго делителя – с инвертирующим входом операционного усилителя $DA1$, включенного компаратором.

При токе меньше номинального на неинвертирующем входе операционного усилителя $DA1$ напряжение больше, чем на инвертирующем. На выходе компаратора K положительное напряжение. Транзистор $VT2$ включен, светодиод $HL2$ горит, конденсатор $C1$ интегратора I разряжается, и на выходе интегратора I напряжение уменьшается.

Если ток увеличился и стал равный номинальному току, то напряжение на инвертирующем входе операционного усилителя $DA1$ стало больше, чем стабилизированное напряжение на неинвертирующем входе. На выходе компаратора K отрицательное напряжение. Транзистор $VT1$ включен, светодиод $HL1$ горит. Падение напряжения на резисторе $R10$ и светодиоде $HL1$ меньше, чем напряжение пробоя стабилитронов $VD1$ – $VD4$.

Если ток увеличился и стал больше номинального тока на 5–10 %, то напряжение питания тоже возросло. Пробивается стабилитрон $VD1$, конденсатор $C1$ интегратора I заряжается током через стабилитрон $VD1$ и резистор $R12$, и на выходе интегратора I напряжение увеличивается. Время заряда интегрирующего конденсатора пропорционально произведению $R12 \cdot C1$. Если ток еще больше увеличится, то пробивается стабилитрон $VD2$ и конденсатор $C1$ интегратора I заряжается током через стабилитрон $VD2$ и резистор $R13$, а также через стабилитрон $VD1$ и резистор $R12$, на выходе интегратора I напряжение увеличивается еще быстрее. Наиболее быстро происходит увеличение напряжения на выходе интегратора I при включении в работу всех стабилитронов нелинейного преобразователя НП. В этом случае резисторы $R12$ – $R15$ включены параллельно, результирующее сопротивление их уменьшается, следовательно, скорость интегрирования интегратора увеличивается. При достижении на выходе интегратора напряжения пробоя стабилитрона $VD6$ происходит срабатывание исполнительного органа и отключение электродвигателя от сети.

При уменьшении тока ниже номинального компаратор K переключается, транзистор $VT1$ закрывается, а транзистор $VT2$ открывается.

Происходит интегрирование напряжения в другую сторону, т.е. уменьшение отрицательного напряжения на выходе интегратора. Тем самым моделируется охлаждение электродвигателя.

Применение в этой схеме нелинейного преобразователя на элементах $VD1$ – $VD4$ и $R12$ – $R15$ позволило получать изменяемое время срабатывания защиты в широких пределах.

Используя резисторные оптопары в интегрирующих схемах, можно получить большие выдержки времени срабатывания защиты. Резисторные оптопары представляют собой лампу накаливания и фоторезистор на основе селенистого кадмия, размещенные в металлоглазном корпусе. Изменение тока накала лампы ведет к многократному изменению сопротивления фоторезистора (в 50–100 раз при изменении тока накала в 2,5 раза). Примерно в таком отношении находятся время срабатывания защиты и кратность тока перегрузки. По этой причине резистор оптопары хорошо подходит для работы в интегрирующей цепи. Такой узел защиты от перегрузки используется в устройстве защиты, построенном по описанию [51]. В другом авторском свидетельстве используется генератор, управляемый резисторной оптопарой и электронные реверсивные счетчики (рисунок 3.14) [52].

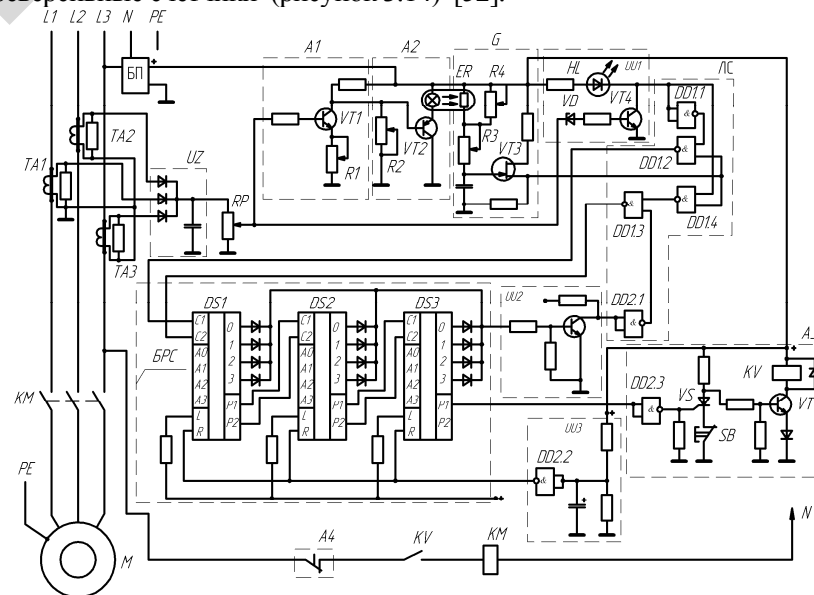


Рисунок 3.14 – Принципиальная электрическая схема устройства защиты асинхронного электродвигателя от перегрузок на базе резисторной оптопары и реверсивных счетчиков по авторскому свидетельству СССР № 1319147

Рассмотрим работу устройства защиты, схема которого представлена на рисунке 3.14. Устройство содержит малогабаритные трансформаторы тока $TA1-TA3$, выпрямитель UZ , нагруженный на потенциометр RP . С выхода потенциометра сигнал подается на усилитель $A1$ на транзисторе $VT1$, уставку тока которого регулируется резистором RP , а коэффициент усиления – резистором $R1$ эмиттерного повторителя $A2$, начальное смещение которого регулируется резистором $R2$. Эмиттерный повторитель нагружен на резисторную оптопару ER , фоторезистор которой является датчиком релаксационного генератора G на однопереходном транзисторе $VT3$. Минимальная частота генератора может быть изменена резистором $R4$, а максимальная – резистором $R3$. Кроме того, начальная частота регулируется резистором $R2$, а крутизна преобразования напряжения в частоту – резистором $R1$.

Устройство содержит также пороговый элемент UUI , настроенный на появление сигнала на выходе при токе, превышающем номинальный. В состав устройства входит логическая схема ЛС, состоящая из логических элементов 2И-НЕ ($DD 1.2, DD 1.3, DD 1.4$) и инверторов $DD 1.1, DD 2.1$. Устройство имеет также три счетчика ($DS1-DS3$), электронный ключ $UU2$, блок установки нуля счетчиков $UU3$, выходной усилитель $A3$ на тиристоре VS , транзисторе VT , исполнительном реле KV .

При включении схемы в сеть реле KV включается и замыкает свой контакт в цепи электромагнитного пускателя.

При токе электродвигателя, превышающем номинальное значение, стабилитрон VD пробивается, срабатывает транзистор $VT4$ и на выходе блока UUI появляется напряжение логического нуля. Инвертор $DD 1.1$ выдает логическую единицу. Логический элемент $DD 1.4$ закрывается, а $DD 1.2$ открывается. Импульсы от генератора G проходят через $DD 1.2$ и поступают на счетный вход сложения реверсивного счетчика $DS1$. Пока ток двигателя превышает номинальные значения, происходит счет импульсов, причем с увеличением тока частота импульсов генератора возрастает не пропорционально току, а в соответствии с характеристикой резисторной оптопары ER . Например, двухкратное увеличение тока вызывает 50–75-кратное уменьшение сопротивления резисторной оптопары ER , следовательно, во столько же раз увеличивается частота генератора G . При достижении максимального числа импульсов на выходе

$P1$ счетчика $DS3$ появляется сигнал логического нуля, а на выходе инвертора $DD 2.3$ – сигнал логической единицы, отчего включается тиристор VS и шунтирует реле KV . Реле KV и двигатель отключаются от сети.

В случае уменьшения тока электродвигателя ниже номинального значения пороговый элемент UUI закрывается, на его выходе появляется логическая единица, от чего на выходе $DD1.1$ появляется логический нуль. В связи с этим логический элемент $DD1.4$ открывается, а элемент $DD1.2$ закрывается. Если к этому времени в счетчиках $DS1-DS3$ записано некоторое число импульсов, то на выходе счетчика присутствует напряжение логической единицы и транзисторный ключ $UU2$ открыт. Инвертор $DD2.1$ выдает логическую единицу. Она поступает на вход элемента $DD1.3$, он открывается для прохождения импульсов от генератора G на вход вычисления счетчика $DS1$. Происходит уменьшение числа записанных ранее импульсов. При считывании последнего импульса со счетчиков транзисторный ключ $UU2$ закрывается.

Резисторная оптопара данного устройства обеспечивает обратнoзависимую от тока характеристику защиты, а согласование ее с оптимальной защитной характеристикой производится регулировкой резисторов $R1-R4$ при изготовлении устройства. Потенциометром RP настраивают устройство на номинальный ток при вводе его в эксплуатацию.

В устройствах защиты от перегрузки вместо оптопары и релаксационного генератора может применяться функциональный преобразователь с аналого-цифровым преобразователем (АЦП) [53]. Это позволяет иметь только одну регулировку номинального тока электродвигателя и использовать устройство защиты в широком диапазоне мощностей защищаемых электродвигателей.

Большинство современных устройств защиты электродвигателей являются комплексными электронными аппаратами токовой защиты с обратнoзависимой от тока защитной характеристикой. Например, такими являются следующие токовые электронные комплексные устройства защиты: АЗД (г. Донецк, Украина); РЗД-3М, (г. Чебоксары, Россия); СиЭЗ (г. Витебск, Беларусь); ТОР-21 (г. Ижевск, Россия), УЗ-ЭД (г. Старая Русса, Россия); РЭЗЭ-6, РЭЗЭ-7 (г. Харьков, Украина); 3RB10 (фирма Siemens, Германия). Некоторые из них, например, белорусское устройство защиты СиЭЗ,

украинское АЗД, российское РЗД-3М не требуют отдельного питания для работы схемы, а формируют напряжение питания из токового сигнала. Это упрощает подключение устройства защиты в цепь электродвигателя.

Микропроцессорные реле тока совершеннее электронных реле тока, поскольку обработку сигнала производят в цифровом виде, позволяют получить больше настроек параметров контроля и имеют память [54, 55]. Они позволяют получить семейство обратозависимых времятоковых характеристик, описываемых уравнением вида (3.32) или подобным. Микропроцессорные реле позволяют контролировать асимметрию токов, пусковой ток электродвигателя, время пуска, автоматически изменять уставки защиты и многое другое.

На рисунке 3.15 представлен фрагмент схемы комплексной токовой микропроцессорной защиты асинхронного электродвигателя, разработанной в лаборатории автоматической защиты БГАТУ.

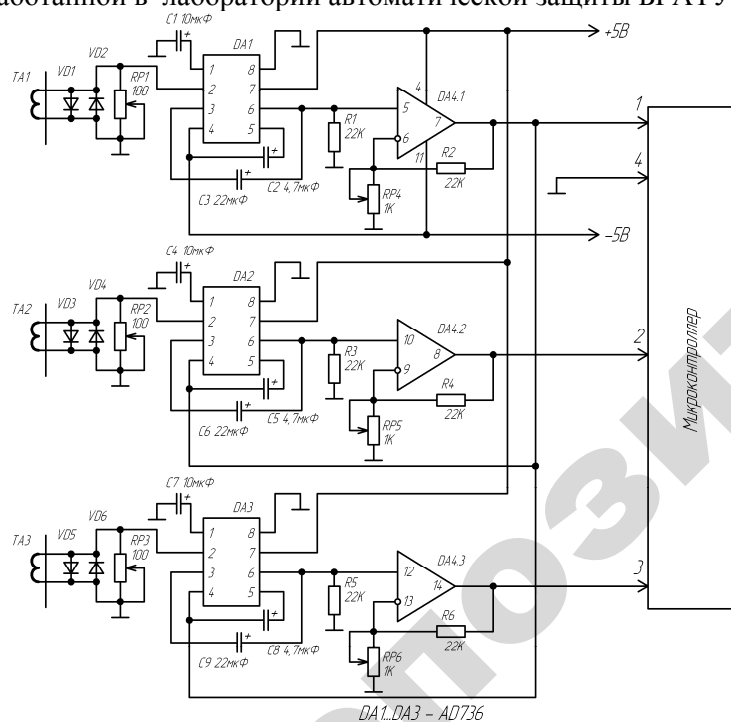


Рисунок 3.15 – Принципиальная электрическая схема модуля контроля тока микропроцессорной защиты трехфазного асинхронного электродвигателя, разработанной в БГАТУ

Модуль контроля тока электродвигателя собран на одной плате и содержит 4 аналоговые микросхемы (см. рисунок 3.15). Он питается напряжением ± 5 В.

Микросхема DA4 представляет собой четыре операционных усилителя в одном корпусе. Каждый канал измерения тока имеет свой усилитель. Операционные усилители включены по типовой схеме неинвертирующего усилителя. Коэффициент усиления этих усилителей настраивается переменными резисторами RP4–RP6.

Микросхемы DA1–DA3 типа AD736 представляют собой детекторы среднеквадратичных значений напряжения, реализующие функцию:

$$U_{\text{ВЫХ}(DC)} = \sqrt{\frac{1}{T} \int_0^T U_{\text{ВХ}}^2 dt}, \quad (3.33)$$

где $U_{\text{ВХ}}$ – напряжение, поступающее от датчика тока, В;

$U_{\text{ВЫХ}(DC)}$ – выпрямленное напряжение на выходе детектора, В.

Микросхема AD736 используется в типовой схеме включения, обеспечивающей линейность выходной характеристики не более 1 %.

Датчики тока изготовлены на базе ферритового кольца фирмы EPCOS и имеют постоянную магнитную проницаемость. Это позволяет датчикам тока иметь линейную выходную характеристику $U_{\text{ВЫХ}} = f(I)$. Среднеквадратичное отклонение выходной величины от прямолинейной зависимости составляет не менее 0,999. Для регулировки выходного напряжения датчиков тока TA1–TA3 используются переменные резисторы RP1–RP3.

Таким образом, модуль контроля тока имеет по каждому каналу две регулировки. Это позволяет иметь одинаковые характеристики $U_{\text{ВХ}} = f(I)$ на входах контроллера по каждому каналу в широком диапазоне токов.

Выходы операционных усилителей DA4.1–DA4.3 подключаются к аналоговым входам 1–3 микроконтроллера, имеющим аналого-цифровые преобразователи. Далее сигнал, пропорциональный току, обрабатывается в цифровой форме. Обеспечивается обратозависимая от тока характеристика защиты в соответствии с уравнением (3.32), контроль наличия тока по фазам, контроль асимметрии токов, контроль продолжительности действия токов холостого хода, контроль пускового тока и тока в стопорном режиме.

Датчики тока электронных токовых или микропроцессорных защит строятся также с применением магниточувствительных схем на основе элемента Холла [56]. Они сложнее датчиков тока трансформаторного типа, но также обеспечивают гальваническую развязку силовых и измерительных цепей.

Встречаются датчики тока на базе токоизмерительных резисторов, которые включаются, подобно шунтам, последовательно с обмоткой каждой фазы электродвигателя. В этом случае для усиления напряжения, снимаемого с резисторов, используются изолированные усилители, которые гальванически разделяют силовые и измерительные цепи. Перспективным вариантом построения токовой защиты является использование токоизмерительного резистора и изолированного усилителя ACPL-785J фирмы Avago Technologies. Этот усилитель позволяет измерять ток электродвигателя при перегрузке и при коротком замыкании. Выход усилителя можно подключать напрямую к АЦП микроконтроллера [57].

Фирма SIEMENS разработала специальную схему ASIC (Application Specific Integrated Circuit) для защиты асинхронных электродвигателей от перегрузки. Она характеризуется широким диапазоном регулирования номинальных токов (например, от 6 до 25 А). Благодаря наличию тепловой памяти о выполненном отключении моделируется время охлаждения двигателя. Это означает, что время срабатывания в горячем рабочем состоянии сокращается до 30 % в зависимости от предшествующей нагрузки. Для регистрации силы тока служат встроенные трансформаторы тока. Они обеспечивают также питание схемы [58].

Защитные характеристики схемы ASIC могут иметь различный наклон и различное время отключения. В частности, класс защиты определяется временем отключения шестикратного тока. Например, класс 30 характеризуется временем отключения шестикратного тока за 30 с, класс 10 – за 10 с и т. д. Классы защиты аппарата 3RB10 бывают от 2 до 30.

В качестве примера на рисунке 3.16 представлены защитные характеристики электронной схемы ASIC, встроенной в аппарат защиты 3RB10 фирмы SIEMENS. При обрыве фазы хорошо продуманная схема обеспечивает ускоренное отключение в течение 3 с.

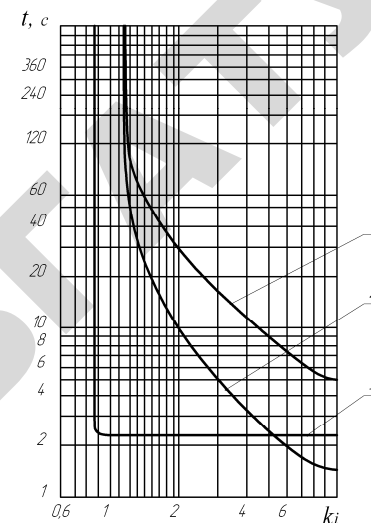


Рисунок 3.16 – Защитные характеристики электронной схемы ASIC, встроенной в аппарат защиты 3RB10:

1 – трехфазный режим (пуск с холостого состояния); 2 – трехфазный режим (пуск в горячем состоянии); 3 – при неполнофазном режиме сети

Токовые электронные или микропроцессорные устройства защиты электродвигателя от перегрузок являются основой комплексных защит, которые подробно рассмотрены в главе 6.

3.4. Защита асинхронного трехфазного электродвигателя в стопорном режиме

Стопорный режим электродвигателя часто возникает в электроприводах многих рабочих машин из-за поломок и заклинивания рабочих органов. Электродвигатель при этом оказывается включенным в сеть при неподвижном роторе. В статоре протекают пусковые токи во всех трех фазах. Обмотка статора и ротор быстро нагреваются.

Стопорный режим может возникнуть при пуске электродвигателя и неполнофазном режиме питающей сети. Пусковые токи в этом случае протекают по двум фазам, их величина на 14 % меньше, чем в трехфазном стопорном режиме.

Особенно опасен стопорный режим для нагретого электродвигателя. В этом случае время нагрева обмотки до допустимой температуры значительно уменьшается (см. рисунок 3.6).

Обычно отдельную защиту от стопорного режима не выполняют. Достаточно использовать токовую или температурную защиты. Однако бывают исключения, например использование частоты вращения для контроля стопорного режима [41].

Токковая защита от стопорного режима тесно связана с действием защиты при пуске электродвигателя (рисунок 3.17).

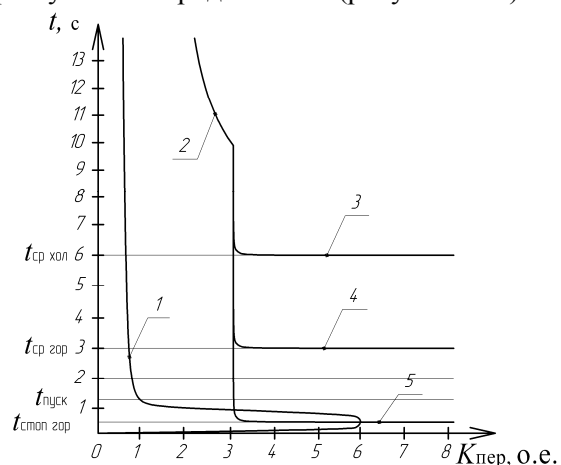


Рисунок 3.17 – Изменение пускового тока электродвигателя и защитные характеристики аппарата защиты при технологических перегрузках и в стопорном режиме:

- 1 – изменение пускового тока электродвигателя; 2 – защитная характеристика аппарата защиты при технологических перегрузках; 3 – участок защитной характеристики, контролирующей пуск с холодного состояния; 4 – участок защитной характеристики, контролирующей пуск с горячего состояния; 5 – участок защитной характеристики, контролирующей стопорный режим с горячего состояния

Пуск электродвигателя должен выполняться с контролем задаваемого времени пуска $t_{пуск}$ (времени действия пускового тока). После этого времени контролируется ток. Если пусковой ток не уменьшился и его величина больше уставки тока устройства защиты, например, $3I_n$ (рисунок 3.17), то это говорит о возможном возникновении стопорного режима. Производится

отключение электродвигателя за время $t_{сп.хол}$, не менее времени предполагаемого пуска $t_{пуск}$ (линия 3 на рисунке 3.17). Так работает защита при пуске с холодного состояния электродвигателя. Время $t_{сп.хол}$ выбирается меньше допустимого времени пребывания электродвигателя под пусковым током с холодного состояния (см. параграф 3.2). Это время рекомендуется уменьшать до допустимого времени пребывания электродвигателя под пусковым током с горячего состояния $t_{сп.гор}$ (линия 4 на рисунке 3.17).

После завершения пуска электродвигателя контролируется его ток с помощью характеристики защиты от перегрузки (линия 2 на рисунке 3.17). Если возникает стопорный режим работы и ток возрастает больше, чем уставка защиты, производится быстрое отключение электродвигателя за время $t_{стоп.гор}$, меньшее, чем задаваемого времени пуска $t_{пуск}$ (линия 5 на рисунке 3.17).

Время $t_{пуск}$ определяется расчетом или измеряется на действующей установке с учетом загрузки электродвигателя и снижения напряжения при пуске. В некоторых случаях измеряется величина пускового тока и выполняется токовая отсечка при токах, больших пускового тока.

Токковая защита должна иметь отдельную индикацию стопорного режима.

3.5. Основы теории тепловой защиты электродвигателя при перегрузке

Тепловая защита основана на моделировании нагрева обмотки электродвигателя посредством нагрева током электродвигателя биметаллического элемента специального теплового токового реле.

Биметаллические тепловые токовые реле работают на принципе преобразования теплоты от протекающего тока двигателя в меха-

ническое перемещение биметаллической пластины, приводящее в действие исполнительный элемент (обычно контакт).

Биметаллическая пластина состоит из двух слоев металлов с разными температурными коэффициентами линейного расширения. При нагреве слой термоактивного металла расширяется, а слой термоинертного металла почти не деформируется. Если один конец биметаллической пластины жестко закрепить, то другой свободный конец ее будет изгибаться в сторону металла с меньшим коэффициентом линейного расширения.

Стрела прогиба h биметаллической пластинки определяется по выражению [59]:

$$h = \frac{3}{4}(\alpha_1 - \alpha_2) \frac{\tau l^2}{\delta}, \quad (3.34)$$

где $(\alpha_1 - \alpha_2)$ – разность коэффициентов линейного расширения металлов биметаллической пластинки, $1/^\circ\text{C}$;

τ – превышение температуры биметаллического элемента относительно окружающей среды, $^\circ\text{C}$;

l – длина биметаллической пластинки, м;

δ – толщина биметаллической пластинки, м.

Сила F , развиваемая на свободном конце биметаллической пластинки при противодействии ее изгибу, определяется по формуле:

$$F = \frac{3}{16} E (\alpha_1 - \alpha_2) \frac{\tau b \delta^2}{l}, \quad (3.35)$$

где b – ширина пластинки, м;

E – модуль упругости биметалла, Па.

Из уравнений (3.34) и (3.35) видно, что значение прогиба и усилия тем больше, чем больше разность $(\alpha_1 - \alpha_2)$ и больше превышение температуры биметаллического элемента над температурой окружающей среды. Сила F пропорциональна ширине пластинки.

Температура превышения биметаллической пластинки ограничена допустимыми напряжениями сжатия и растяжения, возникающими при изгибе пластинки в пограничном слое. Эти напряже-

ния сжатия и растяжения не должны превышать напряжений, вызывающих остаточные деформации металла.

Широкое распространение в тепловых реле получили такие материалы, как инвар (например, ЭН-36) в сочетании с хромоникелевыми или молибденоникелевыми сталями.

Время срабатывания $t_{\text{ср}}$ биметаллического элемента при токе I :

$$t_{\text{ср}} = T_{63} \ln \frac{I^2 - I_0^2}{I^2 - I_{\text{погр}}^2}, \quad (3.36)$$

где T_{63} – постоянная нагрева биметаллического элемента, с;

I_0 – ток предварительного прогрева биметаллического элемента, А;

$I_{\text{погр}}$ – ток, при котором реле срабатывает за время $t \gg T_{63}$.

Этот ток называют пограничным или наибольшим током несрабатывания теплового реле, А.

Постоянная времени нагрева биметаллического элемента:

$$T_{63} = \frac{C_{\text{уд}} \gamma V}{K_{\text{T}} S_{\text{охл}}}, \quad (3.37)$$

где $C_{\text{уд}}$ – удельная теплоемкость металла, Дж/кг $^\circ\text{C}$;

γ – плотность биметалла, кг/м³;

V – объем биметалла, м³;

K_{T} – коэффициент теплопередачи боковых поверхностей пластинки, Вт/(м²· $^\circ\text{C}$);

$S_{\text{охл}}$ – поверхность охлаждения пластинки, м².

Выразим токи в относительных единицах:

$$k_i = \frac{I}{I_{\text{ном}}}; \quad k_{i \text{ погр}} = \frac{I_{\text{погр}}}{I_{\text{ном}}}; \quad k_{i 0} = \frac{I_0}{I_{\text{ном}}}. \quad \text{Тогда уравнение (3.36) за-}$$

пишем в виде:

$$t_{\text{ср}} = T_{63} \ln \frac{k_i^2 - k_{i 0}^2}{k_i^2 - k_{i \text{ погр}}^2}. \quad (3.38)$$

Если реле включается в холодном состоянии, то $k_{i 0} = 0$ и уравнение (3.38) запишется в виде:

$$t_{\text{ср}} = T_{6\text{э}} \ln \frac{k_i^2}{k_i^2 - k_{i \text{ погр}}^2} \quad (3.39)$$

На рисунке 3.18 приведены зависимости $t_{\text{ср}} = \varphi(k_i)$ для случая включения теплового реле с холодного и с горячего состояния.

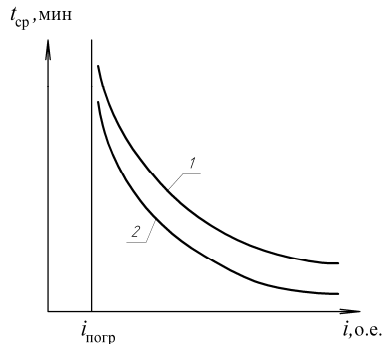


Рисунок 3.18 – Вид теоретической времятоковой характеристики теплового реле по уравнению (3.39):

- 1 – включение реле с холодного состояния;
- 2 – включение реле с прогретого состояния

При КЗ нагрев биметаллического теплового токового реле проходит без отдачи тепла в окружающую среду и время срабатывания определяется по выражению [60]:

$$t_{\text{ср}} = T_{6\text{э}} \frac{k_{i \text{ погр}}^2}{k_i^2} \quad (3.40)$$

Из уравнения (3.40) видно, что с увеличением k_i время срабатывания быстро уменьшается. Однако этого времени недостаточно для защиты от тока короткого замыкания (КЗ). Из-за инерционности теплового процесса тепловые токовые реле не способны защитить цепи от КЗ. Поэтому защита цепей от перегрузки с помощью тепловых токовых реле должна быть дополнена быстродействующей защитой от КЗ с помощью предохранителей или автоматических выключателей, имеющих электромагнитные расцепители.

На характеристику срабатывания теплового токового реле влияет окружающая температура. Оценить влияние температуры окружающей среды можно по следующей формуле:

$$I_{\text{ср}} = I_{\text{ср. ном}} \sqrt{\frac{\theta_{\text{ср}} - \theta_{\text{окр. ср}}}{\theta_{\text{ср}} - \theta_{\text{ср. ном}}}} \quad (3.41)$$

где $I_{\text{ср}}$ – ток, вызывающий температуру срабатывания $\theta_{\text{ср}}$ биметаллического элемента, А;

$I_{\text{ср. ном}}$ – ток, вызывающий номинальную температуру срабатывания $\theta_{\text{ср. ном}}$ биметаллического элемента, А;

$\theta_{\text{окр. ср}}$ – температура окружающей среды, °С.

Из формулы (3.41) видно, что ток срабатывания зависит от температуры окружающей среды: чем выше температура окружающей среды, тем меньше ток срабатывания. Для того чтобы температура окружающей среды меньше влияла на ток срабатывания, температуру срабатывания реле следует увеличивать до максимально допустимого значения. В то же время она должна быть такой, чтобы не вызывать необратимой деформации биметалла при КЗ в цепи электродвигателя. По этой причине обязательно следует использовать в цепи, где установлено тепловое реле, аппарат защиты от КЗ. В современных тепловых токовых реле конструктивным путем выполняется температурная компенсация влияния температуры окружающей среды на свойства реле.

3.6. Конструкции электротепловых токовых биметаллических реле

Конструкции электротепловых токовых биметаллических реле разнообразны, но все они содержат в каждой фазе биметаллическую пластинку с нагревателем. По нагревателю протекает ток электродвигателя. Изгибаясь, биметаллическая пластинка воздействует на систему рычагов, приводящих к размыканию контакта. При этом прекращается подача тока в катушку электромагнитного пускателя, он и электродвигатель отключаются от сети.

Для защиты асинхронных электродвигателей ранее использовались двухполюсные электротепловые токовые биметалли-

ческие реле ТРН. Нагреватели располагались рядом с биметаллическими пластинками в двух фазах, а в третьей они не устанавливались. Поскольку двигатель представляет собой трехфазную симметричную нагрузку, то считалось, что при пропадании тока в одной фазе остаются токи в двух других фазах. Ток потечет не менее чем через одно электротепловое реле, и этого достаточно. Однако опыт эксплуатации таких реле показал, что необходимо устанавливать нагреватели и в третьей фазе, т. е. использовать трехполюсные реле. Действительно, возможны случаи, когда в фазе *B*, в которой не устанавливались нагреватели и биметаллическая пластинка, возникали токи большие, чем в фазах *A* и *C*, имеющих тепловые элементы. На рисунке 3.19, *a* показано, что при асимметрии напряжений в сети 4 %, в фазе *B*, при номинальной нагрузке на валу электродвигателя, ток станет $1,3I_n$. В других фазах он составит $0,8I_n$ и $1,1I_n$.

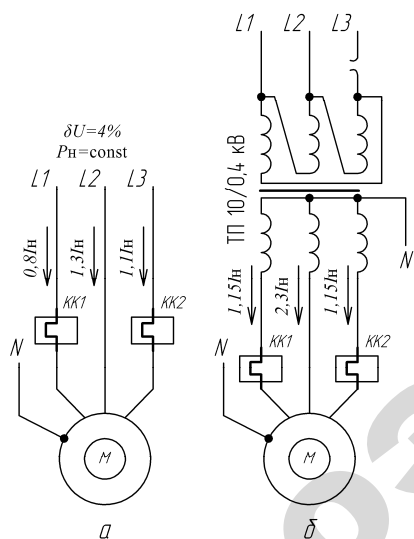


Рисунок 3.19 – Токи электродвигателя при асимметричной сети 0,4 кВ (*a*) и при обрыве провода на стороне 10 кВ (*б*)

Во втором случае, рисунок 3.19, *б*, при обрыве фазы *C* в сети 10 кВ, ток в фазе *B* может составить $2,3I_n$, а в двух других фазах,

имеющих электротепловые элементы, он составит меньшую величину – $1,15I_n$. По этим причинам современные электротепловые токовые биметаллические реле имеют в каждой фазе по нагревателю и биметаллическому элементу.

Наиболее совершенным по конструкции считается тепловое токовое реле фирмы SIEMENS с дифференциальным устройством отключения, представленным на рисунке 3.20.

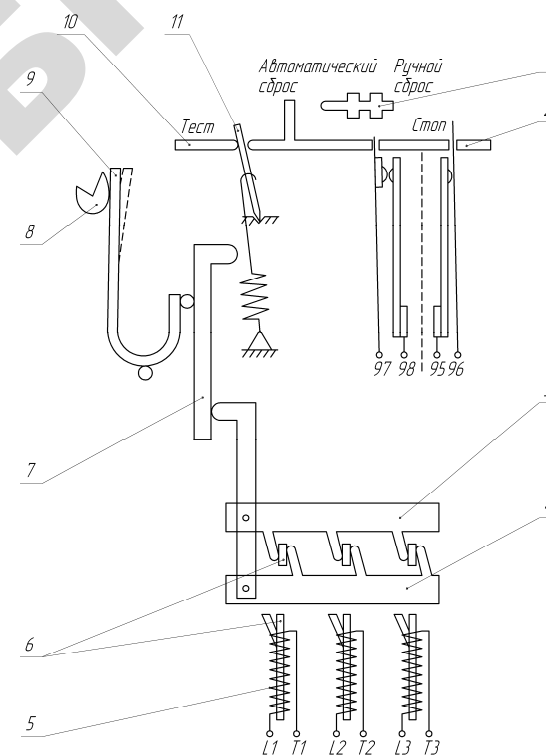


Рисунок 3.20 – Устройство электротеплового токового биметаллического реле фирмы SIEMENS с дифференциальным устройством отключения:

- 1 – переключение с автоматического сброса на ручной; кнопка «Сброс»;
- 2 – кнопка «Стоп»; 3 – верхняя пластина дифференциального устройства отключения; 4 – нижняя пластина дифференциального устройства отключения;
- 5 – нагреватель; 6 – биметаллическая пластинка; 7 – рычаг расцепления;
- 8 – кнопка регулирования; 9 – температурная компенсация; 10 – кнопка «Тест»;
- 11 – выключатель с балансирующим (качающимся) рычажком

Реле имеет три нагревателя 5, намотанные на биметаллические пластинки 6 и изолированные от них. Концы биметаллических пластинок размещаются между верхней 3 и нижней 4 пластинами дифференциального устройства.

При перегрузке по току в трехфазном режиме работы электродвигателя биметаллические пластины 6 изгибаются одинаково, отчего нижняя 4 и верхняя 3 пластины дифференциального устройства отключаются параллельно, вызывая перемещение нижнего конца рычага расцепления 7 влево. Верхний конец рычага 7 воздействует на пружину выключателя 11, перемещая ее вправо. Происходит отключение контактов реле.

При неполнофазном режиме работы электродвигателя ток протекает по двум нагревателям 5. Один нагреватель не работает, и конец биметаллической пластины неработающего нагревателя стоит неподвижно, задерживая перемещение нижней пластины 4 дифференциального устройства отключения. Другие нагреватели работают, их биметаллические пластины перемещают верхнюю пластину 3 влево. Происходит поворот оси планки 3 относительно оси планки 4, отчего рычаг устройства отключения имеет большее перемещение и происходит ускоренное отключение контактов реле.

Таким образом, в неполнофазном режиме тепловое токовое реле с дифференциальным устройством срабатывает ускоренно, с меньшими выдержками времени, чем в трехфазном режиме работы.

На рисунке 3.21 представлена упрощенная конструкция электротеплового токового биметаллического реле РТТ-2 российского производства.

В нормальном трехфазном режиме работы биметаллические пластинки изгибаются синхронно, толкая пластины 16–18 на одинаковое расстояние, отчего планки 19 и 20 поворачиваются вокруг осей 21 и 22 тоже синхронно. Зазор δ перекрывается при некотором токе перегрузки.

В неполнофазном режиме работы одна из биметаллических пластинок не изгибается и соответствующая ей толкающая пластинка своим выступом задерживает поворот планки 20. Другие две толкающие пластинки продолжают перемещать планку 19, отчего она поворачивается относительно оси 21 и воздействует на отключающую пружину 6. Отключение блок-контактов 5 происходит при том же токе раньше, чем в трехфазном режиме.

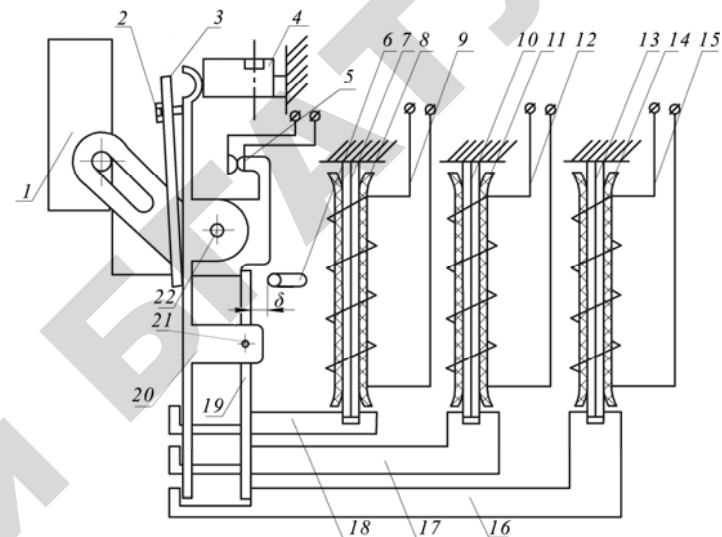


Рисунок 3.21 – Упрощенная конструкция электротеплового токового биметаллического реле РТТ-2:

- 1 – кнопка возврата контактов в исходное состояние;
 2 – винт заводской регулировки; 3 – биметаллическая пластинка температурной компенсации; 4 – указатель и регулятор тока уставки; 5 – блок-контакты;
 6 – отключающая пружина; 7, 10, 13 – рабочая биметаллическая пластинка;
 8, 11, 14 – теплостойкая изоляция; 9, 12, 15 – нагреватель; 16–18 – толкающая пластинка (повернута на 90°); 19, 20 – планка; 21, 22 – ось

Биметаллические тепловые токовые реле имеют нагреватели, которые обтекаются током фаз электродвигателя. Связь нагревателя и биметаллической пластинки может быть следующей:

- 1) нагреватель расположен рядом с биметаллической пластинкой. Этот вариант использовался в старых типах тепловых реле;
- 2) нагреватель намотан на биметаллическую пластинку;
- 3) биметаллическая пластинка является одновременно нагревателем;
- 4) комбинированный способ, т. е. сочетание второго и третьего способов.

Лучшие характеристики получаются при комбинированном нагреве, когда биметаллическая пластина нагревается и за счет проходящего через нее тока, и за счет тепла, выделенного специальным нагревателем, обтекаемым тем же током электродвигателя.

Преимущества биметаллических тепловых токовых реле состоят в том, что они дешевле других устройств защиты в связи с их массовым производством и применением в комплекте с электромагнитными пускателями.

Недостатки биметаллических тепловых токовых реле:

1) недостаточная стабильность характеристик во времени (в процессе эксплуатации характеристики биметалла реле и других частей изменяются из-за изменений молекулярной структуры материала от тепловых воздействий);

2) разброс параметров срабатывания, отчего требуется проверка реле и его настройка на нужный ток срабатывания при вводе его в эксплуатацию;

3) недостаточная коррозионная стойкость реле в условиях сельскохозяйственных помещений (коррозия приводит к изменению условий в трущихся частях реле и изменению защитных характеристик реле);

4) недостаточная устойчивость к токам КЗ, отчего требуются применение в цепи нагревателей аппаратов защиты от КЗ;

5) малый диапазон тока регулирования реле, отчего требуется иметь в хозяйстве большой арсенал реле. Например, в диапазоне только до 10 А требуется иметь 19 типоразмеров реле.

Указанные недостатки несовершенства электротепловых токовых биметаллических реле приводят к необходимости поиска альтернативных защитных средств.

Электротепловые токовые реле совершенствуются в следующих направлениях:

1) модернизируются биметаллические токовые реле с целью более эффективного использования;

2) создаются реле на новых принципах, например, на преобразовании тепловых воздействий от протекающего тока электродвигателя в изменение электрических или магнитных характеристик чувствительного элемента.

Область эффективного использования обычных тепловых токовых реле ограничена защитой электродвигателя от перегрузок в продолжительном режиме работы.

Реле может быть настроено и на конкретный повторно-кратковременный режим, если параметры последнего неизменны. Однако при переходе от одного режима работы электродвигателя к другому изменение теплового состояния электродвига-

теля и реле происходит неадекватно, что связано с различиями в скорости и характере протекания тепловых процессов в реле и в защищаемом электродвигателе. Для приближения защитной характеристики реле к перегрузочной характеристике электродвигателя при изменении его режима работы и теплового состояния требуется корректировка уставки теплового реле, что в обычных тепловых реле не применяется. По этой причине электротепловые токовые реле не используются для защиты электродвигателей тельферов и других подъемных механизмов, работающих в повторно-кратковременном режиме.

3.7. Параметры электротепловых токовых реле и их выбор

Электротепловые токовые реле характеризуются параметрами, по которым они выбираются. К ним относятся: номинальный ток реле; номинальный ток уставки реле; время срабатывания реле и др.

Номинальным током теплового токового реле называется наибольший номинальный ток уставки нагревательного элемента в данном корпусе, на который рассчитаны присоединительные зажимы и который приводит к нагреванию частей теплового реле до установившейся номинальной температуры, меньшей допустимой температуры.

Номинальный ток уставки реле нагревательного элемента – это средний ток диапазона регулирования тока несрабатывания реле.

Током несрабатывания реле (или пограничным током) называется среднеарифметическое значение между максимальным током несрабатывания, при котором реле не срабатывает в течение часа, и током, при котором реле срабатывает в течение часа. По-другому определению, *током несрабатывания реле* называется ток, время срабатывания при котором превышает 4 постоянные времени нагревания реле.

Время срабатывания реле – это время от начала протекания тока, превышающего уставку реле, до момента размыкания его контактов. Различают время срабатывания реле с горячего и холодного состояний.

Основной характеристикой электротеплового токового реле является зависимость времени срабатывания от тока перегрузки. Эта характеристика называется *времятоковой* (рисунок 3.22).

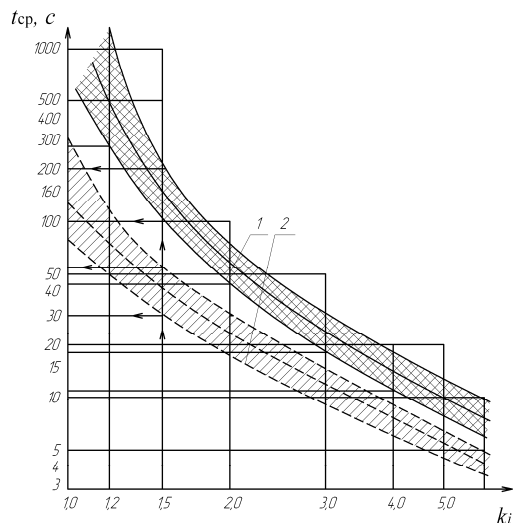


Рисунок 3.22 – Времятоковые характеристики реле типов РТТ-0, РТТ-1, РТТ-2, РТТ-4:

1 – зона времятоковых характеристик при работе трех полюсов реле; 2 – зона времятоковых характеристик при работе двух полюсов реле с ускорением срабатывания (верхние значения зоны соответствуют холодному состоянию реле, нижнее – горячему)

Тепловое токовое реле выбирается по току электродвигателя.

1. Номинальный ток уставки реле выбирается по номинальному току защищаемого электродвигателя так, чтобы последний находился в зоне регулировки номинального тока несрабатывания теплового реле:

$$I_{\text{вст. мин}} < I_{\text{ном. дв}} < I_{\text{вст. макс}} \quad (3.42)$$

где $I_{\text{вст. мин}}$, $I_{\text{вст. макс}}$ – границы изменения уставки теплового расцепителя, А;

$I_{\text{ном. дв}}$ – номинальный ток электродвигателя, А.

Если условие (3.42) выполняется для тепловых реле двух номиналов, то выбирается тепловое реле с меньшим током, чтобы обеспечить возможность регулирования в сторону повышения чувствительности защиты.

Для электродвигателей, имеющих коэффициент загрузки менее 0,7, тепловые реле могут быть выбраны по фактическому току электродвигателя. При этом ток уставки теплового реле:

$$I_{\text{фак. дв}} \leq I_{\text{уст}} \leq I_{\text{ном. дв}} \quad (3.43)$$

где $I_{\text{фак. дв}}$ – фактический ток электродвигателя, А.

Выбранные по условию (3.42) или (3.43) тепловые реле проверяются на условие допустимой продолжительности $t_{6, \text{ср}}$ протекания 6-кратного тока несрабатывания реле с холодного состояния по формуле [61]

$$t_{6, \text{ср}} \leq 0,018 \left[1 - K_{\alpha} \left(\frac{i_n^2}{36} - 1 \right) \right] i_n^2 \frac{(\theta'_{\text{max}} - 40)}{v_t} \quad (3.44)$$

где $t_{6, \text{ср}}$ – допустимая продолжительность протекания 6-тикратного тока несрабатывания реле с холодного состояния: 9 с – для РТЛ-1000; 12 с – для РТЛ-2000; 8 с – для РТЛ-3000; 8 с – для РТТ-1; 12 с – для РТТ-2; 8 с – для РТТ-2П; 7 с – для РТТ-5;

K_{α} – коэффициент, учитывающий отклонение защитной характеристики теплового реле от адиабаты: $K_{\alpha} = 0,3$ для РТЛ-1000; $K_{\alpha} = 0,2$ для РТЛ-2000, РТТ-1, РТТ-2 и РТТ-5;

i_n – кратность пускового тока защищаемого электродвигателя;

θ'_{max} – предельное допустимое значение температуры обмотки для класса изоляции электродвигателя (таблица 3.2), °С;

v_t – скорость роста температуры обмотки в режиме неподвижного ротора, °С/с [5].

Если правая часть выражения (3.44) окажется меньше значений $t_{6, \text{ср}}$, приведенных выше, то следует брать другой тип теплового реле с меньшим значением времени срабатывания реле при 6-кратном токе с холодного состояния или использовать другой тип устройства защиты (например, температурную защиту).

2. Кроме этого, тепловые реле выбирают по степени инерционности (только для серии РТТ-2). Инерционность теплового реле оценивается временем срабатывания реле при шестикратном токе

несрабатывания. Для электроприводов с затяжным пуском, если $t_{\text{пуск}} > 5$ с, выбираются инерционные реле.

3. Третий параметр выбора – по виду контакта вспомогательной цепи реле:

- 1) с размыкающим контактом;
- 2) с переключающим контактом.

Замыкание переключающего контакта можно использовать для сигнализации.

4. Четвертый параметр выбора – по способу установки (монтажа) электротеплового токового реле. Оно может устанавливаться отдельно или монтироваться к электромагнитному пускателью (более частый вариант).

Выбор указанных выше параметров зашифрован в структуре условного обозначения реле.

3.8. Технические данные электротепловых токовых реле

Реле электротепловые токовые серии РТЛ применяются совместно с электромагнитными пускателями серии ПМЛ. Реле 1-го и 2-го габаритов крепятся непосредственно к корпусу пускателей. Они же могут устанавливаться отдельно с помощью клеммников КРЛ-104 (для 1-го габарита) и КРЛ-204 (для 2-го габарита). Реле 3-го габарита предназначены для индивидуальной установки и присоединяются к контактам ПМЛ при помощи перемычек.

Тепловые реле РТЛ имеют: три полюса; температурный компенсатор; механизм для ускоренного срабатывания при обрыве фазы; регулятор тока несрабатывания; ручной возврат; один замыкающий и один размыкающий контакты или размыкающий контакт для реле 1-го и 2-го габаритов; размыкающий контакт для реле 3-го габарита; переднее присоединение внешних проводников; несменные нагревательные элементы.

Технические данные электротепловых реле РТЛ приведены в таблице 3.6.

Таблица 3.6 – Технические данные электротепловых реле серии РТЛ

Тип реле	Пределы регулирования номинального тока несрабатывания, А	Номинальный ток реле, А	Мощность, потребляемая 1 полюсом реле не более, Вт
РТЛ-1001-04	0,1...0,17	25	1,7-2,8
РТЛ-1002-04	0,16...0,26		
РТЛ-1003-04	0,24...0,40		
РТЛ-1004-04	0,38...0,65		
РТЛ-1005-04	0,61...1,0		
РТЛ-1006-04	0,95...1,6		
РТЛ-1007-04	1,5...2,6		
РТЛ-1008-04	2,4...4,0		
РТЛ-1010-04	3,8...6,0		
РТЛ-1012-04	5,5...8,0		
РТЛ-1014-04	7,0...10	80	3,6...5,7
РТЛ-1016-04	9,5...14		
РТЛ-1021-04	13...19		
РТЛ-1022-04	18...25		
РТЛ-2053-04	23...32		
РТЛ-2055-04	30...41		
РТЛ-2057-04	38...52		
РТЛ-2059-04	47...64		
РТЛ-2061-04	54...74	200	5,4...12,3
РТЛ-2063-04	63...86		
РТЛ-3105-04С	75...105		
РТЛ-3125-04С	90...125		
РТЛ-3160-04С	115...160		
РТЛ-3200-04С	145...200		

Реле серии РТЛ имеют следующие характеристики: время срабатывания при токе $1,2I_{\text{н,расц}}$ составляет 20 мин; время возврата

– не менее 1,5 мин; время срабатывания при токе $6I_{н.расц}$ – (4,5–9) с для 1 габарита, (4,5–12) с для 2 габарита, (4,5–8) с для 3 габарита.

Структура условного обозначения электротепловых токовых реле серии РТЛ следующая:

$$РТЛ - X_1X_2X_3X_4 - 04С,$$

где РТЛ – серия электротепловых токовых реле;

X_1 – исполнение по номинальному току реле (габарит): 1 – на 25 А; 2 – на 80 А; 3 – на 200 А;

$X_2X_3X_4$ – исполнение по току несрабатывания (см. таблицу 3.6);

04 – климатическое исполнение 0, категория размещения 4 (ГОСТ 15150-69 и ГОСТ 15543-70). Реле допускает применение в категории размещения 3 при отсутствии вредных отложений пыли, песка, воздействия атмосферных осадков;

С – наличие одного размыкающего контакта; отсутствие буквы означает исполнение реле с одним замыкающим и одним размыкающим контактами.

Пример записи обозначения реле РТЛ с диапазоном регулирования тока уставки реле от 2,4 до 4 А, для втычного присоединения к электромагнитному пускателю, с 1 замыкающим и 1 размыкающим контактами:

РТЛ-1008-04; номинальный ток уставки реле 3,2 А.

Реле электротепловые токовые серии РТТ имеют несъемные нагреватели, температурный компенсатор, регулятор уставки токов несрабатывания, кнопку ручного возврата, один размыкающий либо переключающий контакт.

Для электродвигателей с током до 10 А рекомендуются тепловые токовые реле серии РТТ-5-10. Они могут устанавливаться на пускатели типа ПМ-12-010 втычным способом присоединения либо отдельно с помощью клеммника типа КР5-10.

Реле тепловые токовые РТТ5-10 имеет следующие параметры и характеристики:

1) номинальный ток реле составляет 10 А, номинальный ток вспомогательных контактов – 6,3 А; потребляемая мощность одним полюсом реле – не более 1,75 Вт;

2) время срабатывания реле при трехполюсной работе и нагреве с холодного состояния 6-кратным номинальным током несрабаты-

вания при любом положении регулятора уставки и температуре окружающей среды 20 °С находится в пределах 3–7 с;

3) время срабатывания при включении 6-ти кратного номинального тока несрабатывания с нагретого состояния реле после длительного протекания номинального тока несрабатывания составляет не менее 0,5 с;

4) ток срабатывания реле при отсутствии тока в одном из полюсов (аварийный режим работы электродвигателя) при минусовом положении регулятора вставки не превышает 0,95, в других положениях – 0,87 от тока срабатывания при протекании тока по всем полюсам реле;

5) во всем интервале рабочих температур ток несрабатывания и срабатывания при любом положении регулятора уставки изменяется не более чем на 2,5 % на каждые 10 °С;

6) реле термически стойки при однократной перегрузке 18-кратным током несрабатывания при среднем положении уставки реле в течение 0,5 с;

7) температура окружающего воздуха – от –40 °С до +55 °С.

Обозначения типоразмеров реле РТТ5 и диапазон токов несрабатывания приведены в таблице 3.7.

Таблица 3.7 – Обозначения типоразмеров реле серии РТТ5 и диапазоны регулирования токов несрабатывания

Тип реле	Диапазон регулирования номинального тока несрабатывания $I_{расц}$, А	Условное обозначение диапазона регулирования номинального тока несрабатывания
1	2	3
РТТ5-10-011 (РТТ5-10-012)	0,10 – 0,12 – 0,14	01
РТТ5-10-021 (РТТ5-10-022)	0,13 – 0,16 – 0,18	02
РТТ5-10-031 (РТТ5-10-032)	0,17 – 0,20 – 0,23	03
РТТ5-10-041 (РТТ5-10-042)	0,21 – 0,25 – 0,29	04
РТТ5-10-051 (РТТ5-10-052)	0,27 – 0,32 – 0,37	05
РТТ5-10-061 (РТТ5-10-062)	0,34 – 0,40 – 0,46	06
РТТ5-10-071 (РТТ5-10-072)	0,42 – 0,50 – 0,58	07
РТТ5-10-081 (РТТ5-10-082)	0,54 – 0,63 – 0,72	08
РТТ5-10-091 (РТТ5-10-092)	0,68 – 0,80 – 0,92	09
РТТ5-10-101 (РТТ5-10-102)	0,85 – 1,00 – 1,15	10

Окончание таблицы 3.7

1	2	3
РТТ5-10-111 (РТТ5-10-112)	1,10 – 1,25 – 1,40	11
РТТ5-10-121 (РТТ5-10-122)	1,36 – 1,60 – 1,84	12
РТТ5-10-131 (РТТ5-10-132)	1,70 – 2,00 – 2,30	13
РТТ5-10-141 (РТТ5-10-142)	2,10 – 2,50 – 2,90	14
РТТ5-10-151 (РТТ5-10-152)	2,70 – 3,20 – 3,70	15
РТТ5-10-161 (РТТ5-10-162)	3,40 – 4,00 – 4,60	16
РТТ5-10-171 (РТТ5-10-172)	4,20 – 5,00 – 9,80	17
РТТ5-10-181 (РТТ5-10-182)	5,40 – 6,40 – 7,40	18
РТТ5-10-191 (РТТ5-10-192)	7,00 – 8,50 – 10,0	19

Примечание. В скобках указаны типоразмеры реле с переключающим контактом.

Структура условного обозначения электротеплового реле серии РТТ5 следующая:

$$РТТ5 - 10 - X_1 X_2 X_3 X_4 X_5 X_6 X_7,$$

где РТТ5 – серия электротепловых токовых реле;

10 – условное обозначение номинального тока реле на 10 А;

$X_1 X_2$ – условное обозначение диапазона регулирования номинального тока несрабатывания (таблица 3.7);

X_3 – условное обозначение по способу возврата и роду контактов вспомогательной цепи:

1 – возврат ручной, исключающий самовозврат, с одним размыкающим контактом;

2 – возврат ручной, исключающий самовозврат, с одним переключающим контактом;

$X_4 X_5 X_6 X_7$ – условное обозначение климатического исполнения и категории размещения по ГОСТ 15150-69.

Пример записи обозначения реле серии РТТ5 на ток несрабатывания 1,1–1,4 А, с ручным возвратом, с размыкающим контактом, степени защиты IP00 (для установки в шкафу):

реле РТТ-5-10-11УХЛ4; IP00; ТУ-16-88, ИГФР.647316.008ТУ.

Реле тепловые токовые серии РТТ1 рассчитаны на токи до 40 А. Основные параметры реле серии РТТ1 приведены в таблице 3.8.

Таблица 3.8 – Основные параметры электротепловых реле серии РТТ1 на номинальный ток 40 А

Диапазон регулирования номинального тока несрабатывания, А	Ток уставки (условное обозначение)	Наибольший ток (А) продолжительного режима при температуре окружающей среды		Мощность, потребляемая одним полюсом реле Вт, не более	Номинальное сечение внешних изолированных проводников при материале токопроводящей жилы, мм ²	
		40 °С	55(60)* °С		медь	алюминий
1	2	3	4	5	6	7
0,17-0,23	0,20	0,23	0,23	1,30	1,0	2,5
0,21-0,29	0,25	0,29	0,29	1,35	1,0	2,5
0,27-0,37	0,32	0,37	0,37	1,40	1,0	2,5
0,34-0,46	0,40	0,46	0,46	1,45	1,0	2,5
0,42-0,58	0,50	0,58	0,58	1,45	1,0	2,5
0,54-0,72	0,63	0,72	0,72	1,50	1,0	2,5
0,68-0,92	0,80	0,92	0,92	1,50	1,0	2,5
0,85-1,15	1,00	1,15	1,15	1,50	1,0	2,5
1,10-1,40	1,25	1,40	1,40	1,55	1,0	2,5
1,36-1,84	1,60	1,84	1,84	1,55	1,0	2,5
1,70-2,30	2,00	2,30	2,30	1,60	1,0	2,5
2,10-2,90	2,50	2,90	2,90	1,60	1,0	2,5
2,70-3,70	3,20	3,70	3,70	1,60	1,0	2,5
3,40-4,60	4,00	4,60	4,60	1,60	1,0	2,5
4,25-5,75	5,00	5,75	5,75	1,65	1,0	2,5
5,35-7,23	6,30	7,23	7,23	1,75	1,0	2,5
6,80-9,20	8,00	9,20	8,70	1,80	1,0	2,5
8,50-11,5	10,0	11,5	10,0	1,85	1,0	2,5
10,6-14,3	12,5	14,3	12,5	1,85	1,5	2,5
13,6-18,4	16,0	18,4	16,0	1,90	2,5	4,0
17,0-23,0	20,	23,0	20,0	2,00	2,5	6,0
21,3-5,0**	25,0	25,0	23,0	2,10	4,0	6,0
21,2-28,7	25,0	28,7	25,0	2,10	4,0	6,0

Окончание таблицы 3.8

1	2	3	4	5	6	7
28,0-40,0	34,0	40,0	34,0	2,50	6,0	10,0
□ Для температуры окружающей среды 60 °С нагрев выводов проводников присоединения не нормируется.						
** Для комплектования электромагнитных пускателей типов ПМЕ-200, ПМ12-025.						

Реле тепловые токовые серии РТТ2 рассчитаны на номинальный ток 63 А. Основные параметры реле серии РТТ2 приведены в таблицах 3.9 и 3.10.

Таблица 3.9 – Основные параметры реле серии РТТ2 на номинальный ток 63 А

Диапазон регулирования номинального тока несрабатывания, А	Ток уставки (условное обозначение)	Наибольший ток (А) продолжительного режима при температуре окружающей среды		Мощность, потребляемая одним полюсом реле, Вт, не более	Номинальное сечение внешних изолированных проводников при материале токопроводящей жилы, мм ²	
		40 °С	55 °С*		медь	алюминий
8,50-11,5	10	11,5	11,5	1,80	1,0	2,5
10,6-14,3	12,5	14,3	14,3	1,81	1,5	2,5
13,6-18,4	16	18,4	18,4	1,90	2,5	4,0
17,0-23,0	20	23,0	23,0	2,00	2,5	6,0
21,2-28,7	25	28,7	28,7	2,10	4,0	6,0
27,2-36,8	32	26,8	26,8	2,30	6,0	10,0
34,0-46,0	40	46,0	46,0	2,55	10,0	16,0
42,5-57,5	50	57,5	55,0	2,95	16,0	25,0

Окончание таблицы 3.9

1	2	3	4	5	6	7
53,5-63	63**	63,0	60,0	3,60	16,0	25,0
53,5-72,3	63	72,3	68,5	360	25,0	35,0
* Для температуры окружающей среды 60 °С нагрев выводов проводников присоединения не нормируется.						
** Реле предназначены только для комплектации электромагнитных пускателей типа ПМА-400 и ПМ12-063 на номинальный ток 63 А.						

Таблица 3.10 – Время срабатывания реле серии РТТ2 при трехполюсной работе и нагреве с холодного состояния шестикратным номинальным током несрабатывания при любом положении регулятора вставки и температуре окружающей среды 20 °С

Тип реле	Степень инерционности	Время срабатывания реле при 6-кратном номинальном токе несрабатывания, с
РТТ21, РТТ211	Повышенная	6–12
РТТ21П, РТТ211П	Пониженная	4–8
<i>Примечание.</i> Допускается при минусовом положении регулятора уставки увеличение времени срабатывания на 1 с.		

Структура условного обозначения реле серии РТТ1 и РТТ2 следующая:

РТТ X₁ X₂ X₃ X₄ X₅ 4,

где РТТ – серия электротепловых токовых реле;

X₁ – номинальный ток реле:

1 – исполнение на 40 А (РТТ1);

2 – исполнение на 63 А (РТТ2);

X₂ – способ установки реле:

1 – исполнение на все токи для индивидуальной установки;

2 – исполнение на 40 А (РТТ1) для втычного подсоединения к электромагнитному пускателю ПМ12-040;

3 – исполнение на 40 А (РТТ1) для втычного подсоединения к электромагнитному пускателю ПМ12-025; на 63 А (РТТ2) для втычного подсоединения к электромагнитному пускателю ПМ12-063;

4 – исполнение на 40 А (РТТ1) для подсоединения к электромагнитным пускателям ПМЕ-200 и ПМА-300;

X_3 – род контактов вспомогательной цепи реле:

1 – с размыкающим контактом; отсутствие цифры означает переключающий контакт;

X_4 – обозначение исполнения реле по величине инерционности:

П – пониженная инерционность (только для РТТ2); отсутствие буквы обозначает реле повышенной инерционности;

X_5 – климатическое исполнение: УХЛ1; 0;

4 – категория размещения 4.

Пример записи обозначения реле РТТ2 с диапазоном регулирования от 13,6 до 18,4 А, для втычного присоединения к электромагнитному пускателю ПМ12-063, с переключающим контактом, пониженной инерционности, для использования в умеренном климате:

Реле РТТ23ПУХЛ4, 16А.ТВ16-647.024-85.

Реле РТТ выпускает Кашинский завод электроаппаратуры (Россия).

Электротепловые токовые реле серии РТИ предназначены для защиты электродвигателей от перегрузки. Устанавливаются непосредственно на контакторах серии КМИ. Электротепловое реле серии РТИ относится к новому поколению коммутационной аппаратуры и выпускается в трех типоразмерах на токи до 93 А.

Технические характеристики реле РТИ

Мощность защищаемого электродвигателя...	0,37–55,0 кВт.
Частота тока	50 Гц.
Степень защиты.....	IP20.
Температура окружающей среды.....	– 30 ... +55 °С.

Особенности конструкции реле РТИ

1. Реле пломбируется прозрачной крышкой, защищающей диск регулировки уставки. Это исключает несанкционированный доступ к регулировкам значений тока уставки.

2. Процесс повторного включения может происходить в двух режимах: ручном и автоматическом.

3. О текущем состоянии размыкающих и замыкающих контактов информирует индикатор на передней панели.

4. Наличие кнопки «Тест» позволяет проверить работоспособность аппарата до его подключения в силовую цепь.

5. Наличие поверхности для нанесения маркировки позволяет сделать указание на соответствие схеме, в которой используется реле, что упрощает монтаж (рисунок 3.23).

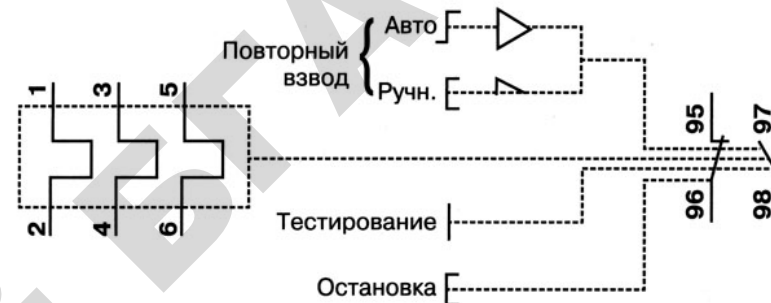


Рисунок 3.23 – Электрическая схема электротеплового токового реле серии РТИ

Внешний вид электротеплового токового реле серии РТИ представлен на рисунке 3.24.

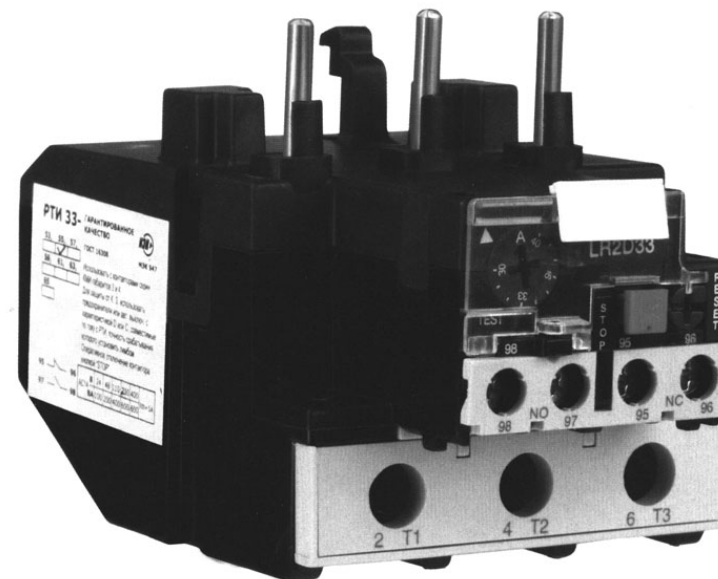


Рисунок 3.24 – Электротепловое токовое реле серии РТИ

Таблица 3.11 – Технические данные электротепловых токовых реле серии РТИ

Тип реле	Габарит	Предел регулирования тока уставки, А	Тип контакторов, используемых с реле
РТИ-1301	1	0,1÷0,16	КМИ-10910, КМИ-10911
РТИ-1302	1	0,16÷0,25	КМИ-10910, КМИ-10911
РТИ-1303	1	0,25÷0,4	КМИ-10910, КМИ-10911
РТИ-1304	1	0,4÷0,63	КМИ-10910, КМИ-10911
РТИ-1305	1	0,63÷1,0	КМИ-10910, КМИ-10911
РТИ-1306	1	1,0÷1,6	КМИ-10910, КМИ-10911
РТИ-1307	1	1,6÷2,5	КМИ-10910, КМИ-10911
РТИ-1308	1	2,5÷4,0	КМИ-10910, КМИ-10911
РТИ-1310	1	4,0÷6,0	КМИ-10910, КМИ-10911
РТИ-1312	1	5,5÷8,0	КМИ-10910, КМИ-10911
РТИ-1314	1	7,0÷10,0	КМИ-10910, КМИ-10911
РТИ-1316	1	9,0÷13,0	КМИ-11210, КМИ-11211
РТИ-1321	1	12,0÷18,0	КМИ-11810, КМИ-11811
РТИ-1322	1	17,0÷25,0	КМИ-22510, КМИ-22511
РТИ-2353	2	28,0÷36,0	КМИ-23210, КМИ-23211
РТИ-3353	3	23,0÷32,0	КМИ-35012, КМИ-46512
РТИ-3355	3	30,0÷40,0	КМИ-35012, КМИ-46512
РТИ-3357	3	37,0÷50,0	КМИ-46512
РТИ-3359	3	48,0÷65,0	КМИ-46512
РТИ-3361	3	55,0÷70,0	КМИ-46512
РТИ-3363	3	63,0÷80,0	КМИ-48012
РТИ-3365	3	80,0÷93,0	КМИ-49512

Защитные характеристики электротеплового токового реле серии РТИ представлены на рисунке 3.25.

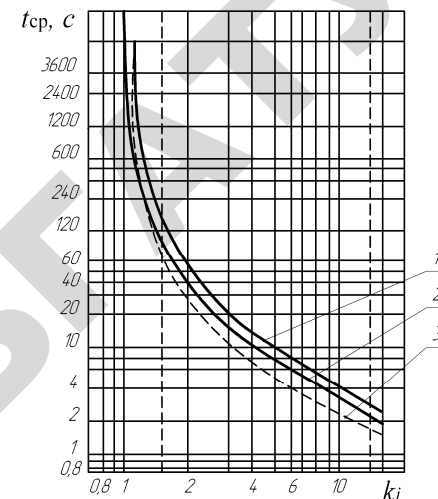


Рисунок 3.25 – Защитные характеристики электротеплового токового реле серии РТИ:

1 – симметричный трехфазный режим с холодного состояния; 2 – симметричный двухфазный режим с холодного состояния; 3 – симметричный трехфазный режим после длительного протекания номинального тока (горячее состояние)

3.9. Проверка и настройка электротепловых токовых реле

Проверку и настройку электротепловых токовых реле на пункте технического обслуживания рекомендуется проводить по схеме, представленной на рисунке 3.26.

В этой схеме используют два одинаковые электротепловые реле, одно из которых (КК2) настраивают на нужный ток, а другое требуется только для наладки схемы испытаний на требуемый ток. Это нужно для того, чтобы исключить временную погрешность от установки требуемого тока испытаний. В этой схеме требуемый ток испытаний устанавливается в режиме «Наладка».

Сначала SA ставят в положение «Наладка». Поворачивают ручку лабораторного автотрансформатора TVI, тем самым увеличивают ток в цепи реле КК1 до требуемого значения.

Не меняя положение рукоятки автотрансформатора, переключают SA в положение «Испытание». Включается КМ и электросекундомер. Ток испытаний проходит по нагревателям реле КК2 и через

некоторое время оно срабатывает, т. е. отключится контакт реле $KK2$, разорвется цепь катушки реле KM и электросекундомера PT , а затем и нагревателей $KK2$.

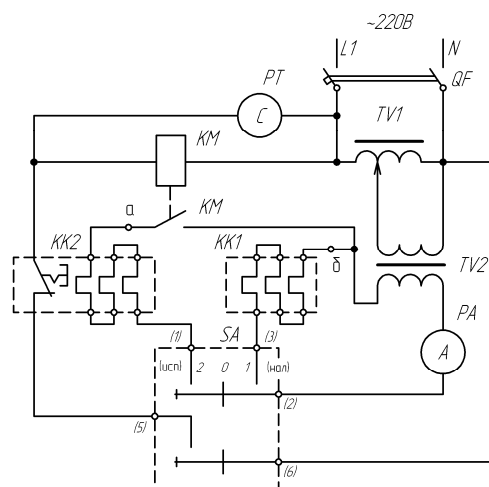


Рисунок 3.26 – Принципиальная электрическая схема стенда для испытания теплового токового реле током до 40 А:

QF – автоматический выключатель ВА47-29/4/10Д; $TV1$ – ЛАТР-2; $TV2$ – трансформатор ПОС-2-50, 300 ВА; KM – электромагнитный пускатель ПМ12-040100УХЛ; PT – электрический секундомер Щ-53; PA – амперметр

Различают три варианта настройки теплового токового реле:

- 1) установить, какому току уставки соответствует данное положение регулятора несрабатывания реле;
- 2) настроить тепловое токовое реле опытным путем на требуемое значение тока уставки;
- 3) установить регулятор тока несрабатывания на требуемое значение.

Для первого варианта настройки, когда требуется установить, какому току уставки соответствует данное положение регулятора несрабатывания реле, необходимо снять защитную характеристику реле в данном положении регулятора, используя схему, представленную на рисунке 3.26.

По результатам опытов строят защитную характеристику электротеплового реле (рисунок 3.27).

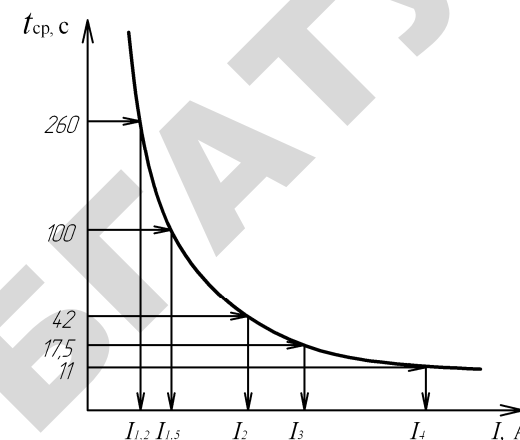


Рисунок 3.27 – Определение тока уставки электротеплового реле по опытной защитной характеристике

Далее необходимо воспользоваться контрольными точками защитной характеристики реле, приведенными в его паспортных данных или в справочнике. Например, реле РТТ1 с горячего состояния имеет следующие характерные точки на защитной характеристике: при токе $1,2 I_{\text{ном. уст}}$ время срабатывания теплового реле $t_{\text{cp } 1,2} \geq 260$ с; при токе $1,5 I_{\text{ном. уст}}$ время срабатывания $t_{\text{cp } 1,5} \geq 100$ с; при токе $2 I_{\text{ном. уст}}$ время срабатывания $t_{\text{cp } 2} \geq 42$ с; при токе $3 I_{\text{ном. уст}}$ время срабатывания $t_{\text{cp } 3} \geq 17,5$ с; при токе $4 I_{\text{ном. уст}}$ время срабатывания $t_{\text{cp } 4} \geq 11$ с.

На опытной защитной характеристике реле (рисунок 3.27) для времени 260 с находят ток $I_{1,2}$, для 100 с – ток $I_{1,5}$, для 42 с – ток I_2 , для 17,5 с – ток I_3 , для 11 с – ток I_4 (рисунок 3.27). Индексы при токах $I_{1,2}$, $I_{1,5}$, I_2 , I_3 , I_4 означают кратности тока уставки реле. Времени 260 с ток уставки соответствует $I_{1,2}/1,2$, времени 100 с – $I_{1,5}/1,5$, времени 42 с – $I_2/2$, времени 17,5 с – $I_3/3$, времени 11 с – $I_4/4$.

Рассчитывают ток уставки как среднее арифметическое из пяти значений по формуле:

$$I_{\text{ном. уст}} = \frac{I_{1,2}/1,2 + I_{1,5}/1,5 + I_2/2 + I_3/3 + I_4/4}{5}. \quad (3.45)$$

Опыт следует проводить после предварительного прогрева реле током, а между опытами делать одинаковый промежуток времени (20–30 с), чтобы обеспечить одинаковую температуру биметаллической пластинке во всех опытах.

- Во втором варианте настройки требуется настроить тепловое токовое реле опытным путем на требуемое значение тока уставки.

- Предположим, требуется настроить тепловое токовое реле РТТ121УХЛ4 с номинальным током вставки 0,32 А на ток уставки 0,28 А. Предположим, что надо это выполнить в производственных условиях.

В этом случае можно применить упрощенную схему проверки без электросекундомера и контактора. Необходим переносной аппарат настройки, который включает автоматический выключатель *QF*, автотрансформатор *TV1*, понижающий трансформатор *TV2* и амперметр *PA*. Собирают схему, показанную на рисунке 3.28.

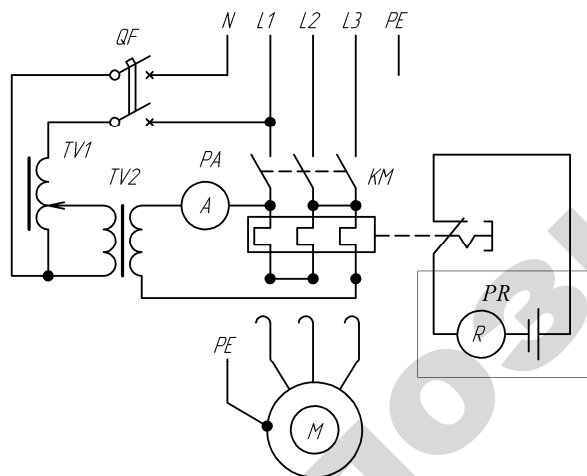


Рисунок 3.28 – Принципиальная электрическая схема для настройки электротеплового токового реле на требуемое значение тока уставки:
PR – электроизмерительный прибор (Омметр)

Провода, идущие от теплового реле к электродвигателю, отсоединяют. Устанавливают регулятор тока несрабатывания в наибольшее положение. Прогревают реле током, в 1,5 раза превышающим номинальный ток, т. е. $0,28 \cdot 1,5 = 0,42$ А, и, как только реле сработало (определяют по омметру), отключают *QF*.

Примерно через 30 с нажимают на указатель срабатывания. После того как он защелкнется (замкнется цепь омметра), включают *QF* и в цепи потечет ток $1,5 I_{\text{ном. уст}}$ (в нашем случае – 0,42 А). С этого момента засекают время работы реле с помощью ручных часов, поддерживают ток неизменным и равным 0,42 А.

Вставляют отвертку в гнездо регулятора тока срабатывания. При отсчете времени работы 95 с поворачивают регулятор тока несрабатывания в сторону уменьшения уставки до момента срабатывания реле. Эта регулировка должна быть продолжительностью не более 5 с. Отключают *QF*. Затем, после защелкивания указателя срабатывания, повторяют опыт, убеждаются, что реле срабатывает за 100 с при токе $1,5 I_{\text{ном. уст}}$.

Таким образом, в этом варианте настройки достаточно взять одну контрольную точку ($1,5 I_{\text{ном. уст}}$, 100 с) и по ней настроить реле на ток $I_{\text{ном. уст}}$ (в нашем случае на ток 0,28 А).

- В третьем варианте настройки, если необходимо установить регулятор тока несрабатывания на требуемое значение тока уставки, то поступают следующим образом. Устанавливают цену деления регулятора тока несрабатывания для данного типа реле. Реле типа РТТ имеет 10 делений регулятора тока несрабатывания и допускает регулировку тока несрабатывания в диапазоне $(0,85 - 1,15) I_{\text{ном. уст}}$, следовательно, цена деления составляет $0,03 I_{\text{ном. уст}}$. Например, для указанного ранее реле РТТ-121 с номинальным током несрабатывания (уставки) 0,32 А цена 1 деления составит $0,03 \cdot 0,32 = 0,0096$ А. Значит, при настройке на ток 0,28 А следует повернуть регулировочный винт от среднего положения в сторону уменьшения на $N = (0,32 - 0,28)/0,0096 = 4,17$ деления.

Если используется реле серии РТЛ, то необходимо иметь в виду, что зубчатая рейка регулятора тока несрабатывания имеет 20 положений.

В этом случае цена одного деления шкалы $C = 0,05$ от диапазона регулирования.

Например, реле РТЛ-100504 имеет диапазон регулирования тока несрабатывания от 0,61 до 1,0 А. Цена одного деления составит $C = 0,05(1-0,61) = 0,0195$ А. Если необходимо настроить реле на уставку несрабатывания 0,8 А, то от верхнего значения уставки надо отступить на $N = (1-0,8)/0,0195 \approx 10$ делений.

При эксплуатации уставка реле изменяется вследствие старения биметалла и, в большей степени, вследствие окисления трущихся частей. Поэтому тепловые реле следует подвергать настройке при вводе установки в эксплуатацию и периодически проверять уставку реле в процессе эксплуатации. Периодичность проверки должна быть не реже, чем 1 раз в 5 лет для реле, установленных в сухих помещениях; 1 раз в 3 года для реле, установленных во влажных и сырых помещениях; ежегодно в помещениях особо сырых или с химически активной средой.

Профилактическая проверка реле, находящегося в эксплуатации, состоит в настройке реле на требуемый ток по второму варианту настройки, с использованием схемы рисунка 3.28.

Тепловые токовые реле после отключения внимательно рассматривают, очищают. Тепловые реле, у которых обнаружено коробление нагревательных элементов или коррозия деталей механизма, подлежат замене и ремонту в стационарных условиях с последующей настройкой.

3.10. Защита асинхронного трехфазного электродвигателя при перегрузке с контролем коэффициента мощности

Защита электродвигателя при перегрузке с контролем коэффициента мощности ($\cos \varphi$) основана на том факте, что с увеличением нагрузки на валу электродвигателя (от холостого хода до номинальной нагрузки) его коэффициент мощности растет (рисунок 3.29). Следовательно, предполагается, что и при перегрузке он увеличивается.

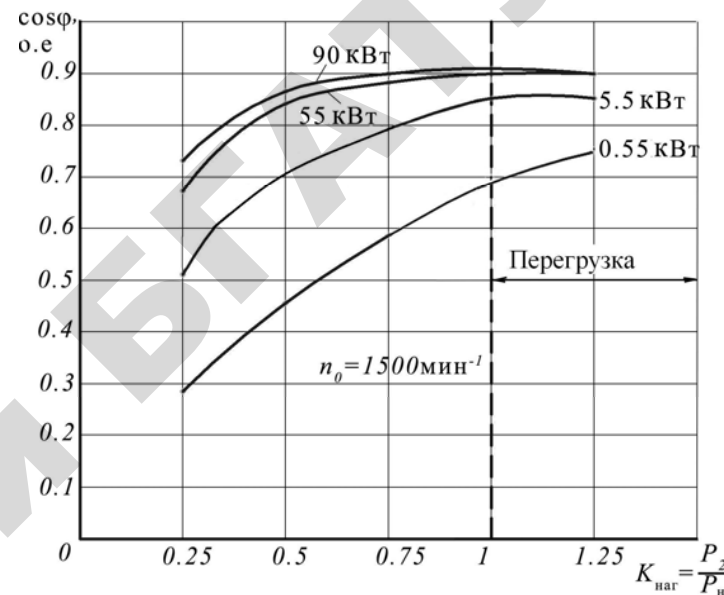


Рисунок 3.29 – Изменение коэффициента мощности электродвигателей серии 4А в зависимости от нагрузки на валу

Однако это не так. Увеличение $\cos \varphi$ при перегрузке справедливо только для малых по мощности электродвигателей или для электродвигателей с низкой синхронной частотой вращения. В качестве примера на рисунке 3.29 изображено изменение $\cos \varphi$ для четырех электродвигателей разной мощности, но одной частоты вращения, по данным справочника [5].

Из рисунка 3.29 следует, что для электродвигателя мощностью 0,55 кВт при перегрузке $\cos \varphi$ увеличивается от значения 0,7 до значения 0,75. Для электродвигателей мощностью 5,5 кВт и 55 кВт $\cos \varphi$ не изменяется при перегрузке, а для электродвигателя мощностью 90 кВт $\cos \varphi$ даже уменьшается. Таким образом, защита при перегрузке с контролем $\cos \varphi$ приемлема не для всех электродвигателей.

Структурная схема одного из вариантов устройства защиты от перегрузки с контролем коэффициента мощности приведена на рисунке 3.30.

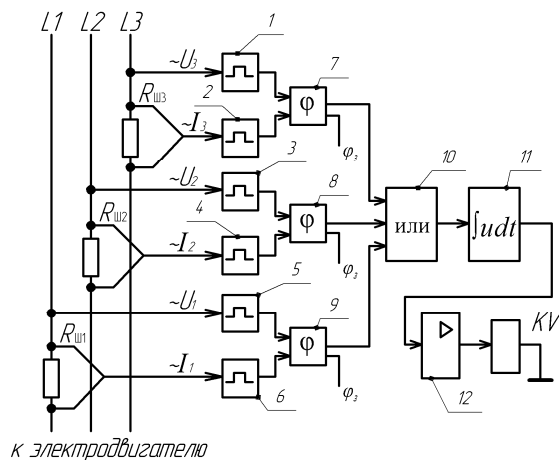


Рисунок 3.30 – Структурная схема устройства защиты, контролирующего перегрузку по коэффициенту мощности:

$R_{ш1}, R_{ш2}, R_{ш3}$ – шунты фаз А, В, С; 1, 3, 5 – компаратор нуля напряжения; 2, 4, 6 – компаратор нуля тока; 7, 8, 9 – схема выделения угла φ и сравнения с заданным значением угла φ_3 ; 10 – логическая схема ИЛИ; 11 – схема временной задержки; 12 – усилитель; KV – исполнительный орган защиты

Устройство содержит три шунта, включенные в каждую фазу, с которых снимается напряжение и подается на вход компараторов 2, 4, 6 нуля токов. Другие три компаратора 1, 3, 5 контролируют нуль трех фазных напряжений.

В блоках 7–9 определяется угол φ между токами и напряжениями фаз и сравнивается с заданным значением угла φ . Выходные сигналы блоков 7–9 подаются на элемент 10 ИЛИ, а с выхода его – на схему временной задержки 11. После установленной задержки времени выходной сигнал усиливается и подается на реле KV , которое, включаясь, отключает электродвигатель от сети.

В некоторых устройствах, контролирующих $\cos \varphi$, используются не шунты, а трансформаторы тока. Примером может служить блок защиты асинхронных электродвигателей (БЗАЭ), выпускаемый Минским электромеханическим заводом. Этот блок рассчитан на токи электродвигателей от 2 до 75 А, имеет диапазон уставок коэффициента мощности от 0,6 до 0,9 с точностью $\pm 0,05$, диапазон установок времени задержки срабатывания защиты 1–5 с.

Контроль $\cos \varphi$ можно осуществлять по одной фазе.

Достоинством этого способа защиты от перегрузки является то обстоятельство, что не требуется измерять значение токов. Следовательно, можно использовать одно и то же устройство для защиты разных по мощности двигателей. Но здесь мы имеем противоречие в том, что у больших по мощности электродвигателей не наблюдается увеличение $\cos \varphi$ при перегрузке (см. рисунки 3.2 и 3.29).

Недостатками этого способа защиты от перегрузки являются:

1) ограниченность применения (только для электродвигателей с возрастающим $\cos \varphi$ при перегрузке);

2) несрабатывание при стопорном режиме. Это связано с тем, что при крайней степени перегрузки, например, при стопорном режиме, $\cos \varphi$ электродвигателя уменьшается до значения 0,45–0,5. Следовательно, этот способ не будет защищать электродвигатель при стопорном режиме. Чтобы избежать этого недостатка, необходимо задавать два значения $\cos \varphi$, верхнее и нижнее. Такое решение применяется в реле контроля 3UG3014 фирмы SIEMENS. Реле имеет диапазон значения $\cos \varphi$ от 0,1 до 0,99, гистерезис 10 %, точность установки параметров ± 10 %. Задержка срабатывания при перегрузке составляет 0,3–3 с ± 10 %, задержка срабатывания при пуске – 0,5–20 с ± 20 %. Реле рассчитано на входной ток от 0,5 до 14 А (без трансформаторов тока);

3) ложное срабатывание при уменьшении трехфазного напряжения. Дело в том, что при уменьшении напряжения в сети $\cos \varphi$ электродвигателя возрастает и устройство защиты воспринимает это как перегрузку электродвигателя, хотя ток не превышает номинальных значений.

3.11. Контрольные вопросы

1. Назовите параметры электродвигателя, которые изменяются при технологической перегрузке. Какой характер изменения этих параметров?

2. Какие четыре параметра электродвигателя используются для построения аппаратов защиты от перегрузки?

3. Какой параметр электродвигателя имеет наибольшее изменение при перегрузке?

4. Какой параметр электродвигателя имеет наименьшее изменение при перегрузке?

5. Объясните понятие «перегрузочная характеристика электродвигателя».

6. Объясните понятие «защитная характеристика аппарата защиты электродвигателя от перегрузки».

7. Нарисуйте защитную характеристику аппарата защиты электродвигателя от перегрузки по току с горячего состояния.

8. Запишите уравнение, по которому рассчитывается защитная характеристика аппарата защиты электродвигателя от перегрузки по току.

9. Как классифицируются токовые защиты по устройству?

10. Как классифицируются токовые защиты по виду времятоковых характеристик?

11. Нарисуйте схему защиты асинхронного двигателя, построенную с использованием трех реле максимального тока и реле времени.

12. Объясните работу узла защиты, приведенного на рис. 3.12.

13. Объясните работу узла защиты, приведенного на рис. 3.13.

14. Объясните работу узла защиты, приведенного на рис. 3.14.

15. Объясните работу узла защиты, приведенного на рис. 3.15.

16. Объясните понятие «тепловая защита электродвигателя».

17. Объясните связь стрелы прогиба биметаллической пластинки с ее параметрами.

18. Почему двухполюсные электротепловые токовые реле хуже трехполюсных?

19. Пользуясь рисунком 3.20, объясните, почему тепловое реле фирмы Siemens срабатывает быстрее при двухфазном режиме работы?

20. Пользуясь рисунком 3.21, объясните, почему тепловое реле РТТ2 срабатывает быстрее при двухфазном режиме работы?

21. Объясните связь нагревателя и биметаллической пластины в электротепловом токовом реле.

22. Назовите пять недостатков электротепловых токовых реле.

23. Назовите область эффективного использования электротепловых токовых реле.

24. Объясните понятие «номинальный ток электротеплового токового реле».

25. Объясните понятие «ток несрабатывания электротеплового токового реле».

26. Объясните понятие «номинальный ток уставки электротеплового токового реле».

27. Объясните понятие «время срабатывания электротеплового токового реле».

28. Нарисуйте времятоковые характеристики электротеплового токового реле РТТ в трехфазном и двухфазном режимах работы.

29. Запишите условия выбора электротеплового токового реле для защиты двигателя от перегрузки.

30. По каким параметрам, кроме тока, выбирают электротепловое токовое реле?

31. На какие токи изготавливаются реле РТЛ?

32. Что означает цифра 1 в записи реле РТЛ-1?

33. Что означают цифры 1008 в записи реле РТЛ-1008?

34. На какие токи изготавливается реле РТТ5?

35. Что означает запись РТТ5-10-011?

36. Чем отличается реле РТТ5-10-011 от реле РТТ5-10-012?

37. На какие токи выпускают реле РТТ1?

38. На какие токи выпускают реле РТТ2?

39. Чем отличается реле РТТ21 от реле РТТ21П?

40. На какие токи выпускают реле РТИ?

41. Назовите три вида настройки электротеплового токового реле.

42. Объясните суть первого вида настройки электротеплового токового реле, при котором требуется определить ток уставки реле в данном положении регулятора.

43. Объясните суть второго вида настройки электротеплового токового реле, при котором требуется настроить его опытным путем на требуемое значение тока уставки.

44. Объясните суть настройки регулятора тока несрабатывания теплового токового реле на требуемое значение уставки.

45. Объясните суть защиты электродвигателя при перегрузке с контролем коэффициента мощности.

46. Какие три недостатка имеет защита электродвигателя при перегрузке с контролем коэффициента мощности?

Глава 4. ТЕМПЕРАТУРНАЯ ЗАЩИТА АСИНХРОННЫХ ТРЕХФАЗНЫХ ЭЛЕКТРОДВИГАТЕЛЕЙ

4.1. Нагрев и охлаждение асинхронных электродвигателей

Нагрев электродвигателя в целом и отдельных его частей, например, обмотки и стали статора, ротора, подшипников происходит за счет выделения тепла в этих и других частях электродвигателя. Определить расчетом температуру нагрева отдельных частей электродвигателя сложно. Ознакомимся с основными положениями теории нагрева и охлаждения электродвигателя и данными опытов.

Представим электродвигатель сплошным однородным телом. Такое тело имеет одинаковую температуру и теплоемкость во всех точках, а отдача тепла в окружающую среду принимается пропорциональной разности температур тела и окружающей среды. Предположим, что электродвигатель работает с постоянной нагрузкой на валу. Следовательно, он имеет постоянные потери мощности, постоянную теплоемкость и постоянную теплоотдачу. В этом случае уравнение его теплового баланса запишется в виде:

$$\Delta P dt = C d\tau + A\tau dt, \quad (4.1)$$

где ΔP – потери мощности, Вт;

C – теплоемкость, Дж/°С;

τ – превышение температуры электродвигателя над окружающей средой, °С;

A – теплоотдача, Дж/с·°С;

t – время, с.

Из формулы (4.1) следует, что тепло $\Delta P dt$, выделенное в электродвигателе, частично расходуется на повышение его температуры ($C d\tau$) и частично отдается в окружающую среду ($A\tau dt$).

Если нагрев электродвигателя начинается с температуры окружающей среды (т. е. в начальный момент времени $\tau = 0$ и $A\tau dt = 0$), то в начальный момент нагрева все тепло идет только на нагрев тела. Скорость нарастания температуры вследствие этого имеет вначале наибольшее значение:

$$\frac{d\tau}{dt}_{t=0} = \frac{\Delta P}{C}. \quad (4.2)$$

В дальнейшем, в связи с ростом температуры электродвигателя, все большая часть выделяющегося тепла отдается в окружающую среду. Скорость роста температуры электродвигателя замедляется. Это видно из следующего выражения:

$$\frac{d\tau}{dt} = \frac{\Delta P - A\tau}{C}. \quad (4.3)$$

При некотором значении τ , а именно, когда $\Delta P = A\tau$, величина $d\tau/dt = 0$, т. е. прирост температуры прекращается. Все выделяющееся в электродвигателе тепло отдается окружающей среде.

Температура, при которой прирост температуры электродвигателя прекращается, называется установившейся температурой и обозначается $\tau_{уст} = \Delta P / A$.

Уравнение (4.1) при решении можно привести к виду (4.4), разделив обе его части на $A dt$:

$$\frac{\Delta P}{A} = \frac{C}{A} \frac{d\tau}{dt} + \tau. \quad (4.4)$$

Обозначим $T_n = \frac{C}{A}$. Величина T_n называется постоянной времени

нагрева электродвигателя. Она представляет собой время, в течение которого двигатель нагревается до установившейся температуры при отсутствии теплоотдачи.

С учетом того, что $\tau_{уст} = \frac{\Delta P}{A}$ и $T_n = \frac{C}{A}$ уравнение (4.4) запишется

в виде:

$$\tau_{уст} = T_n \frac{d\tau}{dt} + \tau. \quad (4.5)$$

Решением уравнения (4.5) является зависимость вида:

$$\tau = \tau_{уст} \left(1 - e^{-\frac{t}{T_n}}\right) + \tau_{нач} e^{-\frac{t}{T_n}}, \quad (4.6)$$

где $\tau_{нач}$ – начальная температура превышения, °С.

В частном случае, при $\tau_{\text{нач}} = 0$ уравнение нагрева имеет вид:

$$\tau = \tau_{\text{уст}} \left(1 - e^{-\frac{t}{T_{\text{н}}}}\right). \quad (4.7)$$

В графическом виде уравнение (4.7) представлено на рисунке 4.1 для трех значений установившихся температур превышения $\tau_{\text{уст}1} > \tau_{\text{уст}2} > \tau_{\text{уст}3}$.

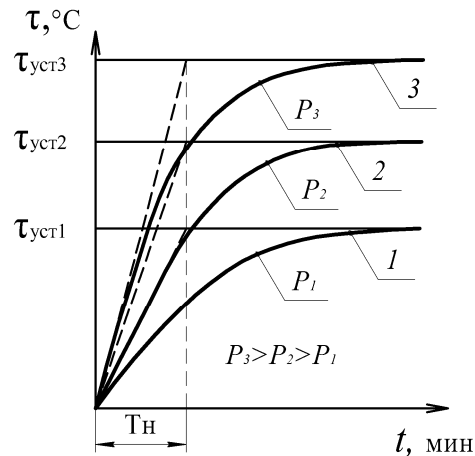


Рисунок 4.1 – Кривые нагрева электродвигателя при трех различных нагрузках на валу в продолжительном режиме работы

Установившиеся температуры соответствуют потерям $\Delta P_3 > \Delta P_2 > P_1$. Наибольшая нагрузка электродвигателя соответствует потерям ΔP_3 . На том же графике определена постоянная времени нагрева $T_{\text{н}}$. Она не зависит от нагрузки на валу. Постоянная времени нагрева найдена графическим путем. Проводились касательные к начальной части кривых нагревания (в точке 0) до пересечения с установившимися температурами $\tau_{\text{уст}1}$, $\tau_{\text{уст}2}$, $\tau_{\text{уст}3}$.

Согласно уравнению (4.7) время нагрева электродвигателя до установившейся температуры равно бесконечности, однако практически уже при времени $t = 4T_{\text{н}}$ температура превышения составит $\tau = 0,98 \tau_{\text{уст}}$.

Таким образом, время нагрева до установившейся температуры в практических расчетах может быть принято $t_{\text{уст}} = (3-4)T_{\text{н}}$.

Уравнение (4.6) может быть записано в виде:

$$\tau = \tau_{\text{уст}} + (\tau_{\text{нач}} - \tau_{\text{уст}}) \cdot e^{-\frac{t}{T_{\text{н}}}}. \quad (4.8)$$

В зависимости от величины потерь, определяющих температуру $\tau_{\text{уст}}$, и начальной температуры перегрева $\tau_{\text{нач}}$ знак разности $(\tau_{\text{нач}} - \tau_{\text{уст}})$ может быть положительным (охлаждение) или отрицательным (нагрев). При отключении электродвигателя $\tau_{\text{уст}} = 0$ и уравнение (4.8) имеет вид кривой охлаждения до температуры окружающей среды:

$$\tau = \tau_{\text{нач}} \cdot e^{-\frac{t}{T_0}}. \quad (4.9)$$

При остановке электродвигателя с внешним обдувом от собственного вентилятора его теплоотдача ухудшается (нет обдува). Вследствие этого в уравнении (4.9) вместо постоянной времени нагрева $T_{\text{н}}$ подставляется постоянная времени охлаждения T_0 . Отношение $\frac{T_{\text{н}}}{T_0} = \frac{A_0}{A_{\text{н}}} = \beta$ называется коэффициентом ухудшения теплоотдачи. Для асинхронных закрытых обдуваемых электродвигателей $\beta = 0,45-0,55$, а для защищенных – $\beta = 0,25-0,35$.

Действительная кривая нагрева электродвигателя отличается от теоретической, найденной по (4.7). Это связано с тем, что электродвигатель – неоднородное тело. В действительности температуры различных частей электродвигателя отличаются друг от друга. Тепло, выделенное, например, в меди обмотки статора, с конечной скоростью перемещается внутри электродвигателя к его охлаждаемым поверхностям. Вследствие этого в начальный момент времени тепло, выделявшееся в меди обмотки, почти полностью аккумулируется в нем. Повышение температуры меди в этот период определяется теплоемкостью меди, которая значительно меньше теплоемкости электродвигателя. Поэтому в начальный период нагрев меди будет протекать значительно быстрее, чем электродвигателя по уравнению (4.7).

На рисунке 4.2 изображены две кривые: 1 – опытная; 2 – теоретическая.

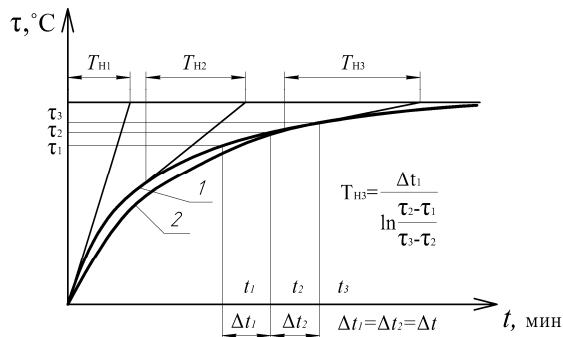


Рисунок 4.2 – Опытная (1) и теоретическая (2) кривые нагрева электродвигателя

Из рисунка 4.2 видно, что в начальный период кривые нагрева 1 и 2 значительно отличаются друг от друга, а в конце нагрева сходятся в одну линию.

Постоянная времени нагрева в начальный момент работы $T_{н1}$ меньше постоянной времени нагрева $T_{н2}$ в середине кривой нагрева и, тем более, меньше постоянной времени нагрева на конечном участке кривой нагрева. Именно $T_{н3}$ соответствует теоретическим выкладкам, приведенным выше:

$$T_{н3} = \frac{C}{\Delta P} = \frac{C\tau_{уст}}{\Delta P} \quad (4.10)$$

Постоянная времени нагрева определяется на любом участке кривой нагрева по трем точкам, для которых $t_2 - t_1 = t_3 - t_2$ (см. рисунок 4.2). Уравнение для расчета изображено на полях рисунка 4.2.

Действительная кривая нагрева электродвигателя не является экспонентой, но ее можно считать такой в расчетах, изменяя T_n от минимального значения $T_{н1}$ до максимального $T_{н3}$ (см. рисунок 4.2). В начальный момент нагрева постоянная времени нагрева может быть найдена по формуле:

$$T_{н1} = T_{нач} = \frac{200\tau_{уст}}{j_n^2 \cdot i_n^2}, \quad (4.11)$$

где j_n^2 – номинальная плотность тока, А/мм²;
 i_n – кратность пускового тока, о.е.;
 $\tau_{уст}$ – установившееся превышение температуры, °С.

Рекомендуется $\tau_{уст}$ брать не выше среднего значения предельно допустимого превышения температуры обмотки, измеренной методом сопротивления. Для изоляции класса нагревостойкости E $\tau_{уст} \leq \tau_{доп. ср} = 75$ °С, для изоляции класса нагревостойкости B $\tau_{уст} \leq \tau_{доп. ср} = 80$ °С, для изоляции класса нагревостойкости F $\tau_{уст} \leq \tau_{доп. ср} = 100$ °С. Тогда получаем:

$$T_{нач} = 200\tau_{доп. ср} / (j_n^2 \cdot i_n^2). \quad (4.12)$$

Значения j_n и i_n приведены в [5].

Конечные значения постоянной времени нагревания $T_{н3}$ находятся по уравнению (4.10).

В техническом справочнике по электрическим машинам, например в [5], приводится скорость нарастания температуры v_t (°С/с) при заторможенном роторе. Зная скорость нарастание температуры, можно найти температуру τ_n обмотки в конце пуска:

$$\tau_n = v_t t_n, \quad (4.13)$$

где t_n – время пуска, с.

Предельное (наибольшее допустимое) время пуска равно:

$$t_{пр. доп} = \tau_{доп. ср} / v_t. \quad (4.14)$$

Скорость нарастания температуры при пуске в первом приближении может быть принята равной начальной скорости нарастания температуры при заторможенном роторе. Тогда будем иметь:

$$v_t = i_n^2 j_n^2 / N, \quad (4.15)$$

где $N = 200$, если пуск начат при холодном состоянии электродвигателя;

если пуск начат при рабочей температуре электродвигателя, то $N = 165$ для изоляции класса нагревостойкости B и $N = 146$ для изоляции класса нагревостойкости F [5].

Экспериментальные исследования показывают, что разные части электродвигателя нагреваются неодинаково. Обмотка статора нагревается всегда больше, чем магнитопровод статора, особенно в начальный период нагрева. В конце нагрева разность температуры между этими частями электродвигателя уменьшается.

Экспериментальные исследования, описанные в [62], показывают, что в обмотке статора имеет место температурный перекося, причем максимальные температуры приходится на лобовые части.

Пониженный нагрев обмотки в пазах объясняется лучшей передачей тепла от обмотки к корпусу через магнитопровод статора (по сравнению с теплоотдачей от лобовых частей к корпусу через воздух).

В закрытых обдуваемых электродвигателях лишь 4–10 % потерь обмотки статора передается от лобовых частей к станине через внутренний воздух [63].

При номинальном установившемся режиме максимальная температура лобовых частей превышает среднюю температуру обмотки на 9–14 % [62].

Эпюры распределения температур в обмотке статора при разных токах имеют одинаковый характер. С увеличением тока возрастает перепад температур Δt между наиболее нагретой частью обмотки и менее нагретой (пазовая часть). Если при токе холостого хода $\Delta t = 1,3^\circ\text{C}$, то при $0,8I_{\text{ном}}$, $I_{\text{ном}}$, $1,2I_{\text{ном}}$ Δt составляет соответственно 5, 9 и 14°C (рисунок 4.3).

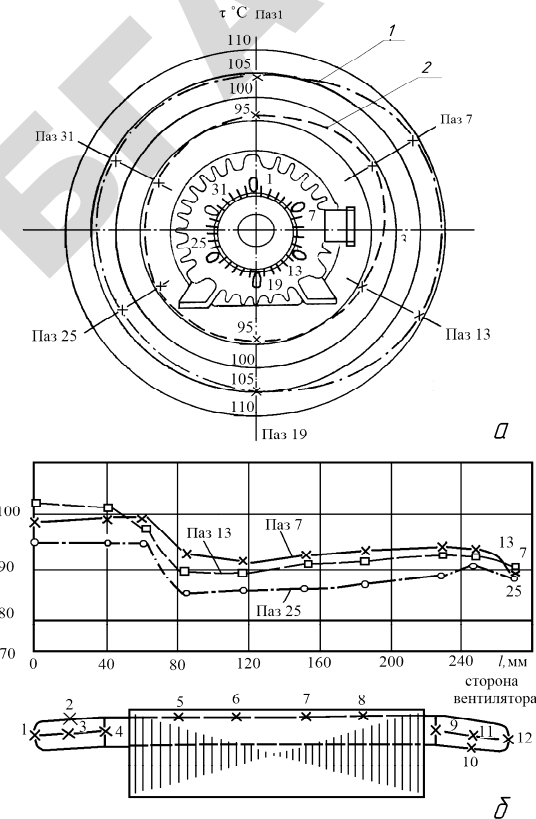


Рисунок 4.3 – Распределение превышения температур по окружности лобовых частей (а) и вдоль витков обмотки статора (б) электродвигателя АОП2-52-4СХ, при нагрузке по току $I = 1,25I_{\text{ном}}$:
1 – со стороны вала; 2 – со стороны вентилятора; x1...x12 – места расположения термопар вдоль витков обмотки статора [62]

Экспериментальные исследования [62], [63] подтвердили теоретические выводы того, что в режиме неподвижного ротора температура превышения обмотки статора изменяется прямо пропорционально времени (рисунок 4.4).

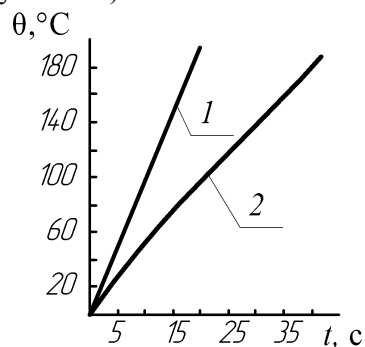


Рисунок 4.4 – Превышение температуры обмоток электродвигателей в режиме заторможенного ротора:

1 — электродвигатель 4АХ90L4; 2 — электродвигатель АОП2-52-4СХ

Пониженное напряжение в сельских сетях не позволяет длительно использовать электродвигатели при их номинальной мощности (рисунок 4.5). Это ведет к тепловой перегрузке машин, которая сокращает срок службы изоляции.

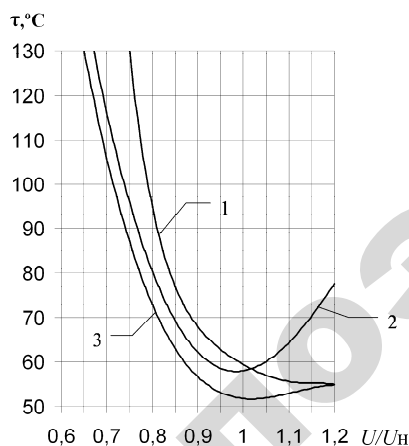


Рисунок 4.5 – Зависимость превышения температуры обмотки статора от напряжения при номинальной нагрузке электродвигателей:

1 – АО2-32-4СХ; 2 – АО2-42-4СХ; 3 – АОП2-52-4СХ

На тепловое состояние электродвигателей оказывает существенное влияние режим охлаждения. Воздух от собственного вентилятора должен беспрепятственно проходить вдоль ребер корпуса электродвигателя, охлаждая их. Забивание ребер материалом, закрытие отверстия вентилятора электродвигателя приводит к нарушению охлаждения и к увеличению температуры обмоток статора.

В качестве примера на рисунке 4.6 приведена зависимость превышения температуры обмотки от диаметра (D) входного отверстия кожуха вентилятора [62].

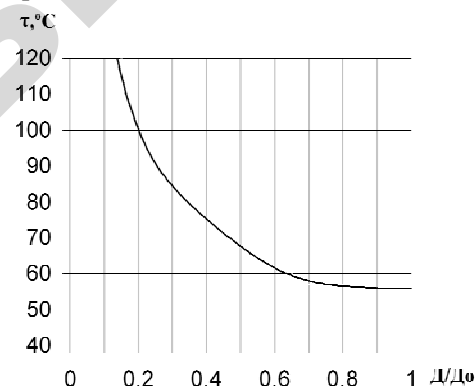


Рисунок 4.6 – Зависимость превышения температуры обмоток статора от диаметра входного отверстия кожуха вентилятора электродвигателя мощностью 10 кВт:

D – полностью открытый диаметр входного отверстия кожуха вентилятора

В повторно-кратковременном режиме работы электродвигатель периодически включается и отключается от сети, следовательно, периоды нагрева и охлаждения электродвигателя чередуются. В этом режиме работы нельзя рассматривать электродвигатель как однородное тело вследствие тепловой инерции его некоторых частей. Например, при паузе в работе электродвигателя температура в обмотке уменьшается, а в магнитопроводе она еще некоторое время увеличивается.

Нагрев и охлаждение асинхронных погружных водозаполненных электродвигателей подчиняется тем же законам, что и «сухих» электродвигателей. Однако имеются некоторые особенности.

1. Изоляция проводов обмотки водозаполненных электродвигателей выполняется из полиэтилена (допустимая температура 80 °С) или поливинилхлорида (допустимая температура 60 °С).

2. Водозаполненные электродвигатели имеют подшипники скольжения, следовательно, повышенные механические потери.

3. Ротор вращается в воде, от чего электродвигатель имеет повышенные потери на трение.

4. Теплоотдача электродвигателя в основном осуществляется через наружную поверхность статора (корпуса).

5. Вода внутри электродвигателя играет роль промежуточного теплообменного агента и смазывающей жидкости для подшипников скольжения. Ее роль в охлаждении водозаполненных электродвигателей исключительно велика.

6. Встречаются водозаполненные электродвигатели с литой изоляцией обмотки статора, в которых отвод тепла осуществляется через корпус статора и роторную полость.

Экспериментальные исследования, изложенные в [8], показали следующее: разность максимальной температуры в лобовой части обмотки статора электродвигателя типа ПЭДВ-16-180 составляет 2,1 °С со стороны насоса и 2,65 °С со стороны пяты. В лобовых частях обмотки не наблюдается локальных перегревов, поэтому можно считать, что нагрев лобовых частей обмотки статора равномерный. Максимальный нагрев обмотки наблюдается чаще всего в средней части пакета вблизи геометрического центра паза, смещаясь, при увеличении напора, в сторону пяты упорного подшипника из-за увеличения механических потерь в нем (таблица 1.7).

Коэффициент неравномерности нагрева $K_{\text{нн}}$ (отношение максимального нагрева к среднему) для водозаполненного электродвигателя мощностью 16 кВт приблизительно равен 1,21, а для электродвигателя мощностью 65 кВт – 1,12. В ориентировочных расчетах для электродвигателей типа ПЭДВ можно принимать $K_{\text{нн}} = 1,15-1,18$.

Значительный градиент температуры наблюдается в радиальном направлении в статоре (от зазора – к наружной поверхности).

В таблице 4.1 приведены результаты экспериментального исследования [8] нагрева элементов конструкции погружного насоса при скорости воды, охлаждающей корпус, $v = 0$ и $v = 0,218$ м/с.

Таблица 4.1 – Превышение температуры отдельных частей электродвигателя ПЭДВ-65-270 в установившемся режиме

Элемент конструкции или зона	Превышение температуры (°С) при скорости охлаждающей среды		Элемент конструкции или зона	Превышение температуры (°С) при скорости охлаждающей среды	
	$v = 0$	$v = 0,218$ м/с		$v = 0$	$v = 0,218$ м/с
Лобовые части обмотки со стороны насоса	23,6	21,6	Радиальный подшипник: верхний нижний	15,5 22,8	11,5 19,5
Пазовая часть обмотки	26,9	23,7	Осевой упорный подшипник	27,5	23,7
Лобовая часть обмотки со стороны пяты	25,7	23,2	Вода, заполняющая электродвигатель: со стороны насоса со стороны пяты в зоне осевого упорного подшипника	14,1 23,5	11,3 20,2
Обмотка (среднее вдоль витка)	26,1	23,2		24,3	21,3

Из таблицы 4.1 можно сделать следующие выводы:

- 1) в обмотке самой нагретой зоной является пазовая часть;
- 2) величина разности температур отдельных частей обмотки незначительная;
- 3) вода, заполняющая электродвигатель, нагревается в зоне осевого упорного подшипника больше, чем в других зонах.

В погружных водозаполненных электродвигателях ЗПДВ-4,5-140, статорная обмотка которых выполнена эмалированным проводом ПЭВ-2 и залита компаундом МБК-1, нагрев лобовых частей на 30–50 % выше, чем пазовой части обмотки (рисунок 4.7). Неравномерность нагрева отдельных частей увеличивается.

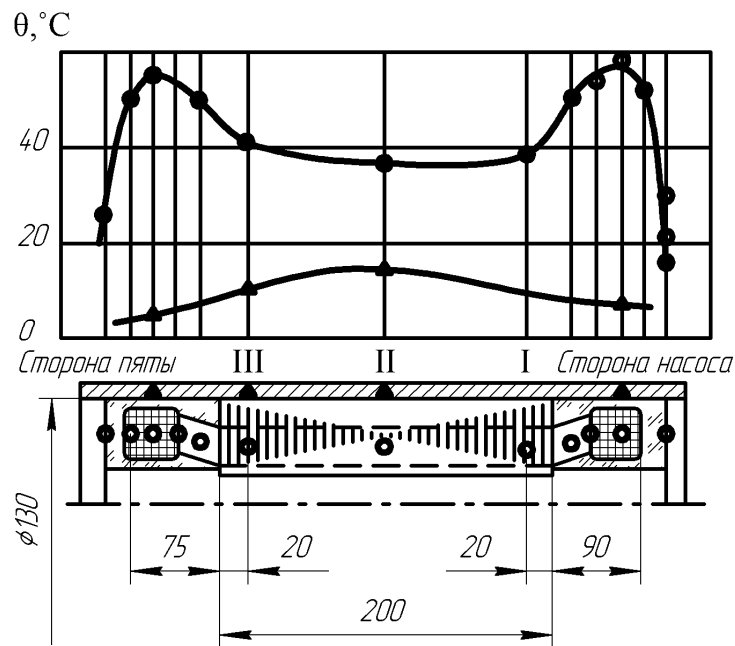


Рисунок 4.7 – Распределение температуры по длине статора погружного электродвигателя ЗПЭДВ4,5-140

Из рисунка 4.7 следует, что лобовые части обмотки нагреты на $20\text{ }^{\circ}\text{C}$ выше, чем сердечник [8].

Значительное превышение температур наблюдается в пазовой гильзе (25-30 % общего среднего нагрева обмотки). Распределение температур в пазовой части обмотки и в радиальном направлении показано на рисунке 4.8.

Из рисунка 4.8 следует, что в сердечнике, в области зазора, температура на $15\text{--}17\text{ }^{\circ}\text{C}$ выше, чем на корпусе электродвигателя, а в сечении «В-В» температура середины обмотки примерно на $30\text{ }^{\circ}\text{C}$ превышает температуру стали возле паза.

Нагрев обмотки статора наружного электродвигателя в значительной степени зависит от скорости воды, охлаждающей корпус.

Нагрев ротора в погружном электродвигателе в номинальном установившемся режиме незначительный. В «сухих» асинхронных электродвигателях нагрев ротора значительный.

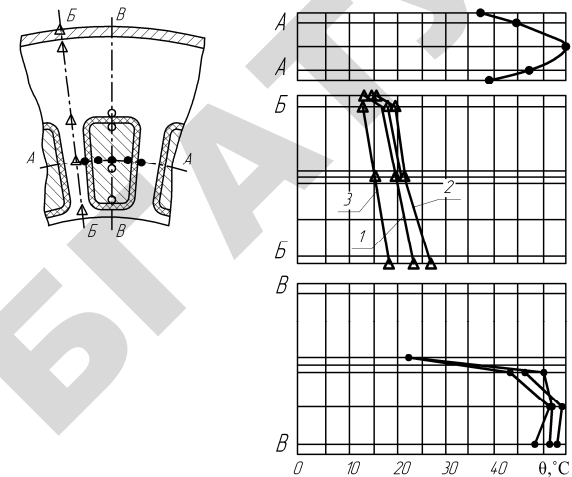


Рисунок 4.8 – Распределение температур в сечении А-А и в радиальном направлении (от зазора к корпусу), в сечениях В-В и В-В погружного электродвигателя ЗПЭДВ4,5-140: 1 – со стороны насоса; 2 – посередине; 3 – со стороны пяты [8]

На рисунке 4.9 изображены результаты опыта, выполненного аспиранткой БГАТУ Т. Н. Базулиной.

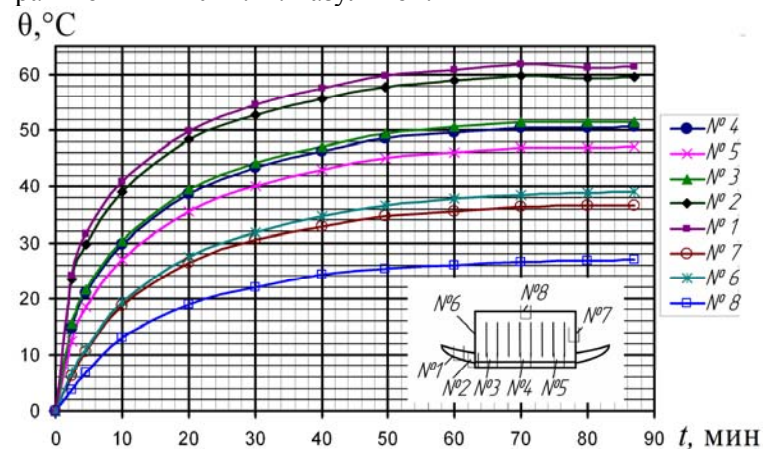


Рисунок 4.9 – Нагрев различных частей электродвигателя AIR90L4U3: № 1 – лобовой части обмотки; № 2 – обмотки на выходе из паза; № 3 – лобовой части под клином слева; № 4 – лобовой части под клином посередине; № 5 – лобовой части под клином справа; № 6 – боковой левой части магнитопровода; № 7 – боковой правой части магнитопровода; № 8 – корпуса электродвигателя

Проводился опыт нагрева электродвигателя мощностью 2,2 кВт при номинальной нагрузке. В различных частях электродвигателя устанавливались термодетекторы (малогабаритные платиновые термосопротивления). Термодетекторы были размещены в разных частях электродвигателя. Для контроля температуры использовался измерительный 12-канальный микропроцессорный прибор СОСНА-004.

Из опытных кривых видно, что наибольшую температуру имеет датчик № 1, размещенный в лобовой части обмотки. Отношение температуры датчика № 1 (лобовая часть обмотки) к температуре датчика № 8 (корпус) в процессе нагревания изменяется от 1,87 до 1,73. Из проведенного опыта следует, что измерять температуру следует в лобовых частях обмотки.

Аспирантом П. А. Равинским исследован нагрев электродвигателя в различных режимах с помощью термоэлектрических детекторов (термопар) [64]. В качестве термодетекторов выбраны термопары открытого типа ТХА-1199, исполнения 52, имеющие диаметр проводов термопары 0,2 мм. Термопара изолирована кремнеземной теплостойкой нитью К11С6. Чувствительность термопары составляла 40,7 мкВ/°С, а постоянная времени нагрева термопары в спокойном воздухе – 0,2 с. Для опытов использовался асинхронный трехфазный электродвигатель типа АИР71А6У3. В электродвигателе был снят подшипниковый щит и с помощью термокля «Радиал» (рабочая температура до 300 °С) закреплены 6 термопар. Места установки их указаны схематично на рисунке 4.10. Концы термодетекторов выведены через коробку выводов обмотки электродвигателя.

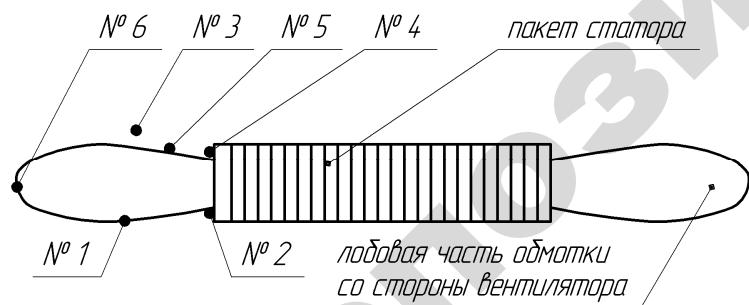


Рисунок 4.10 – Размещение датчиков в обмотках электродвигателя

Термопары расположены следующим образом:

- № 1 – с внутренней, обдуваемой стороны, по центру лобовых частей обмотки первой фазы;
- № 2 – на выходе обмотки из паза;
- № 3 – в воздухе, с внешней тыльной стороны обмотки;
- № 4 – на торцевой поверхности пакета статора, с внешней стороны;
- № 5 – с внешней стороны лобовой части обмотки второй фазы;
- № 6 – на самой вершине изгиба обмотки лобовой части второй фазы.

Для контроля показаний термопар использовался измерительный 12-канальный микропроцессорный прибор СОСНА-004.

На рисунке 4.11 изображено изменение температуры обмотки в процессе нагрева при холостом ходе электродвигателя.

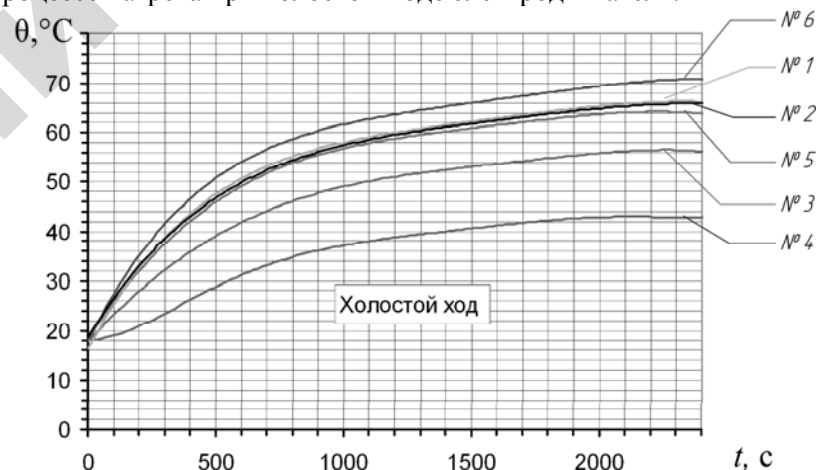


Рисунок 4.11 – Изменение температуры термодетекторов при холостом ходе электродвигателя

Из рисунка 4.11 можно сделать следующие выводы:

- 1) изменение температуры носит примерно экспоненциальный характер;
- 2) термопара № 4 (размещенная на пакете стали) показывает наименьшую температуру;
- 3) наибольшую температуру имеет термопара № 6, размещенная на изгибе лобовых частей обмотки;

4) практически одинаковую температуру имеют термопары № 1, № 2 и № 5;

5) температура воздуха больше температуры пакета стали.

Результаты опытов с двукратной перегрузкой по току при аварийном неполнофазном режиме работы электродвигателя изображены на рисунке 4.12.

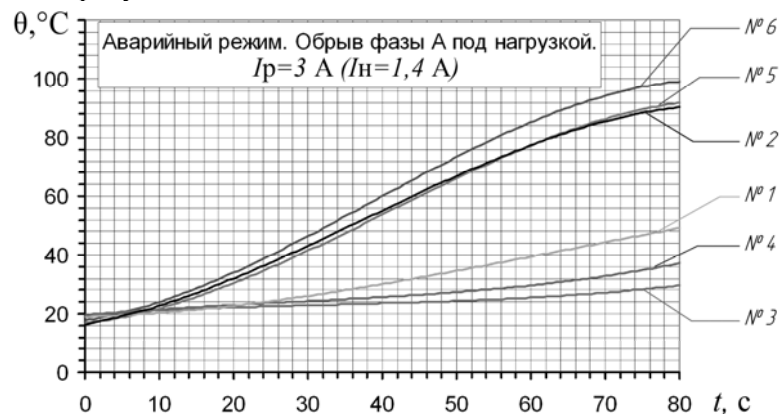


Рисунок 4.12 – Изменение температуры термодетекторов при обрыве фазы А и двукратной перегрузке по току электродвигателя

Из рисунка 4.12 следует:

1) изменение температуры происходит вначале по линейной зависимости;

2) нагрев обмотки до максимальной температуры происходит за малый промежуток времени (80 с против 800 с при трехфазном режиме на холостом ходу);

3) наблюдается значительное (примерно в 2 раза) расхождение между температурами термодетекторов на обмотке с током и на обмотке без тока;

4) наибольшая температура наблюдается в фазах, которые обтекаются током перегрузки (при обрыве фазы А наибольшую температуру имеет датчик № 6);

5) наименьшую температуру имеют датчики, установленные в воздухе (№ 3) и на пакете стали (№ 4).

Результаты опыта нагрева электродвигателя в стопорном режиме изображены на рисунке 4.13.

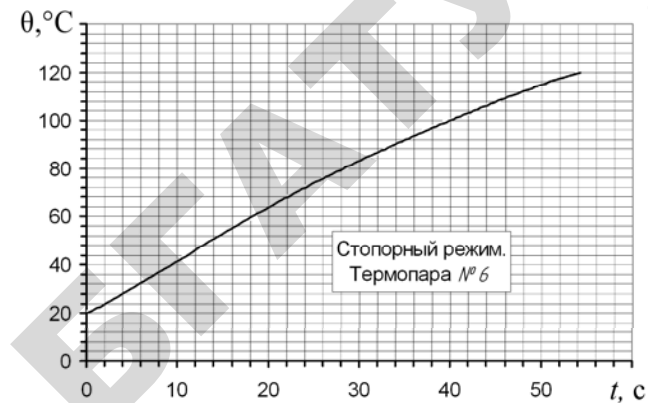


Рисунок 4.13 – Изменение температуры обмотки электродвигателя в стопорном режиме

Из рисунка 4.13 следует, что в течение 20 секунд нагрев происходит по линейной зависимости, далее его скорость незначительно уменьшается. Через 54 секунды обмотка достигает температуры 120 °С.

Условно можно разделить асинхронные электродвигатели на электродвигатели, критичные к нагреву статора, и электродвигатели, критичные к нагреву ротора. К последним электродвигателям относятся электродвигатели, у которых при заторможенном роторе опасная температура достигается вначале в роторе. Чем мощнее асинхронный электродвигатель с короткозамкнутым ротором и выше его частота вращения, тем более критичным к нагреву ротора он является.

В асинхронных электродвигателях, критичных к нагреву статора, в стопорном режиме максимальная (опасная) температура достигается вначале в обмотке статора.

4.2. Нагревостойкость изоляции обмоток асинхронных электродвигателей

Одним из основных свойств изоляции обмоток электродвигателей является нагревостойкость материала изоляции. В соответствии с ГОСТ 8865-70 *нагревостойкость* – это способность электроизоляционных материалов, пропитывающих составов и изоляции проводов без повреждения и без существенного ухудшения практически важных свойств

длительно выдерживать воздействие повышенной (против нормальной) температуры. Современные электродвигатели серии 4А и АИР имеют классы нагревостойкости изоляции и изоляционные материалы, указанные в таблице 4.2.

Таблица 4.2 – Характеристика классов нагревостойкости изоляции асинхронных электродвигателей серии 4А и АИР

Обозначение класса нагревостойкости	Температура нагрева, характеризующая данный класс, $\theta_{\max, \text{пред}}, ^\circ\text{C}$	Материалы, соответствующие данному классу нагревостойкости и применяемые в изоляции электродвигателей 4А и АИР	Применяются в электродвигателях с высотой оси вращения, мм
<i>B</i>	130	Изоляция проводов – полиэфирная эмаль; пазовая и межфазная изоляция – полиэфирная пленка, оклеенная с одной стороны или с 2-х сторон полиэфирной бумагой; пазовая изоляция – стеклопластик профильный класса <i>B</i> ; пропиточные составы – без растворителей на основе ненасыщенного полиэфира; бондажировка лобовых частей – шнур полиэфирный	50–132(4А) 45–63(АИР) 71–250(АИР)*
<i>F</i>	155	Изоляция проводов – полиэфирная или полиэфиримидциануратная эмаль; пазовая и межфазная изоляция – полиэфирная пленка, оклеенная с двух сторон бумагой из ароматического полиамида или полиэфирной бумагой, предварительно пропитанной нагревостойким связующим; пазовая крышка – стеклопластик профильный класса <i>F</i> ; пропиточный состав – состав без растворителей на основе полиэфиримида, насыщенного полиэфира; кремнийорганический лак; бондажировка лобовых частей – шнур стеклянный или полиэфирный	160–355(4А) 71–355(АИР)

* С целью повышения надежности электродвигатели серии АИР с высотой оси вращения 71-250 имеют класс нагревостойкости *F* при нагреве обмоток, соответствующем классу нагревостойкости *B*. Для всех высот оси вращения принят эмалированный провод с изоляцией класса нагревостойкости *F*.

В таблице 4.2 приведена предельно допустимая температура (максимальное значение) при установившемся тепловом режиме. Среднее значение предельно допустимой температуры $\theta_{\max, \text{cp}}$, определяемое методом сопротивления, составляет меньшую величину, а именно: 120 °С – для класса нагревостойкости *B*; 140 °С – для класса нагревостойкости *F*. При стандартной температуре окружающей среды 40 °С превышение температуры над окружающей составит $\tau_{\max, \text{cp}} = 80$ °С (класс нагревостойкости *B*) и 100 °С (класс нагревостойкости *F*).

Срок службы изоляции электродвигателя зависит от температуры, при которой эксплуатируется изоляция. Многочисленными исследованиями установлено, что срок службы изоляции *T* (лет) определяется выражением:

$$D = B e^{-k\theta}, \quad (4.16)$$

где *B* и *k* – экспериментально установленные коэффициенты; θ – температура изоляции, °С.

Значения коэффициента *k* для изоляции класса *A* составляет $7,5 \cdot 10^4$ (по данным различных авторов).

Долговечность изоляции быстро падает с увеличением температуры нагрева, причем на каждые лишние 8 °С нагрева срок службы изоляции класса *A* уменьшается вдвое.

Следует иметь в виду, что уменьшение температуры изоляции ниже 80–90 °С не приводит к существенному увеличению в такой же степени срока службы изоляции по уравнению (4.16). При таких температурах (80–90 °С и ниже) изоляция тоже стареет. Формула (4.16) показывает только ориентировочные значения срока службы изоляции, так как она относится к непрерывному идеальному режиму нагрева.

В практике электродвигатель работает не в идеальных условиях. Он подвержен колебаниям нагрузки на валу, изменению температуры окружающей среды, колебаниям напряжения, загрязнению, вибрации и т. д.

Особенно неблагоприятное воздействие оказывают на обмотку тяжелые пусковые токи и аналогичные им по величине аварийные токи при заклинивании ротора электродвигателя. В этом случае обмотка испытывает тепловой удар, сущность которого описана ниже.

На рисунке 4.14 изображены в полулогарифмическом масштабе сроки службы изоляционных материалов различных классов в зависимости от температуры нагрева. Минимальная долговечность составляет 0,01 года.

На рисунке 4.14 изображены характерные для изоляции классов нагревостойкости A , E , B и F температуры $\theta_{\max \text{ ср}}$ и $\theta_{\max \text{ пред}}$, а также время стандартной наработки обмотки статора 20000 ч (с вероятностью безотказной работы не менее 0,9). Температура $\theta_{\max \text{ ср}}$ для всех классов изоляции пересекается с линиями долговечности соответствующих классов выше линии 20 000 ч (точки A , E , B , F), а температуры $\theta_{\max \text{ пред}}$ – ниже линии 20 000 ч (точки A' , E' , B' , F').

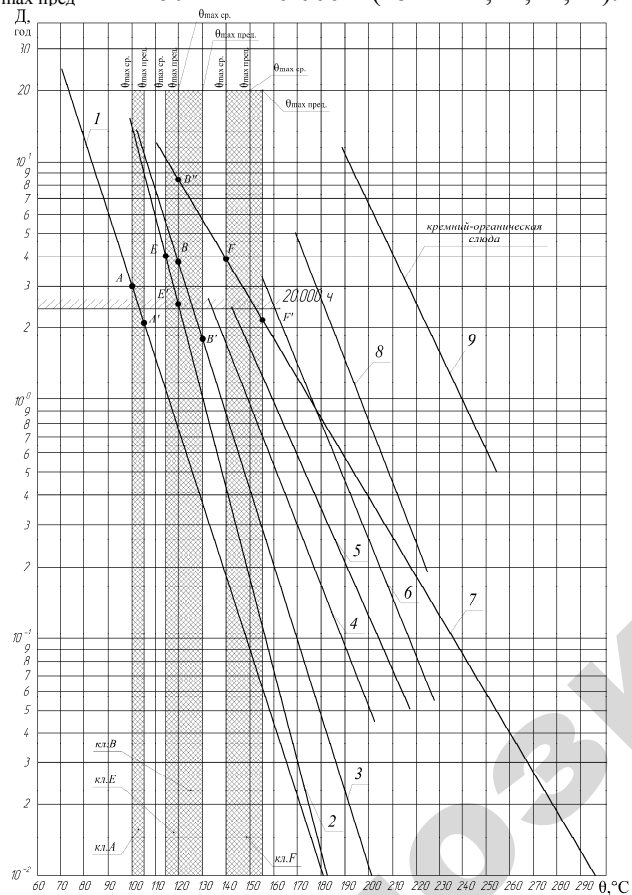


Рисунок 4.14 – Зависимость срока службы изоляции от температуры:
 1, 2, 3 – изоляционные материалы класса A , E , B ; 4 – синтофлекс 41; 5 – изофлекс 191; 6 – синтофлекс 515; 7 – кремнийорганические композиционные материалы; 8 – имидофлекс; 9 – кремнийорганическая слюда

Следовательно, температура обмотки электродвигателя не должна превышать $\theta_{\max \text{ ср}}$ для изоляции соответствующих классов нагревостойкости. Только в этом случае обеспечивается не менее 20 000 ч безотказной работы.

Разработчики серии АИР поступили разумно, применив для изоляции класса нагревостойкости B электроизоляционные материалы класса нагревостойкости F , имеющие большую долговечность (расчетная точка B'' на рисунке 4.14).

4.3. Температурная защита с контролем средней температуры обмотки по ее сопротивлению

Температурная защита электродвигателей основана на контроле температуры его обмоток с помощью встраиваемых внутрь обмоток термодетекторов или с помощью специальных схем, контролирующих сопротивление обмоток, зависящее от температуры. Последнее встречается редко. По сопротивлению обмоток можно определить их среднюю температуру, а с помощью термодетекторов – температуру в наиболее нагретой части обмотки.

Причины нагрева электродвигателя выше допустимой температуры следующие:

- 1) технологическая перегрузка;
- 2) слишком большая частота включений в час;
- 3) слишком напряженный повторно-кратковременный режим работы;
- 4) заклинивание (стопорный режим);
- 5) слишком продолжительный пуск;
- 6) слишком большие отклонения напряжения в сети от номинальных значений;
- 7) асимметрия напряжения сети имеет недопустимые значения;
- 8) неполнофазный режим работы;
- 9) высокая температура окружающей среды или разреженный воздух в связи с высоким расположением над уровнем моря;
- 10) засорение вентиляционных отверстий или потеря крыльчатки вентилятора, приводящие к нарушению охлаждения электродвигателя.

Самой важной задачей устройства защиты электродвигателя является своевременное срабатывание (отключение электродвигателя от сети), раньше, чем температура электродвигателя достигнет наибольшего допустимого значения.

Различают два вида контроля температуры обмоток электродвигателя в устройствах защиты: 1) прямой контроль с помощью встраиваемых внутрь обмоток термодетекторов; 2) косвенный контроль по сопротивлению обмотки.

Косвенный метод определения температуры медной обмотки основан на известной зависимости ее сопротивления R от температуры:

$$R_{\tau} = R_{20} \frac{235 + \theta_{\tau}}{235 + 20}, \quad (4.17)$$

где R_{20} – сопротивление обмотки при температуре 20 °С, Ом;

θ_{τ} – температура обмотки, °С.

Если в этой формуле перейти к температуре превышения τ , а сопротивление R_{20} заменить на сопротивление в холодном состоянии R_x , вместо значения 20 подставить θ_x , то получим расчетную формулу превышения температуры:

$$\tau_{r.x} = \left(\left(\frac{R_{\tau}}{R_x} \right) - 1 \right) (235 + \theta_x). \quad (4.18)$$

Если изменение сопротивления медной обмотки выразить в процентах, то график изменения сопротивления медной обмотки в зависимости от температуры имеет вид, представленный на рисунке 4.15.

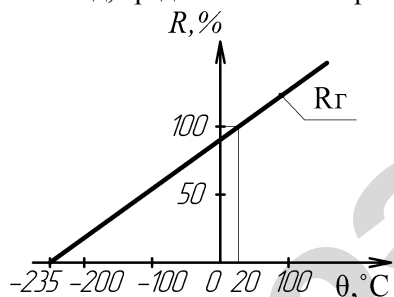


Рисунок 4.15 – Изменение сопротивления (%) медной обмотки в зависимости от температуры

В ГОСТ 27222–91 [65] приведены схемы для измерения сопротивления обмоток переменного тока без отключения их от сети. Схемы рекомендуются для испытаний обмотки на нагрев и мало приемлемы для построения устройств защиты.

Сущность метода состоит в следующем. При подаче напряжения постоянного тока к обмоткам машины переменного тока, находящейся под нагрузкой, происходит наложение составляющих постоянного и переменного токов. При прохождении через реактивное сопротивление составляющие постоянного и переменного токов могут быть разделены.

Измерение сопротивления обмотки при помощи постоянного тока допускается проводить как по схеме измерительного моста, так и по схеме вольтметра-амперметра. Выбор схемы зависит от мощности и напряжения машины, способа соединения ее обмоток, а также метода испытания на нагревание.

Значение наложенного постоянного тока должно быть достаточно малым (до 5 % переменного тока нагрузки), а время его прохождения незначительным (до 5 минут), чтобы исключить влияние измерительного тока на нагрев обмоток и других элементов схемы. Напряжение постоянного тока, измеряемое на зажимах обмотки, должно быть не менее 10 мВ.

В качестве примера на рисунке 4.16, а изображена общая схема, поясняющая принцип измерения сопротивления обмоток переменного тока [66].

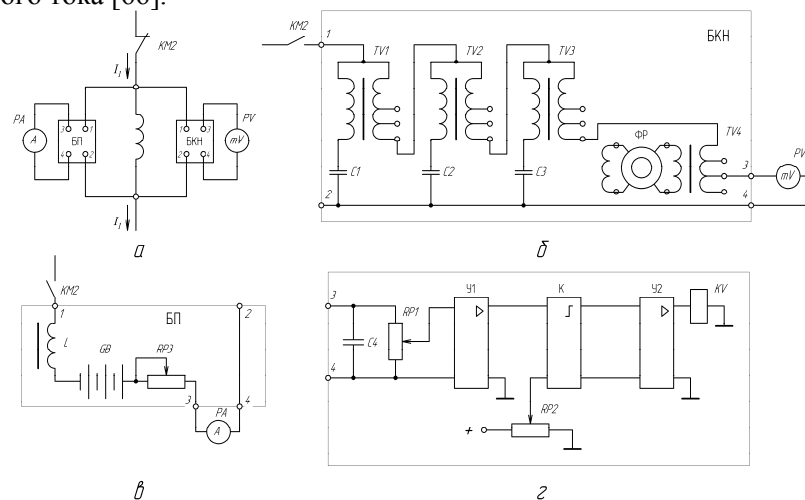


Рисунок 4.16 – Измерение сопротивления обмотки асинхронного электродвигателя с целью определения ее температуры: а – общая схема; б – схема блока компенсации напряжения переменного тока (БКН); в – схема блока питания измерительным постоянным током (БП); г – схема блока автоматической защиты

Блок питания (БП) обеспечивает подачу постоянного тока в одну обмотку электродвигателя и измерение величины этого тока. Блок компенсации напряжения переменного тока (БКН) обеспечивает измерение падения напряжения на обмотке от протекания постоянного тока с помощью вольтметра PV .

Для защиты измерительных цепей постоянного тока от ЭДС переменного тока применяют каскад компенсирующих трансформаторов $TV1-TV3$ (рисунок 4.16, б). Для повышения точности компенсации используются вторичные обмотки трансформаторов $TV1-TV3$ с отпайками через один виток, а для компенсации углового сдвига, вносимого конденсаторами $C1-C3$, используется регулировочный трансформатор $TV4$ с отпайками и с питанием его через фазорегулятор ΦP . Вольтметр PV целесообразно шунтировать конденсатором.

Цепи питания постоянного тока имеют дроссель L , а параллельно амперметру устанавливается конденсатор $C5$ (рисунок 4.16, в). Дроссель L в блоке БП и обмотки трансформаторов $TV1-TV3$ в блоке БКН препятствуют прохождению переменных токов в этих цепях.

Сначала настраивают схему при отключенном электродвигателе. Измеряют ток, напряжение и температуру окружающей среды. По закону Ома определяют сопротивление обмотки в холодном состоянии. Далее включают электродвигатель и контролируют показания вольтметра. С нагревом обмотки показания вольтметра увеличиваются. По закону Ома определяют сопротивление обмотки в горячем состоянии. Рассчитывают температуру превышения обмотки по формуле (4.18).

Рассмотренную схему можно использовать для автоматического контроля выходного напряжения, если ее дополнить блоком автоматической защиты (рисунок 4.16, з). Такой блок работает следующим образом. Сигнал с вольтметра PV усиливается усилителем $U1$. Далее сигнал поступает на компаратор K , где сравнивается с уставкой срабатывания. Если уровень сигнала превысит величину уставки, компаратор переключится. Усилитель $U2$ увеличивает сигнал до уровня срабатывания исполнительного реле KV . Контактom этого реле отключается контактор, подключающий электродвигатель к сети. Блок можно дополнить мультивибратором и усилителем для периодической коммутации контактора $KM2$.

Следует иметь в виду, что если не принять специальных мер для блокировки пути измерительного тока в сеть переменного тока, пи-

тающего обмотки АД, то измерение станет невозможным [66]. Такое блокирование производится либо путем кратковременного отключения питания контактом $KM2$, либо путем включения в цепь переменного тока разделительных конденсаторов большой емкости (4000 мкФ для мощности 1,5 кВт).

Одновременное питание обмотки постоянным и переменным токами удобно выполнить для схем обмоток, имеющих нулевые точки, например, при соединении обмоток «двойная звезда» [66]. Однако электродвигателей с такими обмотками используется очень мало.

Недостатком схем косвенного измерения температуры обмотки по ее сопротивлению является их сложность и сложность настройки устройств защиты. Кроме этого, измеряется средняя температура обмотки и не учитывается тот факт, что температура ее отдельных частей может быть выше средней температуры. Вопросы техники безопасности при использовании схем непрерывного измерения стоят весьма остро. Необходимо обеспечивать заземление, осуществлять контроль сопротивления изоляции, предотвращение прикосновения к элементам схемы и т. д.

Наиболее часто используется прямой метод измерения температуры обмоток с помощью встраиваемых в обмотку термодетекторов.

4.4. Температурные защиты с коммутирующими термодетекторами

Согласно ГОСТ 27917-88 (МЭК 34-II-2) *коммутирующим детектором называется термодетектор, непосредственно коммутирующий цепь управления (или цепь обмотки)*. Первые температурные защиты строились на базе коммутирующих термодетекторов (биметаллических и дилотометрических термореле).

Дилотометрические датчики-реле представляют собой миниатюрную металлическую трубу диаметром 3,2 мм и длиной 63 мм, внутри которой размещен металлический стержень. Один конец трубы заварен и жестко соединен со стержнем. Коэффициенты линейного расширения трубы и стержня различны. Обычно стержень выполнен из инвара, а труба – из латуни. Коэффициент линейного расширения латуни составляет $21 \cdot 10^{-6} \text{ }^\circ\text{C}^{-1}$, а инвара – $1,5 \cdot 10^{-6} \text{ }^\circ\text{C}^{-1}$. Другой конец трубы соединен с контактной системой, а стержень – с рычагом, воздействующим на микропереключатель. При нагревании датчика-реле изменяется относительное перемещение трубы и рычага. Происходит переключение контакта.

В целом дилотометрические датчики-реле имеют схожие с биметаллическими реле параметры. Погрешность срабатывания составляет $\pm 5\%$ [67]. Отличие в защитных характеристиках выражается в том, что дилотометрические чувствительные элементы обеспечивают упреждение срабатывания при быстром нагревании обмотки. Это связано с тем, что латунная труба, имеющая больший коэффициент линейного расширения, ранее воспринимает тепло, идущее от обмотки, чем стержень. За счет одновременного нагревания трубы и стержня датчик-реле срабатывает при меньшей температуре при заторможенном роторе, чем в продолжительном режиме работы электродвигателя. Несмотря на эти достоинства, дилотометрические датчики-реле распространены меньше, чем биметаллические датчики-реле температуры (в связи с более сложной конструкцией и большей стоимостью).

Биметаллические термореле получили широкое применение. Конструкции биметаллических термореле разнообразны. Они выпускались в бывшем СССР и за границей. Особенно известны биметаллические дисковые датчики-реле типа ТТ1 и ТТ2, разработанные в шестидесятые годы НИИ электротехнической промышленности для защиты однофазных электродвигателей мощностью до 600 Вт [62], малоинерционное реле ТМ и термореле ДТР-3М [68]. Последнее из-за конструктивных особенностей реагирует как на абсолютную температуру, так и на скорость изменения температуры в обмотке. Несмотря на отмеченные достоинства, реле ДТР-3М имеют габариты, затрудняющие их установку в обмотке электродвигателя.

Из разнообразных иностранных термореле типа «микротерм» (Германия), термореле швейцарской фирмы «Броун-Бовери» типа «ипсотерм», термореле американской фирмы «Кликсон» выделяется лучшими характеристиками термореле «стоптерм» французской фирмы КЭМ [62]. Оно имеет слегка выпуклую биметаллическую пластину 7, подвижный контакт 2 из серебра (рисунок 4.17).

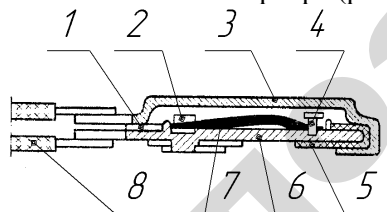


Рисунок 4.17 – Биметаллическое реле фирмы КЭМ (Франция):

1 – изоляционная прокладка; 2 – подвижный контакт; 3 – крышка; 4 – заклепка; 5 – изоляционная прокладка; 6 – основание; 7 – биметаллический диск; 8 – выводы

Основание 6 и крышка 3 изготовлены из посеребренной латуни. Размеры реле минимальные и позволяют его встраивать в обмотку. При этом требуется изолировать его корпус от обмотки. Испытания биметаллического датчика реле «стоптерм» показали, что срабатывание реле происходит при 112–118 °С в продолжительном режиме работы, а возврат в исходное положение – при 86–96 °С [62]. Отключение заторможенного ротора с холодного состояния происходит через 26 с при температуре обмотки 167 °С. Это хорошие результаты.

Для улучшения защитных характеристики биметаллическое дисковое термореле было дополнено нагревателем [68], по которому протекал ток обмотки электродвигателя или часть тока (при использовании трансформатора тока). В результате этого биметаллический диск воспринимал тепло не только от обмотки электродвигателя, но и от нагревателя. Защитные характеристики биметаллического реле от этого улучшились. Такое реле получило название температурно-токовое (рисунок 4.18 б).

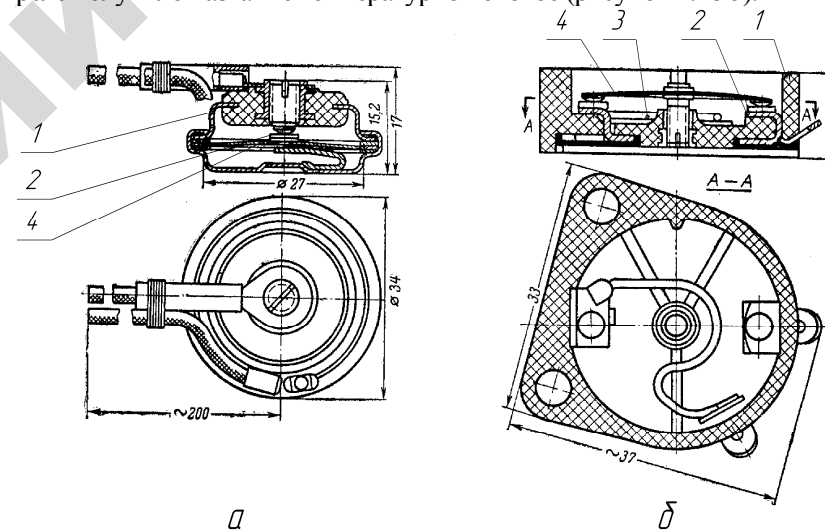


Рисунок 4.18 – Биметаллические дисковые реле:



а – температурное реле типа Т; б – температурно-токовое реле типа ТТ-10; 1 – корпус реле; 2 – неподвижный контакт; 3 – нагреватель; 4 – биметаллический элемент (мембрана)

Несмотря на улучшение защитных характеристик температурно-токовые реле не получили применения для защиты трехфазных асинхронных электродвигателей. Они нашли применение для защиты однофазных электродвигателей или трехфазных небольшой мощности.

Минский завод «Термопласт» выпускает реле низковольтное температурное термобиметаллическое ЖРВИ.303657.003, имеющее температуру срабатывания 85 ± 10 °С и температуру возврата 55 ± 15 °С, а также аналогичное реле ЖРВИ.303657.004, имеющее температуру срабатывания 120 ± 10 °С и температуру возврата 90 ± 15 °С. Диаметр реле составляет 25 мм, толщина – 20 мм, масса – 3,5 г.

За рубежом в Германии, Чехии, Голландии, Венгрии, Корее, Мексике до сих пор производятся такие устройства. Они получили название биметаллические термопредохранители или моторпротекторы (таблица 4.3).

Таблица 4.3 – Технические данные моторпротекторов компании Sensata Technologies

Серия	Температура срабатывания, °С	Характеристика контактов: $U = 250$ В (если не указаны другие значения); ток резистивной / ток индуктивной нагрузки/ число циклов срабатывания	Допуск температуры срабатывания, °С	Внешний вид	Применение
1	2	3	4	5	6
<u>2MM</u>	70, 75, 80, 85, 90, 95, 100, 105, 110, 115, 120, 125, 130, 135, 140, 145, 150, 155, 160	4,0 А/1,5 А/3 000 циклов, постоянный и переменный токи	± 10		Электродвигатели малой мощности, катушки, соленоиды, трансформаторы
<u>8MM</u>	70, 75, 80, 85, 90, 95, 100, 105, 110, 115, 120, 125, 130, 135, 140, 145, 150, 155, 160	L-тип: 4,5 А/1,6 А/10 000 циклов. H-тип: 7,0 А/3,0 А/3 000 циклов, постоянный и переменный ток	± 5		Электродвигатели малой мощности, катушки, соленоиды, трансформаторы

Продолжение таблицы 4.

1	2	3	4	5	6
<u>7AM</u>	65, 70, 75, 80, 85, 90, 95, 100, 105, 110, 115, 120, 125, 130, 135, 140, 145, 150, 155, 160, 170, 175	277 В/8 А/10 000 циклов; 600 В/4 А/10 000 циклов, переменный ток	± 5		Электродвигатели с конденсатором, электродвигатели с расщепленными полюсами, балласты ламп дневного света и ламп высокого давления, пылесосы
<u>15AM</u>	65, 70, 75, 80, 85, 90, 95, 100, 105, 110, 115, 120, 125, 130, 135, 140, 145, 150, 155, 160, 170	20,0 А/3 000 циклов, переменный ток	± 5		Электродвигатели для насосов, стиральных и моечных машин, сушилок, пылесосов; фены, зарядные устройства, трансформаторы и печи СВЧ
<u>6AP</u>	100, 105, 110, 115, 120, 125, 130, 135, 140, 145, 150, 155, 160, 170	15 В/30,0 А/3000 циклов; 30 В/15,0 А/3000 циклов, постоянный ток	± 5 с внутренним нагревателем (быстрое срабатывание, очень высокая чувствительность)		Электродвигатели постоянного тока для стеклоподъемников, стеклоочистителей, дверных замков, привода воздушной заслонки. Допускается расположение за пределами обмотки
<u>3MP</u>	80, 85, 90, 95, 100, 105, 110, 115, 120, 125, 130, 135, 140, 145, 150, 155, 160, 170	27,5 А ($\cos \varphi = 1$) / 500 циклов; 18,0 А ($\cos \varphi = 0,6$) / 1000 циклов, переменный ток	± 5 с внутренним нагревателем (быстрое срабатывание, очень высокая чувствительность)		Расположение за пределами обмотки. Электродвигатели для стиральных и моечных машин, сушилок, насосов, пылесосов и для промышленных применений

Окончание таблицы 4.3

1	2	3	4	5	6
3MPSH (Self-holder)	80, 85, 90, 95, 100, 105, 110, 115, 120, 125, 130, 135, 140	18,0 А ($\cos \varphi = 0,6$) / 300 циклов, переменный ток	± 8 с внут- ренним нагрева- телем	 Самоблоки- рующийся. Сброс в рабо- чее положение при отключе- нии питания	Бытовые и про- мышленные элек- тродвигатели для моечных машин, электропил, газо- нокосилок, насо- сов. Монтаж за пределами обмотки
TH10	60, 65, 70, 75, 80, 85, 90, 95, 100, 105, 110, 115, 120, 125, 130, 135, 140, 145, 150	13,0 А/2,0 А / 10 000 циклов (типы А и В); 13,0 А/2,0 А / 30 000 циклов (тип С)	± 5		Конвекционные нагреватели, фены, сушилки, тепловые пушки, тепловен- тиляторы
TH11	60, 65, 70, 75, 80, 85, 90, 95, 100, 105, 110, 115, 120, 125, 130, 135, 140, 145, 150	13,0 А/2,0 А / 10 000 циклов	± 5		Конвекционные нагреватели

Моторпротекторы компании Sensata Technologies [69] представляют собой электромеханические термовыключатели с фиксированной температурой срабатывания. Они применяются для защиты от перегрева и от перегрузки по току обмоток одно- и трехфазных электродвигателей переменного и постоянного токов малой мощности. Основные области применения – бытовая и промышленная техника и автомобилестроение.

Принцип действия моторпротектора состоит в следующем. Через проводящую биметаллическую пластину протекает рабо-

чий ток (в отличие от термостатов, в которых ток не протекает через биметалл), который при превышении номинального значения в результате перегрузки электродвигателя вызывает разогрев этой пластины. Биметаллическая пластина, в силу присутствия ей свойств, при превышении определенной температуры резко изгибается, размыкая при этом электрические контакты. При остывании контакты приходят в первоначальное положение. Таким образом, данная конструкция учитывает и тепло, выделенное пластиной при протекании по ней тока, и температуру окружающей среды, что делает моторпротектор простым и надежным устройством защиты.

Моторпротектор включается непосредственно в разрыв силовой цепи и может быть установлен как на поверхности обмотки статора, так и внутри обмотки. Малый размер обеспечивает простоту монтажа в ограниченном пространстве.

Возможны три варианта монтажа мотор-протекторов: winding (на поверхности обмотки); in-winding (внутри обмотки); off-winding (в специальном кармане за пределами обмотки). Эти варианты позволяют применять данную продукцию не только производителям электродвигателей, но и разработчикам, которые проектируют устройства на базе электродвигателей.

Серия 2ММ (таблица 4.3) разработана для применения в довольно крупном сегменте электродвигателей малой мощности постоянного и переменного токов, маломощных трансформаторов, соленоидов и катушек. Это компактное изделие является лучшим решением для защиты электродвигателей широкой номенклатуры в ситуациях, связанных с перегрузкой и блокировкой ротора.

Моторпротектор 2ММ выполнен в металлическом корпусе, который защищает внутренние элементы от внешних воздействий и механических деформаций. Внутри располагается калиброванная биметаллическая пластина с серебряным контактом. Неподвижный контакт, электрически изолированный от подвижного, расположен на противоположной стороне корпуса. Серия 2ММ является самой дешевой среди рассматриваемых моторпротекторов.

Серия 8ММ представляет собой компактный моторпротектор, обеспечивающий защиту двигателя при перегрузке и блокировке ротора. Температуру срабатывания можно при заказе выбрать из диапазона от 70 до 160 °С, способ монтажа возможен на обмотке

или внутри обмотки. Серии 2ММ и 8ММ предназначены для работы как с постоянным, так и с переменным токами.

Серии 7АМ и 15АМ предназначены для работы с переменным током. Возможно их применение для защиты одно- и трехфазных двигателей. Конструктивы эти моторпротекторов отличаются более крупными размерами в отличие от предыдущих, они рассчитаны на работу с большими токами. Так, серия 15АМ при рабочем токе 20 А гарантирует 3000 срабатываний. Возможна работа и с еще большим током в зависимости от приложения и предполагаемой частоты срабатывания. Согласно информации производителя, рабочий ток через моторпротекторы может достигать 60 А.

Серии 6АР (для постоянного тока) и 3МР (для переменного) содержат внутри дополнительный нагревательный элемент, через который протекает часть рабочего тока. За счет этого биметаллическая пластина изначально находится в слегка нагретом состоянии, поэтому при резком увеличении тока или температуры срабатывание происходит быстрее, чем в моторпротекторах без дополнительного нагревателя. Эти серии являются самыми чувствительными к превышению температуры и тока.

Очень интересна конструкция серии 3МРSH. Аббревиатура SH расшифровывается как self-holding (самоудержание). В состав моторпротектора входит ПТС-элемент (положительное термосопротивление). При срабатывании данного моторпротектора возврат в исходное (рабочее) положение возможен лишь при обесточивании цепи. Роль ПТС-элемента следующая: после срабатывания (размыкания контактов моторпротектора) через него протекает небольшой ток, вызывая нагрев этого элемента (он виден на фотографии, выполнен в виде таблетки).

Тепло, излучаемое ПТС-элементом и подводимое к биметаллической пластине, не дает контактам замкнуться, как в случае моторпротекторов без функции самоудержания. Основная сфера применения такого моторпротектора – бытовая техника. В случае блокировки (скажем, костью) ротора электромясорубки данное защитное устройство отключит питание электродвигателя и не запустит его вновь, пока пользователь не извлечет застрявшую кость. Запустить электродвигатель будет возможно только после выключения мясорубки и ее повторного включения тумблером питания или посредством штепсельной вилки.

Серии TH10 и TH11 имеют открытую конструкцию и предназначены для использования в различного рода фенах, конвекторах, где требуется следить за температурой горячего воздуха. Серия TH11 отличается от TH10 наличием функции самоблокировки.

Главные преимущества моторпротекторов заключаются в малых габаритных размерах, в простоте монтажа и различных способах размещения относительно обмоток электродвигателя, в возможности контролировать одновременно ток, протекающий через обмотку, и температуру обмотки. Различные способы монтажа позволяют использовать моторпротекторы не только изготовителям электродвигателей, но и производителям, выпускающим конечную продукцию и использующим электродвигатели как покупной компонент. Невысокая стоимость в сочетании с большой надежностью моторпротекторов делают эту продукцию незаменимой в тех случаях, когда требуется обеспечить защиту электродвигателей.

4.5. Температурные защиты с термодетекторами, обеспечивающими релейные характеристики срабатывания

Согласно ГОСТ 27917-88 (МЭК 34-II-2) *термодетектор с релейной характеристикой* имеет характеристику, резкое изменение которой при температуре, фиксированной в процессе изготовления, может вызвать срабатывание системы управления. Такими термодетекторами являются специально изготовленные для температурной защиты позисторы (терморезисторы с положительным температурным коэффициентом сопротивления).

Термодетекторы с зависимой характеристикой – термодетекторы с характеристикой, зависимой от температуры, способны вызвать срабатывание системы управления при заранее фиксированной в процессе изготовления температуре либо изменением зависимости температура – сопротивление, либо путем предварительного регулирования вспомогательной аппаратуры управления. Такими термодетекторами являются, например, термометры сопротивления, термоэлектрические преобразователи (термопары), терморезисторы с отрицательным температурным коэффициентом сопротивления или терморезисторы с положительным температурным коэффициентом сопротивления, не имеющие релейной характеристики.

С появлением полупроводниковых терморезисторов температурные защиты стали быстро развиваться.

Схемы и конструкции устройств температурной защиты электродвигателя разнообразны. Они зависят от типа применяемых термодетекторов, требуемой точности срабатывания, функционального назначения устройств.

Можно выделить следующие схемы температурных защит (по мере их развития):

- 1) с прямым включением термодатчиков в цепь исполнительного реле;
- 2) с использованием усилителей, мостовых схем, триггеров.

К первому типу можно отнести устройства защиты АТВ-229 и УВТЗ-2.

Область контролируемых температур устройством АТВ-229 от +24 до +131 °С с точностью ±6 °С. Температура срабатывания реле может устанавливаться через каждые 10 °С в пределах диапазона рабочих температур.

Применяемый в устройстве термистор ТР33 помещен в стеклянную оболочку. Он обладает релейным эффектом, т. е. резко, в сотню раз уменьшает свое сопротивление при нагреве до контролируемой температуры.

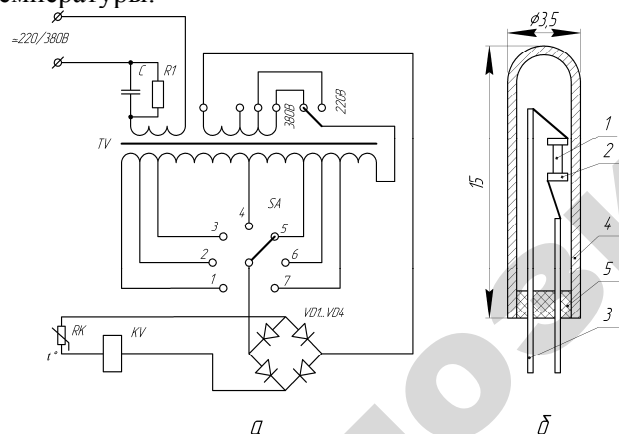


Рисунок 4.19 – Принципиальная электрическая схема устройства защиты АТВ-229 (а) и конструкция термодетектора (б):

- 1 – термистор ТР33; 2 – выводы термистора; 3 – выводы термодатчика;
4 – стеклянная колба; 5 – изоляционная заглушка

Релейный эффект происходит за счет самоподогрева термосопротивления протекающим через него током. До тех пор, пока температура окружающей среды не достигла величины уставки реле, в цепи термосопротивления протекает незначительный ток, явно недостаточный для срабатывания реле. При повышении температуры окружающей среды до величины уставки температурного реле сопротивление термистора резко уменьшается, что приводит к срабатыванию исполнительного реле, которое отключает электродвигатель от питающей сети.

Температура уставки температурного реле определяется величиной напряжения на термосопротивлении. Чем больше напряжение, тем ниже температура срабатывания.

Конденсатор *С1* и первичная обмотка трансформатора *ТV* образуют феррорезонансный стабилизатор напряжения. Он обеспечивает неизменность температурной вставки реле при снижении напряжения сети до 50 %, что гарантирует надежную защиту трехфазного электродвигателя при обрыве одной из трех фаз. Реле АТВ-229 морально устарело и не выпускается.

С появлением позисторов СТ14-1 стало возможным построение температурных защит с прямым включением позисторов в цепь реле (УВТЗ-2 в СССР, ЗПК-1 в Болгарии и др.). Принципиальная электрическая схема включения реле температурной защиты УВТЗ-2 приведена на рисунке 4.20.

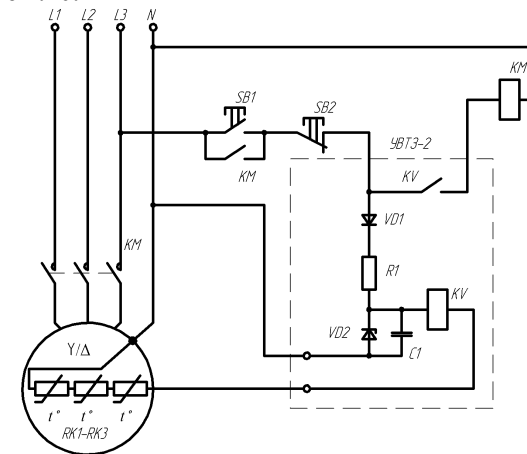


Рисунок 4.20 – Принципиальная электрическая схема включения реле температурной защиты УВТЗ-2

При подаче напряжения питания на УВТЗ-2 реле KV и последовательно включенные позисторы окажутся под напряжением стабилитрона $VD2$. Если температура обмотки двигателя окажется ниже рабочей температуры позисторов, то их сопротивление будет мало (150–450 Ом) и ток, протекающий через реле KV , будет больше тока срабатывания реле. Реле KV включится и замкнет свой контакт в цепи катушки контактора KM . Контактор включится и подключит двигатель к сети. В аварийном режиме, когда температура обмотки двигателя достигает температуры срабатывания термодатчиков, сопротивление позисторов резко возрастает. Ток в цепи реле KV резко уменьшается и оно отключается, способствуя отключению электродвигателя.

В схеме УВТЗ-2 совмещены две защитные функции: защита от аварийных тепловых режимов асинхронного двигателя и защита от обрыва нулевого провода. Обрыв его приводит к разрыву цепи питания реле KV и отключению электродвигателя.

В схеме УВТЗ-2 используется лишь один провод для соединения цепи термодетекторов с реле в отличие от других схем подобных устройств.

Устройство УВТЗ-2 имеет самоконтроль рабочего состояния, обладает малой потребляемой мощностью, имеет низкую стоимость и просто в обслуживании, однако характеризуется пониженной точностью контроля температуры.

Таким образом, устройства с прямым включением термодетекторов в цепь исполнительного реле просты по устройству, но обладают низкой точностью контроля температуры обмотки.

Примером устройства температурной защиты с использованием усилителей может служить **устройство защиты УВТЗ-1** (рисунок 4.21). Разработчиком и изготовителем устройств защиты УВТЗ-1 и УВТЗ-1М является Научно-производственное предприятие «Электрические машины» (НПП «ЭЛМАШ», г. Владимир). Устройство защиты УВТЗ-1 с применением позисторов типа СТ14-1 разработано с учетом специфики работы оборудования в сельскохозяйственном производстве и других особенностей.

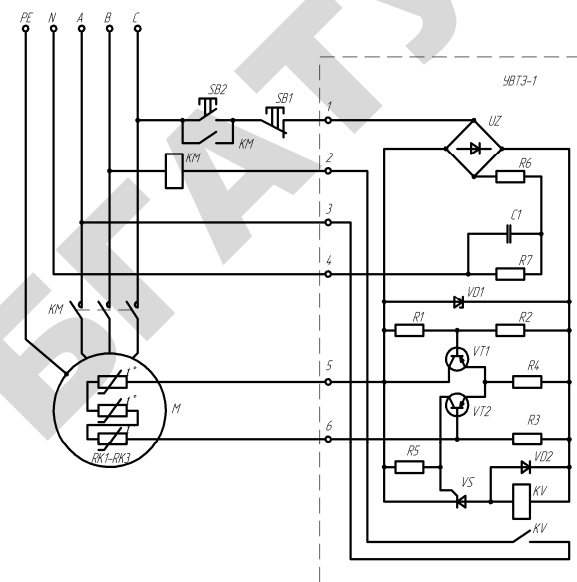


Рисунок 4.21 – Принципиальная электрическая схема включения реле температурной защиты УВТЗ-1

При разработке схем преследовалась цель максимально упростить и одновременно унифицировать систему защиты, а также уменьшить влияние разброса параметров датчиков на стабильность работы защитного устройства.

Устройство УВТЗ-1 состоит из блока стабилизированного питания и преобразователя, увеличивающего сигнал от температурных датчиков и преобразовывающего его в сигнал управления выходным элементом. Выходной элемент коммутирует цепь питания катушки электромагнитного пускателя.

При работе электродвигателя в аварийном режиме повышается температура его обмоток. Когда она станет равной температуре срабатывания термодетекторов (для СТ14-1А эта температура составляет 130 °С), сопротивление цепи термодетекторов достигает 2200 Ом, преобразователь сигнала срабатывает и с помощью промежуточного реле электродвигатель отключается от сети. Цепь питания электромагнитного пускателя будет разомкнута до тех пор, пока обмотка не остынет до определенного значения температуры, после этого возможен повторный запуск электродвигателя кнопкой $SB1$.

Питание УВТЗ-1 осуществляется от сети переменного тока 220 В, 50 Гц через конденсатор *C1*, резистор *R6* и выпрямительный мост *UZ*. Выпрямленное напряжение стабилизируется стабилитроном *VD1*.

Преобразователь выполнен в виде моста из трех резисторов *R1–R3* и четвертого резистора, в качестве которого используются позисторы. В диагональ моста включен транзисторный токовый ключ, имеющий стопроцентную обратную связь и обеспечивающий стабильность работы схемы в широком интервале температур (от $-50\text{ }^{\circ}\text{C}$ до $+60\text{ }^{\circ}\text{C}$).

Для управления промежуточным реле введен дополнительный элемент – тиристор *VS* с номинальным напряжением 50 В (см. рисунок 4.21). Такое сочетание расширяет функции самоконтроля исправной работы схемы защиты, так как в случае короткого замыкания в цепи позисторов устройство защиты отключается.

В исходном состоянии температура позисторов ниже температуры срабатывания и их сопротивление мало. Транзистор *VT1* закрыт и ток источника питания протекает через открытый транзистор *VT2* и управляющую цепь тиристора *VS*. Тиристор *VS* включается, при этом срабатывает реле *KV* и замыкает свой контакт в цепи питания электромагнитного пускателя.

При нагреве позисторов до температуры срабатывания их сопротивление резко возрастает, транзистор *VT2* закрывается, а транзистор *VT1* открывается. Происходит переход тиристора *VS* в непроводящее состояние. При этом отключается реле *KV*, способствуя отключению электромагнитного пускателя и электродвигателя от питающей сети.

При изменении температуры окружающей среды от минус $45\text{ }^{\circ}\text{C}$ до плюс $45\text{ }^{\circ}\text{C}$ сопротивление срабатывания изменяется на 20–100 Ом относительно сопротивления срабатывания при $20 \pm 5\text{ }^{\circ}\text{C}$, а при изменении напряжения питания от 154 до 242 В – на ± 30 Ом. В переводе на температуру это соответственно составляет 1,0–0,1 $^{\circ}\text{C}$.

Герметизация устройства УВТЗ-1 обеспечивает возможность работы в агрессивных средах животноводческих помещений сельскохозяйственного производства.

Схема, изображенная на рисунке 4.21, осуществляет самоконтроль. При неисправности в схеме реле *KV* отключается. При выходе из строя термодатчиков или обрыве цепи соединения термодатчиков реле *KV* также отключается. То же происходит при коротком замыкании в цепи термодатчиков. Применение электронных компонентов в этом устройстве позволило повысить точность контроля температуры.

В последующем были разработаны устройства температурной защиты типа УВТЗ-4, УВТЗ-1М.

Устройство встроенной температурной защиты УВТЗ-4Б предназначено для защиты от перегрева асинхронных электродвигателей, применяемых в сельском хозяйстве.

Устройство работает в комплекте с тремя последовательно соединенными позисторами типа СТ14-2, встроенными между витками обмоток электродвигателя, действуя на отключение магнитного пускателя.

Устройство УВТЗ-4Б имеет блок питания, состоящий из конденсаторов *C2* и *C3*, выпрямительного моста *VD6–VD9*, сглаживающего фильтра *C1*, стабилитрона *VD5* (рисунок 4.22).

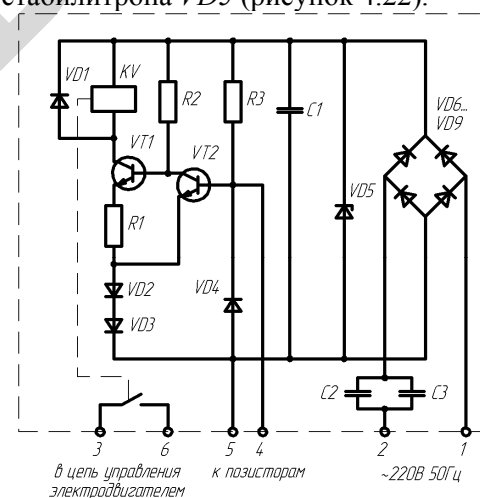


Рисунок 4.22 – Принципиальная электрическая схема устройства защиты УВТЗ-4Б

При колебаниях сетевого напряжения от 150 до 240 В на стабилитроне *VD5* сохраняется постоянное значение выпрямленного напряжения. Исполнительное устройство состоит из реле *KV*, управляемого триггером, составленным из транзисторов *VT1* и *VT2*.

Резистор *R3*, диод *VD4* и позисторы, подключенные к клеммам 4 и 5, задают смещение на базу транзистора *VT2*. Смещение на базу транзистора *VT1* обеспечивается резистором *R1* и переходом коллектор-эмиттер транзистора *VT2*.

В нормальном состоянии сопротивление позисторов незначительно, поэтому транзистор *VT2* закрыт, а транзистор *VT1* открыт. По обмотке реле *KV* протекает коллекторный ток транзистора *VT1*,

реле включено, электродвигатель находится под напряжением. На диодах $VD2$, $VD3$ создается падение напряжения, способствующее запиранию транзистора $VT2$.

При увеличении сопротивления позисторов, вызванном перегревом обмоток электродвигателя, транзистор $VT2$ открывается, а транзистор $VT1$ закрывается. В результате этого обмотка реле KV обесточивается, происходит отключение электродвигателя. Диоды $VD2$ и $VD3$ обеспечивают положительную обратную связь. Благодаря этому обеспечивается релейный эффект.

Отсутствие активных сопротивлений в цепи $C2$, $C3$ и $VD6$ – $VD9$ приводит к большому импульсу тока через диоды и стабилитрон $VD5$ при включении устройства в сеть, что отрицательно сказывается на надежности работы устройства.

Устройство защиты типа УВТЗ-1М имеет более сложную, но подобную на УВТЗ-1 принципиальную электрическую схему, которая обеспечивает большую точность в работе и меньшую зависимость от температуры окружающей среды.

Устройство защиты типа УВТЗ-1М имеет электрическую схему, изображенную на рисунке 4. 23.

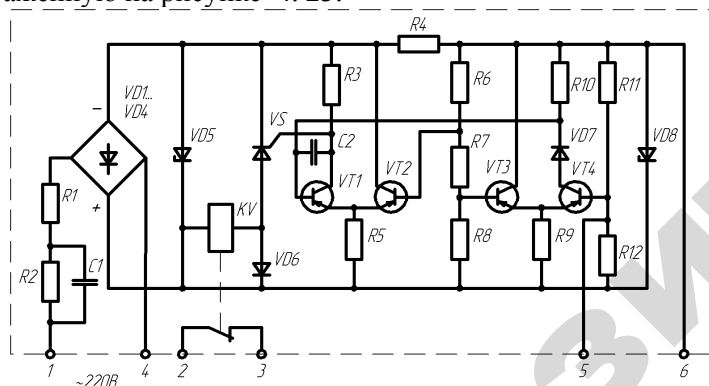


Рисунок 4.23 – Принципиальная электрическая схема устройства защиты УВТЗ-1М

Устройство защиты включает в себя узел питания, усилитель и выходное реле KV . Узел питания состоит из диодного моста $VD1$ – $VD4$, ограничивающих резисторов $R1$, $R2$ и $R4$, стабилитронов $VD5$ и $VD8$. Усилитель выполнен на транзисторах $VT1$ – $VT4$ и тиристоре VS .

Схема УВТЗ-1М работает следующим образом. Если температура обмотки электродвигателя ниже предельно допустимого значе-

ния, то сопротивление позисторов мало и напряжение, поступающее на транзистор $VT4$, будет больше значения порога срабатывания усилительного каскада $VT3$, $VT4$, определяемого делителями $R6$, $R7$, $R8$. В этом случае транзистор $VT4$ будет открыт, транзистор $VT1$ и тиристор VS – закрыты, а реле KV – обесточено.

При увеличении температуры обмоток электродвигателя сверх предельно допустимого значения сопротивление позисторов резко возрастает, сигнал, поступающий на транзистор $VT4$, уменьшается. Транзистор $VT4$ закрывается, а $VT1$ открывается. Тиристор VS и выходное реле KV включаются, контакты реле KV размыкают цепь питания катушки электромагнитного пускателя, который отключает электродвигатель от сети.

Устройство УВТЗ-1М осуществляет также самоконтроль – отключает электродвигатель при возникновении неисправности в цепи позисторов (при обрыве или замыкании их цепи).

Реле температурной защиты электродвигателей РТ-М01-1-15 выпускает ЗАО «Меандр», г. Санкт-Петербург. Реле допускает подключение от 1 до 6 позисторов СТ14-2 или других типов, соответствующих стандарту DIN 44081/44082 на необходимую температуру срабатывания [70].

Общий вид реле защиты электродвигателей РТ-М01-1-15 представлен на рисунке 4.24, а. Реле монтируется на DIN-рейке, имеет современный дизайн.

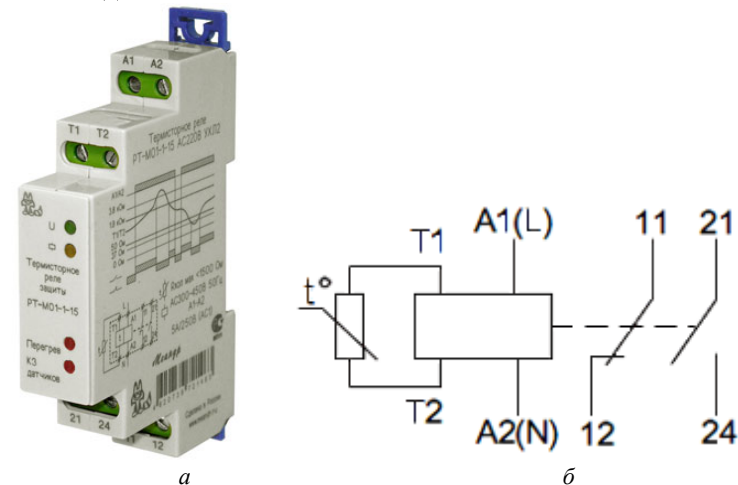


Рисунок 4.24 – Общий вид реле температурной защиты электродвигателей РТ-М01-1-15 (а) и его схема подключения (б)

На лицевой панели реле защиты расположены следующие светодиодные индикаторы: зеленого цвета «Напряжение включено»; желтого цвета «Сработало реле»; красного цвета «Перегрев»; красного цвета «КЗ датчиков».

Номинальное напряжение питания реле составляет 220 В, 50 Гц, а допустимое – от 160 до 260 В. Включение реле происходит при сопротивлении позисторов 3,4 кОм $\pm 5\%$, а отключение – при 2,3 кОм $\pm 5\%$.

Реле контролирует сопротивление цепи позисторов и отключается при сопротивлении цепи менее 25 Ом.

Реле функционирует следующим образом. В нормальном режиме работы сопротивление позисторов не достигает порога срабатывания, при этом встроенное исполнительное реле включено и контакты 21–24 (рисунок 4.24, б) замкнуты. При перегреве обмотки сопротивление позисторов резко возрастает, реле выключается и контакты 21–24 размыкаются. Электродвигатель отключается от сети. После охлаждения позисторов реле автоматически включается, замыкая контакты 21–24. Реле имеет один замыкающий и один размыкающий контакты, допускающие ток 5 А при напряжении 250 В. Диапазон рабочих температур – от -40 до $+55$ °С, степень защиты корпуса – IP40.

Все рассмотренные выше устройства имеют позисторные датчики температуры типа СТ-14. Аналогичные решения используются в иностранных устройствах. Например, в устройстве 3UN2 (термисторный прибор защиты электродвигателя) фирмы SIEMENS в качестве датчиков используются позисторы типа А стандарта DIN VDE 0660 [58]. Эти позисторы характеризуются сильным повышением сопротивления в диапазоне номинальных температур срабатывания. Скачкообразное изменение сопротивления преобразуется в самом устройстве в команду, которая используется для отключения электродвигателя. Устройство температурной защиты 3UN2 фирмы SIEMENS имеет интегрированную защиту от помех (индуктивные или емкостные наводки), то есть провода позисторов не требуют дорогого экранирования. Все расцепители устройства 3UN2 работают по принципу тока покоя и осуществляют самоконтроль на обрыв проводов в цепи позисторов. Расцепители 3UN2131 оснащены схемой определения короткого замыкания в цепи терморезисторов. Эта схема отключает электродвигатель при падении

сопротивления в цепи терморезисторов ниже значения 20 Ом. Тем самым определяется короткое замыкание, к примеру, в проводах терморезистора.

В дальнейшем получили развитие устройства температурной защиты, имеющие дополнительные блоки защиты от других аварийных режимов. Такими являются устройства температурной защиты УВТЗ-5, УВТЗ-5М, УВТЗ-5МИ.

Устройство защиты УВТЗ-5 состоит из усовершенствованной схемы температурной защиты, собранной на транзисторах $VT1$ – $VT6$, и схемы контроля напряжения нулевой последовательности («искусственной звезды») из трех резисторов $R1$ – $R3$ и первичной обмотки трансформатора TV , рисунок 4.25).

Трансформатор TV служит для гальванического разделения электрической сети и электронной схемы устройства.

Схема работает следующим образом. При температуре обмоток электродвигателя, не превышающей допустимую температуру, и при симметричной системе напряжений трехфазной сети ток поступает на схему через катушку KV герконового реле. При этом транзисторы $VT1$, $VT2$, $VT5$ и тиристор VS закрыты, а транзисторы $VT3$ и $VT4$ открыты, герконовое реле KV включено.

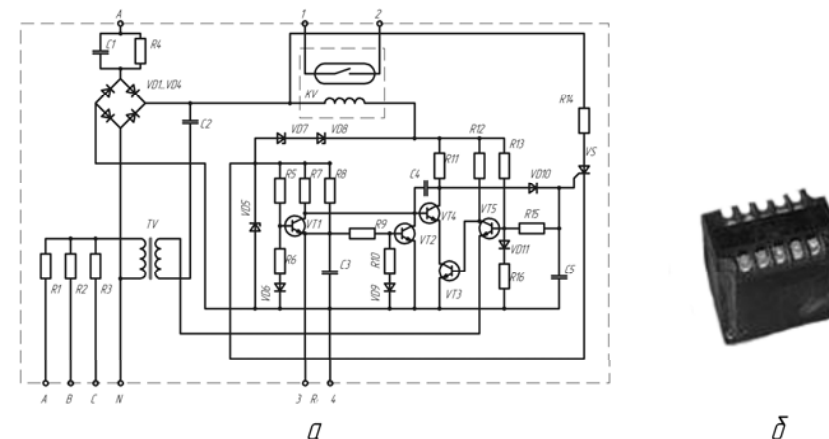


Рисунок 4.25 – Принципиальная электрическая схема устройства защиты УВТЗ-5 (а) и общий вид устройства защиты УВТЗ-5М (б)

При аварийном увеличении температуры обмоток увеличивается сопротивление позисторов. Транзистор $VT2$ открывается, а $VT4$ закрывается. Тиристор VS открывается и шунтирует KV . Контакт герконового реле размыкается, что приводит к отключению электродвигателя.

При возникновении неполнофазного режима на первичной обмотке трансформатора TV появляется напряжение нулевой последовательности. Транзистор $VT5$ открывается, а $VT4$ закрывается, тиристор VS открывается и шунтирует катушку KV . Это приводит к отключению электродвигателя.

Таким образом, устройство защиты УВТЗ-5 моментально реагирует на обрыв фазы, не допуская опасной работы электродвигателя в неполнофазном режиме или его перегрева при незапуске электродвигателя на двух фазах. Температурная защита УВТЗ-5 имеет более высокую помехоустойчивость, чем устройство УВТЗ-1М.

Модернизированное устройство защиты УВТЗ-5М имеет функции защиты, габаритные размеры и дизайн, аналогичные устройству УВТЗ-5. Отличается от УВТЗ-5 наличием светодиодных индикаторов. Оба устройства защиты выпускаются серийно Нальчикским заводом полупроводниковых приборов. Общий вид устройства УВТЗ-5М представлен на рисунке 4.25, б.

Устройство защиты УВТЗ-5МИ отличается от УВТЗ-5М наличием дополнительного блока, обеспечивающего контроль состояния изоляции электродвигателя.

Известны универсальные комплексные токовые защиты, в которых есть дополнительная функция контроля температуры обмоток. Такими на рынке России являются следующие аппараты: реле электронной защиты электродвигателя РЭЗЭ-6 [71], в котором датчик температуры выполнен в виде интегральной микросхемы КТ1019СТ1, закрепленной на монтажной теплопроводящей пластине с клеммной колодкой; реле защиты электродвигателя РЗД-1, имеющую функцию температурной защиты с позисторами; устройство защитного отключения трехфазного электродвигателя УЗОТЭ-2У, имеющего в качестве датчика температуры терморезистор с температурой срабатывания 80–90 °С [72]. Однако эти защитные устройства нельзя назвать температурными защитами, поскольку основной функцией их является токовая защита электродвигателя.

Новое поколение иностранных устройств температурных защит широкого применения имеет в качестве термодетекторов позисторы (РТС-резисторы) с широким выбором температуры срабатывания (от 70 до

170 °С), или термометры сопротивления пленочные (РТ-резисторы) на 100 и 1000 Ом (при 0 °С), или термисторы (НТС-резисторы), или термодетекторы КТУ-83 и КТУ-84 (рисунок 4.26).

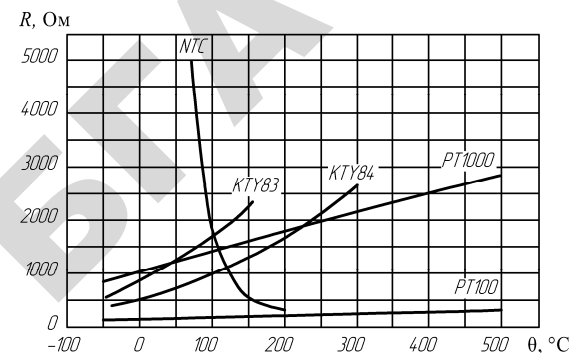


Рисунок 4.26 – Зависимость сопротивлений термодетекторов, используемых в устройствах температурных защит, от температуры

Например, семейство реле контроля температуры С-510 и СМ-М могут иметь аналоговую или цифровую схемы, один или два предельных значения температуры, 1–3 термодетектора (в устройстве С-513) [73]. В цифровых приборах трехразрядный светодиодный дисплей постоянно показывает действительное значение температуры. Контролируется обрыв или КЗ в цепи термодетекторов.

4.6. Термодетекторы для быстродействующих температурных защит электродвигателей

К термодетекторам (не коммутирующим) для температурных защит предъявляются следующие требования:

- 1) малая величина постоянной времени нагрева (или времени отклика), не более 0,8 с [64];
- 2) малые размеры и масса. Для размещения в обмотках рекомендуются температурные датчики диаметром до 3 мм. При размещении на поверхности, под клином или в станине они могут иметь большие размеры;
- 3) рабочая температура срабатывания для изоляции класса нагревостойкости B составляет 105–130 °С, для изоляции класса нагревостойкости F – 120–145 °С;

4) длительно выдерживаемая температура: для изоляции класса нагревостойкости $B - 145\text{ }^{\circ}\text{C}$; для изоляции класса нагревостойкости $F - 160\text{ }^{\circ}\text{C}$;

5) коротко выдерживаемая температура: для изоляции класса нагревостойкости $B - 200\text{ }^{\circ}\text{C}$; для изоляции класса нагревостойкости $F - 225\text{ }^{\circ}\text{C}$;

6) минимальная температура при хранении – минус $40\text{ }^{\circ}\text{C}$;

7) зависимая характеристика термодетекторов должна позволять вспомогательной аппаратуре обеспечивать сигнализацию, на $10-20\text{ }^{\circ}\text{C}$ действующую раньше, чем произойдет отключение электродвигателя;

8) зависимая характеристика термодетекторов должна позволять вспомогательной аппаратуре обеспечивать регулировку температуры срабатывания защиты от $105\text{ }^{\circ}\text{C}$ до $130\text{ }^{\circ}\text{C}$ для класса нагревостойкости B и от $120\text{ }^{\circ}\text{C}$ до $145\text{ }^{\circ}\text{C}$ – для класса нагревостойкости F ;

9) зависимая характеристика термодетекторов должна позволять вспомогательной аппаратуре обеспечивать температуру возврата, согласованную с изготовителем электродвигателя. Слишком близкая (от температуры срабатывания) температура возврата может не привести к охлаждению, достаточному для повторного включения без возможных осложнений. Слишком далекая (от температуры срабатывания) температура возврата может привести к излишне длительному охлаждению;

10) допуск на значение температуры срабатывания должен составлять не более $\pm 6\text{ }^{\circ}\text{C}$;

11) срок службы – не менее $20\ 000$ ч;

12) термодетекторы и их соединения (включая изоляцию) должны без изменения рабочих характеристик выдерживать следующее: температуру сушки обмотки; механические воздействия, возникающие при выполнении технологических операций намотки и укладки обмотки; пропиточные составы; вибрацию обмотки; воздействие электромагнитных полей.

Требования 3–12 соответствуют ГОСТ 27917-88 (МЭК 34-II-2) [74].

Проведем анализ пригодности для быстродействующих температурных защит термодетекторов следующих типов:

1) термоэлектрических (термопар);

2) резистивных металлических;

3) резистивных полупроводниковых;

4) полупроводниковых (диодных или транзисторных);

5) инфракрасных термометров.

• **Термоэлектрические (термопарные)** термодетекторы основаны на эффекте Зеебека. Он заключается в том, что в замкнутой цепи, состоящей из двух проводников разных металлов, возникает электрический ток, если температура одного спая этих проводников отличается от температуры другого спая. Ток вызван термо-ЭДС:

$$e = A\Delta\theta + B\Delta\theta^2, \quad (4.19)$$

где A, B – коэффициенты, индивидуальные для каждой термопары;

$\Delta\theta$ – разность температур горячего и холодного спаев. $^{\circ}\text{C}$.

Для измерения температуры обмоток электродвигателей рекомендуются термопары заводского изготовления исполнения 52 типа К (ТХА) без защитных оболочек, в мягкой изоляции из стеклонити, имеющие показатель тепловой инерции $0,2$ с в спокойном воздухе [64]. Малая инерционность термопар очень приемлема для температурной защиты электродвигателя. Однако для получения однозначности и стабильности работы термопары необходимо поддерживать температуру одного из спаев постоянной.

Существуют специальные микросхемы для подключения термопар, содержащие устройства компенсации холодного спая, усилители и схемы контроля исправности термопар. Примером может служить микросхема AD595 [75]. Можно применить специальные микромодули нормализации сигналов, превращающие термо-ЭДС в токовый сигнал (например, $4-20$ мА) или непосредственно в цифровой. Эти модули обеспечивают гальваническую развязку сигналов и содержат устройства компенсации температуры холодного спая.

Термоэлектрические детекторы по инерционности, размерам, прочности, диапазону измеряемых температур, классу точности перспективны для температурных защит.

• **Резистивные металлические термодетекторы (или термометры сопротивления)** основаны на свойствах металлов увеличивать электрическое сопротивление при нагреве:

$$R = R_0(1 + \alpha\theta), \quad (4.20)$$

где R_0 – сопротивление термодетектора при $0\text{ }^{\circ}\text{C}$, Ом;

θ – температура термодетектора, $^{\circ}\text{C}$;

α – коэффициент температурного сопротивления материала термодетектора, $^{\circ}\text{C}^{-1}$;

Лучшим материалом по стабильности для изготовления термодетекторов является платина ($\alpha = 0,00388 \text{ }^{\circ}\text{C}^{-1}$). Термодетекторы из платины применяются в большом диапазоне температур (от -200 до $+850 \text{ }^{\circ}\text{C}$).

В последнее время для измерения температуры широко применяются пленочные термометры сопротивления из платины размером $3 \times 3 \times 0,5$ мм, имеющие номинальное сопротивление 100, 500 или 1000 Ом разного класса точности. Они выполнены по высокоточной технологии современной микроэлектроники. Точность термодетекторов обеспечивается лазерной подгонкой их начального сопротивления.

Фирма HERAEUS Sensor-Nite GmbH разработала ряд новых платиновых термодетекторов в SMD-корпусе. Датчики устойчивы к действию вибрации, легко заменяются, имеют размеры $3 \times 1,5 \times 0,6$ мм.

Фирма HONEYWELL разработала термодетекторы HEL и HRTS на температуры от минус $200 \text{ }^{\circ}\text{C}$ до плюс $540 \text{ }^{\circ}\text{C}$, чувствительные элементы которых выполнены на основе двуокиси платины на номинальное сопротивление 100 или 1000 Ом. Точность при $0 \text{ }^{\circ}\text{C}$ составляет $\pm 0,3$ или $\pm 0,5 \text{ }^{\circ}\text{C}$. Минимальный размер термодетекторов типа HEL составляет $1,65 \times 1,27 \times 0,25$ мм, типа HRTS с гибкими выводами – $4,8 \times 8,0 \times 1,25$ мм.

Фирмой ANALOG DEVICES разработаны интегральные микросхемы АДТ70/АДТ71 для работы с платиновыми резистивными термодетекторами. Выходной сигнал – $5 \text{ мВ}/^{\circ}\text{C}$. Точность измерений – $\pm 0,1 \text{ }^{\circ}\text{C}$. Напряжение питания – $+3,3 \text{ В}$ или $\pm 5 \text{ В}$. Разработаны так же микросхемы серии АД77 с цифровым выходом.

Пленочные платиновые резистивные термодетекторы характеризуются малыми размерами и массой, малой постоянной времени нагрева (время отклика на металле – от 0,6 до 20 с). Но их недостаток состоит в хрупкости корпуса, мало пригодного для встраивания в обмотку электродвигателя.

• **Резистивные полупроводниковые термодетекторы** имеют в сотни или тысячи раз большую, чем термометры сопротивления металлические, чувствительность к изменению температуры, но характеризуются нестабильностью и нелинейностью характеристик, большим

разбросом параметров. Только некоторые типы полупроводниковых терморезисторов имеют приемлемую долговечность ($12\ 000$ – $20\ 000$ ч) и приемлемую рабочую температуру (до $240 \text{ }^{\circ}\text{C}$).

Полупроводниковые терморезисторы бывают с положительным и отрицательным температурными коэффициентами сопротивления. Оба вида полупроводниковых терморезисторов нашли применение в температурных защитах заводского изготовления. Термистор TP-33 использовался в температурной защите АТВ-229, а позисторы СТ14 – в защитах УВТЗ и АЗП российских производителей. Позисторы получили широкое применение в температурных защитах за рубежом.

В известных устройствах защиты с позисторами обеспечивается запаздывание срабатывания защиты при быстром нагреве обмотки в режиме неподвижного ротора [62]. Запаздывание происходит из-за большой тепловой инерции позисторов.

Релейное возрастание температуры позистора очень благоприятно для построения простых устройств защиты без настройки порога срабатывания.

В более сложных цифровых или микропроцессорных температурных защитах с регулируемым порогом срабатывания и предупредительной сигнализацией релейная характеристика термодетектора неприемлема. За рубежом в этом случае используются полупроводниковые термодетекторы КТУ (фирмы PHILIPS) с монотонно возрастающей характеристикой сопротивления от температуры (рисунок 4.25).

• **Полупроводниковые (диодные или транзисторные) термодетекторы** строятся на основе диодов и транзисторов, термометрической характеристикой которых служит прямое падение напряжения на переходе эмиттер-база. Температурный коэффициент p - n -перехода отрицателен и равен $2 \text{ мВ}/^{\circ}\text{C}$. Такие термодетекторы имеют стабильную и линейную характеристику преобразования, высокую чувствительность, малые габариты и массу, экономичны. Дискретность отсчета для термотранзисторных детекторов составляет $0,05$ – $1 \text{ }^{\circ}\text{C}$, погрешность – порядка $0,1 \text{ }^{\circ}\text{C}$.

Недостатком p - n -перехода является его большое дифференциальное сопротивление (25 – 30 Ом при токе 1 мА). По этой причине для достижения мало-мальски приемлемых характеристик термодетектора p - n -переход необходимо питать стабильным током. Кроме того, ни у одного диодного или транзисторного термодетекторов не нормирован температурный коэффициент напряжения и его ста-

бильность, что серьезно затрудняет их взаимозаменяемость и применение в качестве термодетекторов в промышленной аппаратуре.

В СССР были разработаны микросхемы-термодатчики К1019ЕМ1, К1019ЕМ1А [76]. Принцип действия термодатчиков К1019 основан на зависимости от температуры разности значений напряжения на эмиттерном переходе $\Delta U_{б-э}$ двух транзисторов с разной плотностью эмиттерного тока. Эта зависимость $\Delta U_{б-э}$ при заданном соотношении значений площади эмиттера транзисторов и равном токе через них оказывается пропорциональной абсолютной температуре кристалла. Ток питания микросхемы $1 \pm 0,5$ мА. Рабочий температурный интервал температур для К1019 ЕМ1 – от минус 45 до плюс 125 °С, что недостаточно для температурной защиты электродвигателей с изоляцией классов нагревостойкости *B* или *F*.

Иностраные полупроводниковые интегральные микросхемы-термодетекторы выпускаются аналоговые и цифровые различных типов. Например, датчики типа AD22100ST аналогичного назначения допускают температуру измерения до 150 °С, имеют точность ± 2 °С, коэффициент преобразования составляет 10 мВ/°С. Но и в этом случае они не соответствуют требованиям к термодетекторам для температурных защит по температурному диапазону и постоянной времени нагрева (не менее 2 с, закрепленных на металле).

- Термодетекторы с бесконтактным выходом, неконтактирующие с обмоткой, представляют большой интерес. Из бесконтактных методов измерения температуры наибольший интерес представляют **инфракрасные термометры**.

Принцип действия инфракрасного термометра следующий. Лучистый поток от измеряемого объекта попадает на зеркало и далее через модулятор на пироприемник. Усиленный электрический сигнал с выхода пироприемника поступает на вход синхродетектора. При помощи оптопары формируется опорный сигнал синхродетектора. Таким образом, на выходе синхродетектора формируется сигнал, характеризующий разность температур измеряемого объекта и внутренней полости приемника системы. Учет температуры окружающей среды производится при помощи транзисторного термодетектора, что автоматически обеспечивает компенсацию температуры окружающей среды. Сигнал с выхода синхронизатора по-

ступает на блок обработки электрических сигналов, который осуществляет линеаризацию нелинейной зависимости выходного сигнала пироприемника от температуры окружающей среды, и далее на устройство индикации температуры.

Известны зарубежные миниатюрные инфракрасные термометры типа Thermalert GPM, GP, CI и MI для стационарной установки в оборудовании. Для замены термодатчиков рекомендуются датчики CI или MI. Прочный корпус из нержавеющей стали позволяет им работать при высокой температуре. Диапазон измерения их от минус 40 °С до плюс 600 °С, выходной сигнал составляет 4–20 мА. Датчики подключаются к монитору GP, который обеспечивает индикацию температуры и питание датчиков. Японская фирма OMRON изготавливает недорогие инфракрасные термометры типа ES1B, откалиброванные под определенный диапазон температур: 10–70 °С; 60–120 °С; 115–160 °С; 140–260 °С. Повторяемость каждой модели не превышает 1 % диапазона измерений. Они заменяют стандартные термодатчики типа *K*, что позволяет подключать их к любому регулятору температуры или модулю аварийной сигнализации. Датчики имеют пластмассовый корпус и кабель с силиконовым покрытием, устойчивым к воздействию пыли и влаги.

Таким образом, инфракрасные термометры перспективны для температурных защит. Они имеют высокое быстродействие, охватывают большую площадь обмотки. Недостаток их в том, что они измеряют температуру поверхности обмотки, а самая высокая температура находится внутри ее. Инфракрасные термометры вне конкуренции при контроле нагрева вращающихся обмоток электрических машин.

В таблице 4.4 приведены основные параметры первичных преобразователей температуры для быстродействующих температурных защит электродвигателей: постоянная времени нагрева (с); пороговая чувствительность (°С); диапазон измеряемых температур (°С).

Из таблицы 4.4 следует, что для быстродействующих температурных защит электродвигателей наиболее перспективны термоэлектрические детекторы (термодатчики) и инфракрасные термометры.

Таблица 4.4 – Характеристика термодетекторов для быстродействующих температурных защит

Термодетектор	Постоянная времени нагрева, с	Пороговая чувствительность, °С	Диапазон измеряемых температур, °С	Примечание
1. Термоэлектрический (без защитной оболочки)	0,2–0,3 в воздухе	0,1–2	260...+850	Малогобаритные, прочные
2. Резистивные металлические пленочные	0,6–20 на металле	0,1–0,5	200...+850	Платиновые пленочные, хрупкие
3. Резистивные полупроводниковые (позисторы и т. п.)	20–30 в обмотке	0,01–1	-60...+240 (+275)	Постоянная времени нагрева значительная
4. Полупроводниковые термотранзисторные (термодиодные) и микросхемы – термодатчики	30–60 в воздухе, 2–12 на металле	0,05–1	-40...+125 (+150)	Температурный диапазон недостаточен, постоянная времени нагрева значительная
5. Дистанционные, не контактирующие с обмоткой – инфракрасные термометры	0,01–0,1	1–2	-40...+600	Измеряют температуру поверхности. Дороже других термодетекторов. Вне конкуренции при измерении температуры вращающихся обмоток

4.7. Характеристика позисторов температурных защит электродвигателей

Исторически сложилось так, что наибольшее применение в температурных защитах получили терморезисторы с положительным температурным коэффициентом сопротивления (позисторы), так называемые РТС-резисторы. Редко встречаются терморезисторы с отрицательным температурным коэффициентом сопротивления (термисторы), так называемые NTC-резисторы.

Температуру срабатывания позисторов, при которой происходит резкий скачок сопротивления, называют *классификационной температурой*, так как она согласована с допустимой температурой изоляции соответствующего класса нагревостойкости.

В таблице 4.5 приведены основные параметры позисторов СТ14, применяемых в устройствах встроенных температурных защит (УВТЗ) электродвигателей.

Из таблицы 4.5 следует, что позисторы надо выбирать строго по классу нагревостойкости изоляции обмоток электродвигателя. Классы нагревостойкости изоляции *A* и *E* имеют электродвигатели серии *A* и *2A*, а классы нагревостойкости изоляции *B* и *F* – электродвигатели серии *4A* и *AIP* (см. таблицу 4.2).

Таблица 4.5 – Основные параметры позисторов СТ14

Параметры	Тип позистора					
	СТ14-1Б	СТ14-1А	СТ14-2-115	СТ14-2-130	СТ14-2-145	СТ14-2-160
Классификационная температура $T_{ск}$, °С	105	130	115	130	145	160
Сопротивление при ($T_{ск} - 5$ °С), Ом	50	50	550	550	550	550
Сопротивление при ($T_{ск} + 5$ °С), Ом	1330	1330	1330	1330	1330	1330
Рабочая температура, °С	-40...+120	-40...+145	-60...+145	-60...+145	-60...+160	-60...+175
Максимально допустимая температура, °С	170	190	195	210	225	240

Окончание таблицы 4.5

Параметры	Тип позистора					
	СТ14-1Б	СТ14-1А	СТ14-2-115	СТ14-2-130	СТ14-2-145	СТ14-2-160
Максимально допустимая мощность, Вт	0,8	0,6	0,75	0,85	0,95	1,05
Срок службы, ч	13000	13000	20000	20000	20000	20000
Соответствие классу нагревостойкости	A	B	E	B	F	H

Примечания:
 1. Сопротивление позисторов СТ14-1 измерены при напряжении 0,2 В, а позисторов СТ14-2 – при напряжении 2,5 В.
 2. Классификационная температура $T_{ск}$ соответствует температуре скачка сопротивления позистора.

Из приведенных в таблице 4.5 данных видно, что у всех позисторов с различной классификационной температурой одинаковые выходные параметры. Это означает, что аппараты защиты, которые подключаются к позисторам, взаимно заменяемы, независимо от класса изоляции электродвигателя. Общий вид позисторов изображен на рисунке 4.27, а.

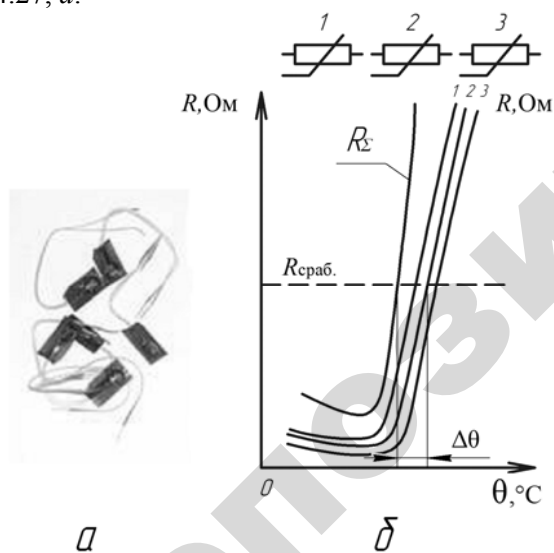


Рисунок 4.27 – Общий вид позисторов СТ14-2 (а) и температурная погрешность $\Delta\theta$ при последовательном включении трех позисторов (б)

Позисторы соединяются последовательно. Нагрев любого из позисторов приводит к увеличению общего сопротивления. Преимущество защиты на позисторах заключается в том, что они имеют малую температурную погрешность при соединении трех позисторов последовательно (можно соединять до 6-ти позисторов СТ14).

Позистор СТ14 маркируется срезанием углов защитной полиамидной пленки, в которую он запакован (рисунок 4.28). Пленка изначально имеет прямоугольную форму.

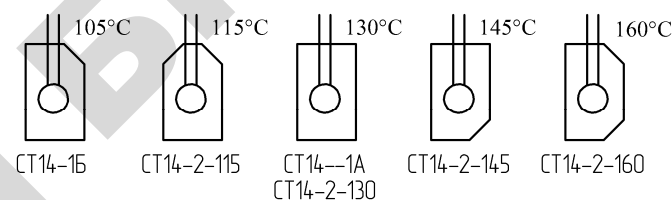


Рисунок 4.28 – Маркировка позисторов СТ14 срезанием углов защитной полиамидной пленки

Параметры взаимодействия позисторов и устройства защиты (расцепителя) отражены в стандарте DIN VDE 0660, часть 302/02.87 (IEC34-11-2 раздел 2). Позисторы должны иметь характеристику, соответствующую рисунку 4.29 [58].

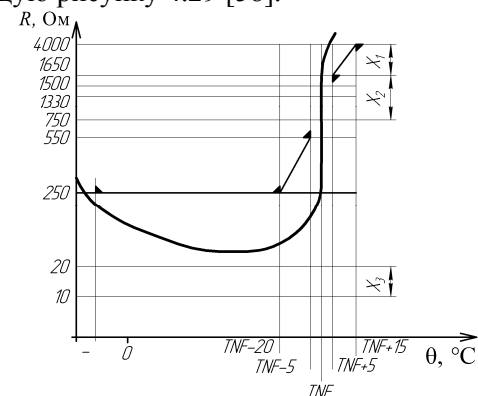


Рисунок 4.29 – График зависимости изменения сопротивления РТС-резисторов (позисторов) от температуры согласно стандарту DIN VDE 0660:
 TNF – номинальная (классификационная) температура позистора;
 X_1 – диапазон сопротивлений срабатывания расцепителя; X_2 – диапазон сопротивлений отключения расцепителя; X_3 – диапазон сопротивлений отключения расцепителя при определении короткого замыкания в цепи позистора

В соответствии с этими нормами позисторы должны обеспечить следующие условия работы расцепителя:

- при значении сопротивления менее 750 Ом он должен включаться и отключаться;
- при сопротивлениях в диапазоне между 1650 и 4000 Ом он должен отключаться;
- при понижении сопротивления в цепи датчиков от 1650 до 750 Ом он должен включаться и отключаться;
- при подключении сопротивления в 4000 Ом и при работе расцепителя с номинальным напряжением на позисторах напряжение не должно превышать 7,5 В;
- при подключении емкости до 0,2 мкФ не должно происходить заметного изменения в работе расцепителя.

Зарубежные позисторы, например, C011, имеют постоянную времени нагрева в воздухе 3,5 с, допустимую кратковременную температуру нагрева 275 °С, длительную температуру нагрева 175 °С. Номинальная температура позисторов составляет от 70 до 170 °С (через 10 °С). Номинальная температура указана последними цифрами в обозначении позистора. Например: C011-130 означает, что 130 – номинальная (классификационная) температура позистора.

4.7. Обоснование требуемой постоянной времени нагрева быстродействующего термодетектора температурной защиты электродвигателя

Постоянная времени нагрева термодетектора – это время, в течение которого его температура достигает установившегося значения при отсутствии теплоотдачи в окружающую среду. Постоянная времени нагрева термодетектора определяется по касательной к кривой его нагрева или по времени достижения им температуры нагрева $0,632\tau_{уст}$, где $\tau_{уст}$ – установившаяся температура термодетектора.

В связи со сложностью определения постоянной времени нагрева термодетектора пользуются другой характеристикой его инерционности – временем реагирования или временем отклика. Например, *время реагирования позистора* – время, в течение которого позистор, при перенесе-

нии его из среды с температурой 20 °С в среду с температурой на 20 °С выше классификационной, нагревается до температуры, при которой его сопротивление достигает 1300 Ом. Позисторы СТ14 имеют время реагирования 12 с.

На величину постоянной времени нагрева позистора влияет его изоляция, сечение выводных проводников позистора, технология его встраивания в обмотку (таблица 4.6).

Таблица 4.6 – Влияние конструктивных особенностей изоляции на постоянную времени нагрева позистора [6]

Тип позистора	Постоянная времени нагрева позистора, с				Диаметр позистора, мм	Длина позистора, мм	Сечение выводных позистора, мм ²
	в воздухе	в обмотке из эмалированных проводов					
		круглого сечения диаметром около 1 мм	прямоугольного сечения				
		позистор плотно зажат между двумя проводами	позистор плотно прижат к одному проводу, расстояние до другого провода 1–2 мм				
Малогобаритный позистор (PTM-M-KOPORC, P400C822-SIEMENS)	не более 3	4–5	5–7	10–12	не более 3,5	8	0,06
Позистор нормальных размеров (PTM-KOPORC, P400C521-SIEMENS)	не более 9	11–14	–	–	не более 5	15	0,2
KLIXON 9700	18	40–50	–	–	4,7×7,5*	24	0,75

* позистор прямоугольной формы

Из таблицы 4.6 видно, что один и тот же позистор имеет разную постоянную времени нагрева в воздухе, в обмотке из круглых проводников и в обмотке из прямоугольных проводников. Для позисторов в обмотке характерна не постоянная времени нагрева, а *постоянная времени связи его с обмоткой*, учитывающая изоляцию позистора, площадь теплового контакта и условия охлаждения (его расположение внутри или на поверхности обмотки).

Для улучшения тепловой связи термодетектора и обмотки встраивание термодетектора надо проводить тщательно. С этой же целью перед встраиванием термодетектора целесообразно его окунуть в жидкую синтетическую смолу соответствующего класса нагревостойкости. Продольная ось термодетектора должна быть параллельна проводам обмоток. Провода обмотки должны быть плотно прижаты к термодетектору. Соединение и выводы термодетектора не должны образовывать петлю, в которой переменное электромагнитное поле создавало бы ЭДС.

Требования, предъявляемые к встроенной температурной защите, изложены в материалах МЭК34-11. В этой публикации определены два значения температуры срабатывания защиты, соответствующие медленному (при перегрузках) и быстрому (при пуске) нагреву. Предельная температура срабатывания при медленном нагреве ниже, чем при быстром нагреве. Это вызвано тем, что в первом случае температура термодетектора практически такая же, как температура места его встраивания. При быстром нагреве рост температуры термодетектора отстает от роста температуры защищаемой обмотки. В таблицах 3.1 и 3.3 приведены значения температур обмоток для различных классов нагревостойкости и значения температур срабатывания защиты.

При выборе типа термодетекторов температурной защиты и места их встраивания в обмотку должно учитываться следующее:

1) температура обмотки при срабатывании защиты (среднее значение которой измеряется методом сопротивления) не должна превышать предельно допустимого значения;

2) температура обмотки не постоянна по ее объему. При переходных процессах распределение температуры зависит от скорости нагрева;

3) температура термодетектора отличается от средней температуры обмотки. Разность температур между ним и обмоткой при быстром нагреве может оказаться весьма значительной;

4) температура срабатывания термодетектора и защиты задаются с некоторым допуском. В связи с этим надо учитывать поле допусков температур срабатывания.

На основании этих соображений место и способ встраивания, температуру срабатывания термодетектора надо выбирать таким образом, чтобы защита срабатывала еще до достижения предельных значений температур.

Правильный выбор параметров защиты нельзя осуществлять только по рабочей температуре, соответствующей данному классу нагревостойкости изоляции. Необходимо знать тепловые характеристики места встраивания термодетектора не только в установившемся, но и в переходном режимах.

При выборе температуры срабатывания необходимо учитывать два основных требования:

1) с одной стороны, необходимо обеспечить, чтобы при номинальном режиме работы, а также при неблагоприятных, но допустимых условиях работы, температурная защита не срабатывала. Этот режим соответствует нижнему пределу температуры срабатывания $\theta_{\text{ср. мин}}$;

2) с другой стороны, температурная защита непременно должна срабатывать, если обмотка достигает такой температуры, длительное действие которой резко снижает срок службы изоляции. Это будет верхним пределом температуры срабатывания $\theta_{\text{ср. макс}}$.

Для определения номинальной температуры термодетектора необходимо знать зависимость между температурой обмотки в месте встраивания термодетектора и средней температурой обмотки.

На рисунке 4.30 приведена качественная картина распределения температуры по длине обмотки при различных нагрузках для электродвигателей исполнения по степени защиты IP44 и IP23 [62].

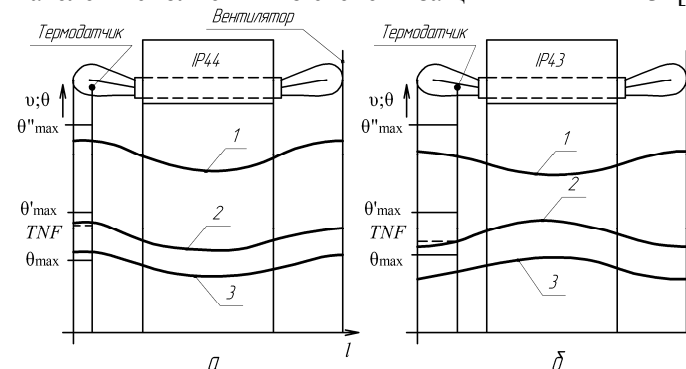


Рисунок 4.30 – Изменение температуры по длине обмотки статора при различных нагрузках для электродвигателей исполнений по степени защиты IP44 (а) и IP23 (б): 1 – быстрый нагрев в стопорном режиме; 2 – медленный нагрев при перегрузке; 3 – нагрев в номинальном режиме

На рисунке 4.30 указаны следующие температуры:

θ_{\max} – среднее номинальное значение температуры обмотки, измеренное методом сопротивления, °C;

TNF – классификационная температура термодетектора, °C;

θ'_{\max} – предельное значение температуры срабатывания защиты при медленном нагреве (перегрузке), °C;

θ''_{\max} – предельное значение температуры срабатывания защиты при быстром нагреве (стопорный режим), °C;

θ – текущее значение температуры, °C.

Из рисунка 4.30, *а* (закрытые сомовентилируемые электродвигатели) следует, что при быстром нагреве обмотки (кривая 1) наблюдается заметное увеличение температуры лобовых частей обмотки над температурой в пазах статора. Наибольшая температура кривой 1 меньше предельного значения температуры срабатывания защиты при быстром нагреве θ''_{\max} . То же самое можно сказать о кривой 2 медленного нагрева при перегрузке. Наибольшая температура по кривой 2 меньше θ'_{\max} . Только при номинальном режиме в некоторых точках кривой 3 будет температура обмотки выше температуры θ_{\max} .

Для электродвигателей защищенного типа характерна другая закономерность изменения кривых 3 и 2 (рисунк 4.30, *б*). Наибольшая температура наблюдается в пазах статора при номинальном режиме работы (кривая 3) и при медленном нагреве в режиме перегрузки (кривая 2). Только при быстром нагреве (кривая 1) в стопорном режиме температура лобовых частей больше, чем в пазах. Эти особенности связаны с системой охлаждения защищенных электродвигателей.

Качественное изменение температуры термодатчика и обмотки во времени пуска и перегрузки показано на рисунке 4.31. Здесь же приведены допустимые температуры, указанные на рисунке 4.30.

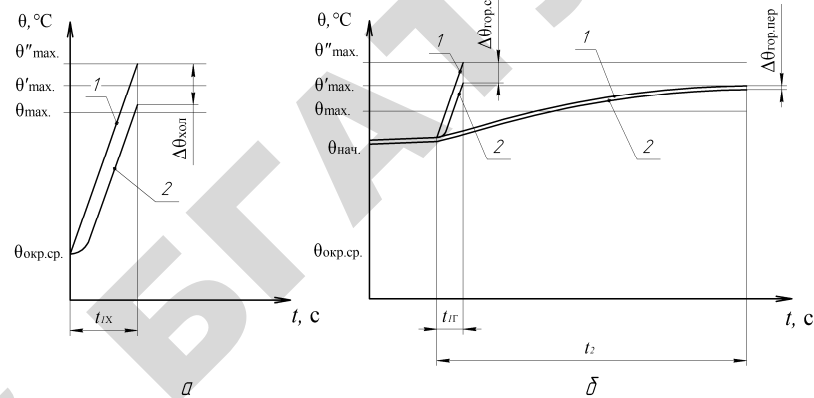


Рисунок 4.31 – Изменение температур обмотки 1 и термодетектора 2 при быстром нагреве в стопорном режиме с холодного состояния (*а*) и с горячего состояния при быстром нагреве в стопорном режиме (за время t_{1r}) и при медленном нагреве (при перегрузке за время t_2) (*б*)

Кроме этого, на рисунке 4.31 указаны следующие температуры:

$\theta_{\text{нач}}$ – начальная температура термодетектора (обмотки) в горячем состоянии, °C;

$\Delta\theta_{\text{хол}}$ – температура запаздывания термодетектора при быстром нагреве с холодного состояния, °C;

$\Delta\theta_{\text{гор. стоп}}$ – температура запаздывания термодетектора при стопорном режиме с горячего состояния, °C;

$\Delta\theta_{\text{гор. пер}}$ – температура запаздывания термодетектора при перегрузке с горячего состояния, °C

Из рисунка 4.31 следует:

1) наибольшее запаздывание по температуре срабатывания наблюдается в стопорном режиме с холодного состояния из-за инерции термодетекторов;

2) наибольшая температура термодетектора достигается в стопорном режиме с горячего состояния;

3) время действия защиты в стопорном режиме с горячего состояния должно быть меньше, чем с холодного состояния.

• Установим, какую постоянную нагрева должны иметь термодетекторы, чтобы обеспечить наименьшее запаздывание по темпе-

ратуре срабатывания защиты. Примем начальными условиями наилучший вариант нагрева обмотки:

1) температура окружающего воздуха + 40 °С;

2) обмотка обтекается номинальным током, и, следовательно, достигла температуры θ_{\max} ;

3) произошло заклинивание рабочей машины и электродвигатель, включенный в сеть, оказался в режиме заторможенного ротора (в стопорном режиме). Нагрев обмотки электродвигателя в этом случае происходит по линейной зависимости. Ранее, (глава 3, параграф 3.2) было определено допустимое время нахождения электродвигателя в стопорном режиме с горячего состояния (рисунок 3.6). Для четырехполюсного электродвигателя мощностью 5,5 кВт оно составило наименьшую величину – 6,4 с.

Температура термодетектора θ_t в начальный момент изменяется по экспоненте, а после времени t , равном четырем постоянным времени связи T_c , т. е. $t = 4T_c$ – прямолинейно, с постоянным отставанием на одинаковую величину от температуры обмотки (см. рисунок 4.29):

$$\theta''_{\max} - \theta_t = v_t 4T_c, \quad (4.21)$$

где v_t – скорость роста температуры, °С/с.

Из уравнения (4.21) следует, что чем меньше постоянная времени связи термодетектора с обмоткой, тем ближе температура обмотки и термодетектора в момент срабатывания защиты. Наибольшая допустимая постоянная времени связи соответствует условию:

$$T_c \leq \frac{t_{\text{доп}}}{4}. \quad (4.22)$$

В таблице 4.6 приведены данные о значении постоянных времени нагрева позисторов в воздухе T_b и в обмотке. Постоянная нагрева позистора в обмотке соответствует постоянной времени связи T_c позистора с обмоткой. Из таблицы 4.6 следует, что постоянная времени связи T_c примерно в два раза больше, чем постоянная времени нагрева T_b позистора в воздухе. Тогда уравнение (4.21) запишется приближенно в виде:

$$2T_b \leq \frac{t_{\text{доп}}}{4} \quad \text{или} \quad T_b \leq \frac{t_{\text{доп}}}{8}. \quad (4.22)$$

По уравнению (4.22) определяются требуемые постоянные нагрева термодетекторов для температурных защит электродвигателей серии 4А [77]. Из этих расчетов следует, что постоянная нагрева быстродействующего термодетектора должна составлять $\frac{6,4}{8} = 0,8$ с (для электродвигателя основного исполнения мощностью 5,5 кВт). Для электродвигателей с повышенным скольжением и многоскоростных постоянная нагрева быстродействующего термодетектора должна составлять менее 0,5 с.

4.9. Совершенствование температурных защит электродвигателей

Опыт эксплуатации устройств защиты УВТЗ с позисторными термодетекторами в сельском хозяйстве выявил их следующие недостатки [78]:

1) в связи с большой постоянной времени нагрева термодетектора срабатывание защиты при стопорном режиме работы происходит с запаздыванием;

2) в проводах подключения термодетекторов, проложенных рядом с силовыми проводами, индуцируется паразитная ЭДС, что приводит к ложным срабатываниям защиты [79];

3) для подключения устройств защиты УВТЗ необходимы дополнительные монтажные работы, связанные с прокладкой двух проводов от датчиков к устройству защиты. По этой причине температурные защиты во многих хозяйствах не используются [78].

К этим недостаткам следует прибавить следующие:

4) устройства защиты УВТЗ не имеют регулировки температуры срабатывания, поэтому всегда при перегрузке отключается электродвигатель при температурах, выше допустимых;

5) устройства защиты УВТЗ не имеют предупредительной сигнализации, которая позволила бы оператору уменьшить нагрузку на валу электродвигателя и его нагрев.

Развитие температурных защит направлено на устранение отмеченных недостатков.

Первое направление совершенствования температурной защиты связано с увеличением ее быстродействия следующими путями:

1) использование термодетекторов с малой постоянной времени нагрева;

2) контролем не только температуры обмотки, но и скорости изменения температуры; при этом обеспечивается упреждающее отключение защиты;

3) подогревом термодетектора при перегрузках током от отдельного источника, пропорциональным току перегрузки.

Путь 1. В работе [64] показано, что для быстродействующей температурной защиты требуются термодетекторы, имеющие постоянную времени нагрева менее 0,8 с. Предлагается использовать термопары типа ТХА-1199, исполнения 52, имеющие диаметр термопроводов 0,2 мм и длину 700 мм. Постоянная времени нагрева такой термопары составляет в воздухе 0,2 с.

Путь 2. В теории автоматического регулирования известен прием корректировки входного сигнала путем учета производной от его изменения, которая приводит к компенсации запаздывания и упреждающему реагированию. Применительно к температурной защите контролируется не только сигнал, пропорциональный температуре, но и сигнал, пропорциональный скорости изменения температуры.

Исследования, проведенные в [80], показали, что устройство с контролем скорости изменения температуры обеспечивает отключение электродвигателя с заторможенным ротором при 48–60 °С, а серийно выпускаемое устройство УВТЗ-1 – при 200 °С (выше допустимой температуры). Однако серийно устройства такого типа не выпускаются.

Такие устройства не могут быть универсальными (для многих мощностей электродвигателей), поскольку требуется индивидуальная настройка прибора на номинальную скорость роста температуры. Выполнение прибора на базе аналоговых элементов не способствует увеличению надежности и точности в настройке и в работе. Цифровые приборы такого типа не выпускаются, но разработаны [81].

Путь 3. Подогрев термодетектора током, пропорциональным току электродвигателя, использовался ранее в температурно-токовом реле ТТ-10 и показал его эффективность [68].

В самом простом случае термодетектор состоит из позистора R_t и нагревателя EK (рисунок 4.32, *a*). Выводы позистора присоединены к усилителю A , а выводы нагревателя – к вторичной обмотке трансформатора TV , первичная обмотка которого присоединена к трансформатору тока TA . Ток в цепи нагревателя протекает по-

стоянно. Чем больший ток протекает в цепи электродвигателя, тем больший нагрев имеет терморезистор от обмоток и от нагревателя EK . При перегрузке происходит быстрое срабатывание блока защиты A и отключение электромагнитного пускателя KM .

Недостатками устройств, реализовавших температурную защиту с дополнительным подогревом термодетектора при работе электродвигателя, являются сложность настройки и необходимость изменения параметров устройств для разных типоразмеров электродвигателей.

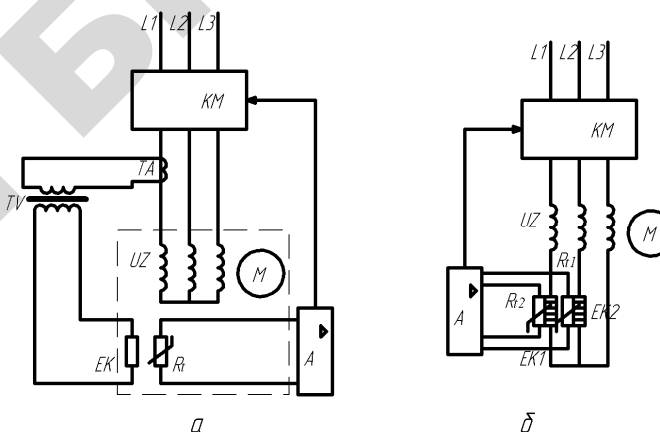


Рисунок 4.32 – Принципиальная электрическая схема температурной защиты с дополнительным подогревом термодетектора при работе электродвигателя (*a*) и с усовершенствованными термодетекторами в обмотке (*b*)

Известно устройство с усовершенствованными термодетекторами, имеющими нагреватели EK из медных пластин, к которым приварены позисторы R_{t1} и R_{t2} [82, 83], рисунок 4.32, *b*.

Нагреватели соединены с концами обмотки, образующими «звезду». При нормальном режиме работы температура нагревателя соответствует температуре обмотки. Позисторы имеют хороший контакт с нагревателем и при перегрузке по току быстро нагреваются. Происходит отключение электромагнитного контактора KM .

Недостатками такого устройства являются сложность монтажа и то, что для каждого типоразмера электродвигателя требуются индивидуальные нагреватели.

В [84] показано, что использование дополнительного подогрева позисторов током, пропорциональным току обмотки, позволило при скоро-

сти нарастания температуры 2,2 °С/с уменьшить динамическую погрешность (разность температур обмотки и позисторов в момент срабатывания защиты) с 25 °С до 5 °С.

В [85] описано устройство температурной защиты, разработанное в лаборатории автоматической защиты электрооборудования в БГАТУ, в котором цикл подогрева термодетектора чередуется с циклом измерений его сопротивления, причем подогрев термодетектора производится только тогда, когда ток электродвигателя превышает номинальное значение (рисунок 4.33).

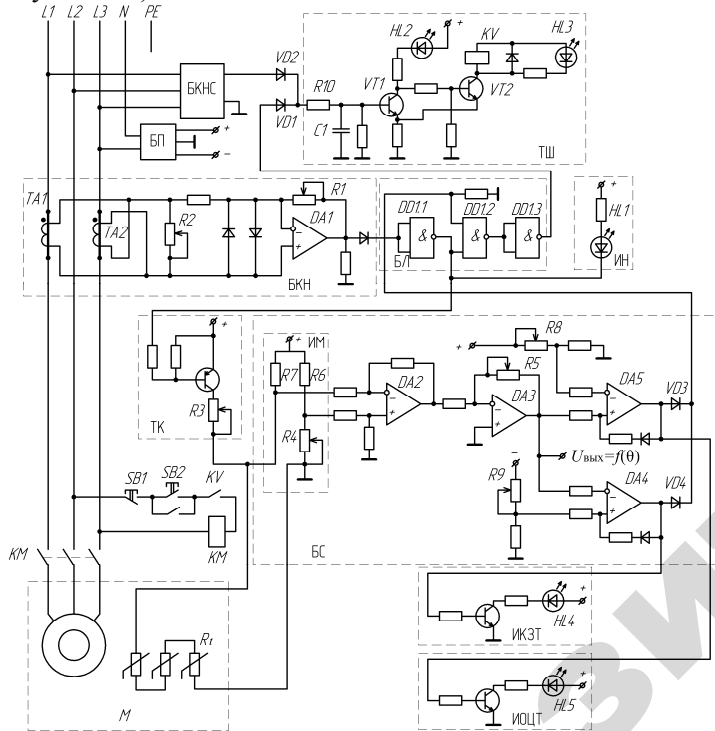


Рисунок 4.33 – Принципиальная электрическая схема устройства температурной защиты с импульсным подогревом термодетектора R в стопорном режиме (а. с. СССР №1408490)

Устройство состоит из следующих узлов: блока контроля трехфазного напряжения сети (БКНС); двухполярного блока питания (БП); блока контроля нагрузки (БКН), который имеет трансформаторы тока ТА1 и ТА2. Вторичные обмотки этих трансформаторов тока соединены

встречно (на разность токов двух фаз) и нагружены на переменный резистор R2. В блок БКН входит также операционный усилитель DA1, коэффициент усиления которого регулирует переменный резистор R1; блока логики (БЛ); исполнительного органа на триггере Шмитта (ТШ) с индикаторами HL2 и HL3; транзисторного ключа (ТК); индикатора настройки (ИН) или светодиодный индикатора HLI; блока сравнения (БС). Последний включает дифференциальный усилитель DA2, инвертирующий усилитель DA3, компаратор DA4 нижнего сопротивления термодетектора, компаратор DA5 верхнего сопротивления термодетектора, а также измерительный мост (ИМ), состоящий из резисторов R4, R6, R7 и термодетектора R_t; индикатора короткого замыкания термодетектора (ИКЗТ) на базе светодиода HL4; индикатора обрыва цепи термодетектора (ИОЦТ) на базе светодиода HL5.

При пусковых токах электродвигателя в момент положительной полуволны выходного напряжения блока БКН инвертор DD1.1 имеет на выходе напряжение логического нуля и индикатор HLI светится. Одновременно включается транзисторный ключ и на резистор R_t поступает импульс подогревающего тока. Величину этого тока регулируют резистором R3 таким образом, чтобы срабатывание устройства защиты происходило за время, меньшее допустимого времени нахождения электродвигателя в режиме заторможенного ротора.

В момент подогрева термодетектора на выходе блока сравнения появляется сигнал логической единицы, поступающий на вход элемента DD1.2. На второй вход этого элемента поступает сигнал логического нуля и поэтому на выходе элемента И-НЕ DD1.2 будет сигнал логической единицы, а на выходе инвертора DD1.3 – сигнал логического нуля. Таким образом блок логики осуществляет блокировку от срабатывания защиты в момент дополнительного импульсного подогрева термодетектора R_t.

В момент отрицательной полуволны пускового тока на выходе блока DA1 логический нуль. Следовательно, на выходе инвертора DD1.1 – логическая единица, транзисторный ключ закрыт и HLI не светится. В этот момент происходит измерение сопротивления термодетектора и на выходе усилителя DA3 появляется напряжение, пропорциональное температуре электродвигателя.

Если напряжение на выходе усилителя $DA3$ превысит порог срабатывания компаратора $DA5$ (что соответствует возрастанию температуры до предельно допустимой), то на выходе блока $A5$ появляется сигнал логической единицы. Этот сигнал поступает на второй вход элемента $DD1.2$. Одновременно и на первый вход элемента $DD1.2$ поступает логическая единица, отчего на выходе $DD1.2$ будет логический нуль, а после инвертора $DD1.3$ – логическая единица. Сработает триггер Шмитта. Реле KV и сигнализатор $HL3$ отключатся. Контакты реле KV разомкнут цепь катушки электромагнитного пускателя KM и электродвигатель отключится от сети.

В нормальном режиме работы происходит измерение температуры термодетектора. В это время на выходе блока контроля напряжения сигнал логического нуля, а на выходе $DD1.2$ – логическая единица. На второй вход этого элемента поступает сигнал логического нуля, поэтому на выходе блока логики – сигнал логического нуля и исполнительный орган не срабатывает.

С помощью подстроечного резистора $R4$ балансируется измерительный мост. С помощью резистора $R5$ выбирается масштаб выходного напряжения при изготовлении устройства. Резистором $R8$ устанавливается верхний порог контролируемого сопротивления термодетектора R_t , следовательно, верхняя температура срабатывания.

Резистором $R9$ выбирается нижнее сопротивление термодетектора (режим его короткого замыкания).

При нарушении вентиляции, чрезмерном нагреве окружающей среды, перекосе фаз и по другим причинам температура обмоток увеличится выше нормы. В этом случае на выходе блока сравнения появится сигнал логической единицы. На обоих входах элемента $2И-НЕ DD1.2$ логические единицы, следовательно, на выходе – логический нуль. После инвертора $DD1.3$ появляется напряжение на входе блока ТШ. Отключатся реле KV и $HL3$, включится сигнализатор $HL2$ «Сработала защита». Одновременно включится индикатор $HL5$ «Превышение температуры». Отключатся KM и электродвигатель от сети.

В случае обрыва цепи термодатчика на выходе компаратора $DA5$ появляется логическая единица, которая через диодный элемент $VD3$ поступает на второй вход элемента $DD1.2$. Срабатывает индикатор $HL5$ «Обрыв в цепи термодетектора». Далее защита сработает, как описано выше.

При КЗ в цепи термодатчиков на выходе компаратора $DA4$ появляется логическая единица, которая поступает через диодный элемент $VD4$ на второй вход элемента $DD1.2$ и далее защита срабатывает, как описано выше. Но теперь дополнительно сработает индикатор $HL4$ «КЗ в цепи термодетектора».

При неполнофазном режиме срабатывает блок контроля трехфазного напряжения БКН, который выдает сигнал логической единицы. Через диод $VD2$ этот сигнал поступает на вход блока ТШ и приводит к отключению реле KV и двигателя от сети.

Таким образом, снабжение температурной защиты устройством импульсного подогрева термодетектора позволяет устранить недостаток температурных защит – запаздывание при срабатывании в стопорном режиме.

Второе направление совершенствования температурных защит связано с устранением условий для наведения ЭДС в проводниках связи термодетекторов с блоком усиления и релейного выхода. Известны пути устранения этого недостатка:

- 1) в качестве проводников связи использовать витую пару;
- 2) блоком усиления и релейного выхода встраивать в коробку выводов электродвигателя;
- 3) вообще отказаться от проводников связи и передавать сигнал отключения по проводам силовой сети или по радиоканалу.

• Избавиться от наводимой в проводниках связи паразитной ЭДС можно путем скручивания проводников между собой в жгут (в витую пару). Это обеспечивает минимальное расстояние между ними и их пространственную транспозицию в трубе или в кабельном канале [79].

• Другим решением этого вопроса является установка блока усиления и реле в коробке выводов электродвигателя. В этом случае от релейного выхода прокладываются два проводника к электромагнитному пускателю. По ним передается сигнал включения (отключения) электромагнитного пускателя. Наводка ЭДС в этих проводах не влияет на работу схемы. Такое устройство защиты было разработано под маркой БЭТЗ [86]. Оно встраивается в коробку выводов электродвигателя. Другие недостатки защиты УВТЗ при этом остаются неустраненными. Прокладка проводников сопряжена с большими трудностями на действующих электроустановках.

• Дальнейшим шагом в этом направлении является решение вообще отказаться от прокладки дополнительных проводников. Такое

устройство разработано в лаборатории автоматической защиты электрооборудования БГАТУ аспирантом Ю. Н. Демянковым. Сущность его поясняет рисунок 4.34.

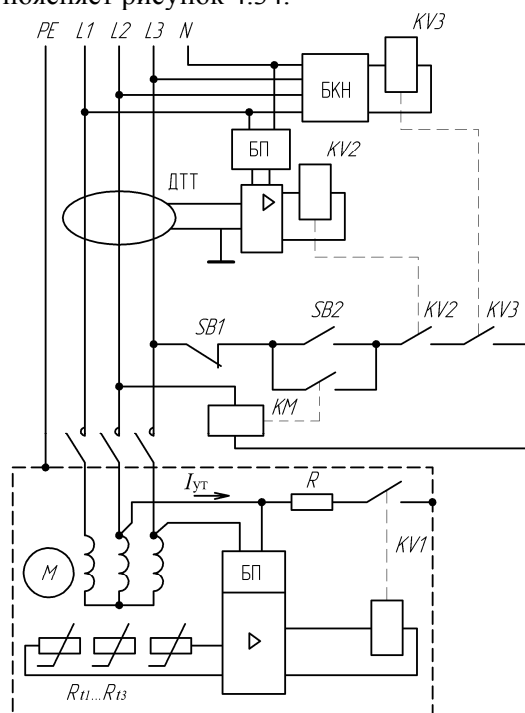


Рисунок 4.34 – Принципиальная электрическая схема устройства температурной защиты с искусственным созданием тока утечки на корпус при перегреве обмотки

Устройство состоит из двух частей. Первая часть размещается в коробке выводов электродвигателя. Она состоит из блока питания, усилителя и выходного реле $KV1$. На вход усилителя включена цепочка из трех позисторов. Это устройство контролирует температуру обмотки электродвигателя.

Вторая часть устройства размещена в коробке электромагнитного пускателя. Она имеет блок контроля трехфазного напряжения БКН, блок питания БП, усилитель и дифференциальный трансформатор тока (ДТТ), контролирующей утечку тока в цепи электродвигателя. Выходное реле $KV2$ этого блока замыкает свой контакт

в цепи электромагнитного пускателя при исправности его усилителя и отсутствии тока утечки в электродвигателе. В нормальном режиме работы реле $KV2$ и $KV3$ включены.

При перегреве обмоток электродвигателя $KV1$ включается и замыкает фазу сети через резистор R на корпус. Создается ток утечки $I_{ут}$, который улавливает ДТТ. Реле $KV2$ отключается, разрывая цепь электромагнитного пускателя. Электродвигатель отключается от сети. При неисправности блока БКН или неисправности сети реле $KV3$ отключается.

Устройство контролирует дополнительно ток утечки, возникающий при повреждении изоляции электродвигателя, и заменяет отдельно стоящее УЗО.

- Что касается устранения четвертого и пятого недостатков температурных защит, связанных с регулировками температуры срабатывания и температуры, при которой происходит предупредительная сигнализация, то они решаются при конструкторской проработке схемы. Следует отметить, что при использовании позисторов, имеющих релейную характеристику изменения сопротивления от температуры, устранение четвертого и пятого недостатков температурных защит трудно выполнить. Реализовать эти требования наиболее просто при плавно изменяющихся характеристиках термодетектора $R = f(\theta)$, но в этом случае необходимо отказаться от позисторов.

Следовательно, дальнейшее развитие температурных защит может быть связано с использованием новых быстродействующих термодетекторов, например, термопар.

На рисунке 4.35 изображена схема быстродействующей температурной защиты с термоэлектрическими детекторами (термопарами) [64]. Блоки усилителей $A1$, $A2$, $A3$ построены по одной и той же схеме. Они обеспечивают компенсацию температуры холодных спаев термопар и усиление ЭДС термопар. В устройстве используется одна микросхема OP491, имеющая 4 одинаковых операционных усилителя. Три операционных усилителя используются в блоках $A1$, $A2$, $A3$. Четвертый усилитель $DA1.4$ используется как компаратор. С выхода трех каналов $A1$, $A2$, $A3$ напряжение, пропорциональное температуре, поступает на логическую схему ИЛИ, выполненную на диодах $VD4$, $VD5$, $VD6$, а с выхода

этой схемы – на делитель $R6–R7$, с выхода делителя – на инвертирующий вход компаратора $DA1.4$. Выход компаратора связан с входом оптотранзистора U , в выходную цепь которого включено герконовое реле KV .

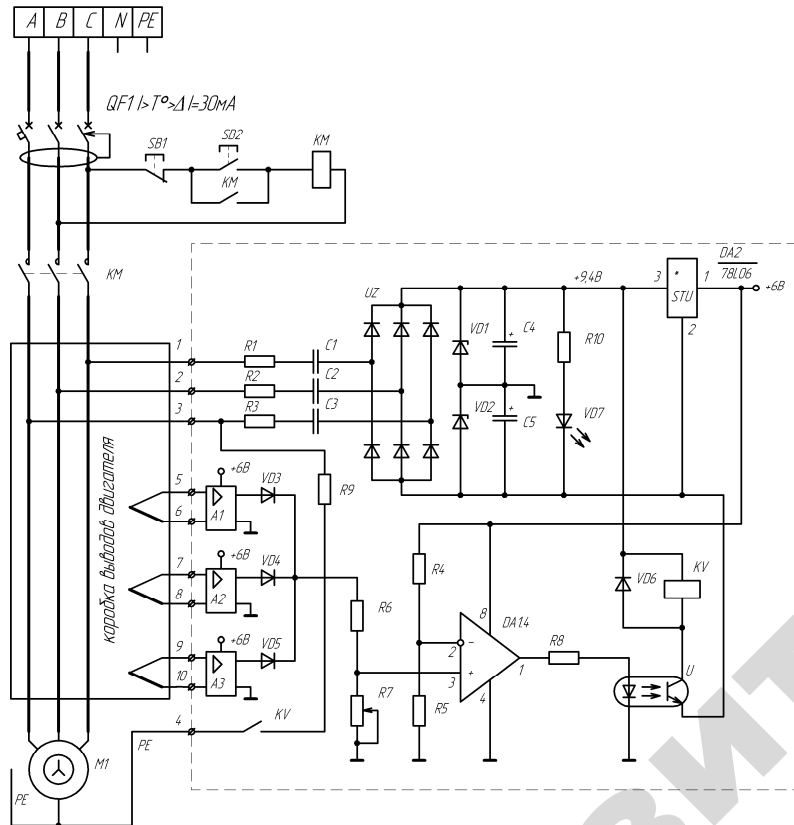


Рисунок 4.35 – Принципиальная электрическая схема быстродействующей температурной защиты асинхронного электродвигателя

Блок питания для данной схемы образован из трехфазного двухполупериодного выпрямителя, входы которого через резисторы $R1–R3$ и конденсаторы $C1–C3$ подключены к фазам питающей сети, а на входе включены стабилитроны $VD1–VD2$ и интегрирующие конденсаторы $C4$ и $C5$. На выходе каждого из стабилитронов на-

пряжение 4,7 В. Полное напряжение схемы составляет 9,4 В. На это напряжение включается интегральный стабилизатор $DA2$ типа 78L06. На его выходе устанавливается напряжение +6 В. Половина этого напряжения (+3 В) подается на блоки $A1–A3$ и на компаратор $DA1.4$. Транзистор VT и реле KV включаются на полное напряжение схемы 9,4 В. Инвертирующий вход компаратора $DA1.4$ подключен к делителю напряжения $R4–R5$.

Температурная защита работает следующим образом. При включении электромагнитного пускателя KM питание подается на блок питания устройства. На выходе блоков $A1–A3$ появляется напряжение, пропорциональное температуре в местах установки термодатчиков. На выходе диодного элемента ИЛИ появляется наибольшее из напряжений блоков $A1–A3$, которое поступает на делитель $R6–R7$. Если напряжение на инвертирующем входе компаратора $DA1.4$ выше, чем на неинвертирующем входе, то на выходе микросхемы $DA1.4$ устанавливается нулевое напряжение, оптотранзистор U закрыт, реле KV отключено.

Если температура датчиков достигает предельного значения, то напряжение на неинвертирующем входе компаратора $DA1.4$ превысит значение напряжения на инвертирующем входе и на выходе его появится положительное напряжение, отчего оптотранзистор U откроется и сработает реле KV . Его контакт KV замкнется и создаст через резистор $R9$ искусственную утечку тока с фазы на корпус, отчего дифференциальный выключатель QF сработает и отключит электродвигатель от сети. С помощью переменного резистора $R7$ настраивается порог срабатывания устройства.

Таким образом, это устройство (совместно с УЗО) не нуждается в проводниках связи термодетекторов с блоком усиления и релейного выхода.

Новым и перспективным направлением температурных защит является переход от аналоговых схем к цифровым. Это позволяет повысить стабильность работы устройства, его помехоустойчивость, а также уменьшить габариты. Цифровые схемы перспективны в связи с переходом к микропроцессорным температурным защитам. Микропроцессорная защита может обеспечить использование электродвигателя с учетом термического резерва изоляции [87]. Структурная схема такой защиты состоит из температурного датчика Rt , резисторов $R1$ и $R2$ (рисунок 4.36).

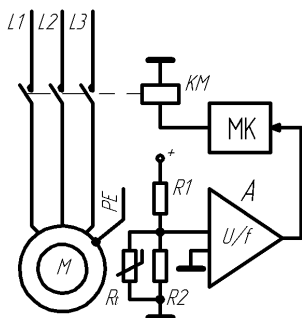


Рисунок 4.36 – Структурная схема микропроцессорной температурной защиты асинхронного электродвигателя с контролем резерва изоляции

С термодетектора снимается сигнал, который подается на вход аналого-цифрового преобразователя *A*. Его выходной сигнал подается на микроконтроллер *МК*, который по заложенной программе управляет узлом коммутации *КМ* электродвигателя. В соответствии с программой работы микроконтроллера электродвигатель отключается не при максимально допустимой температуре нагрева обмотки, а при среднем допустимом ее значении с учетом термического резерва изоляции. В этой схеме есть возможность знать резерв изоляции электродвигателя и диагностировать его состояние по этому резерву.

Во многих исследованиях отмечается перспективность температурных защит по сравнению с другими видами защит, но указывается на запаздывание срабатывания позисторов при неполнофазном и стопорном режимах работы.

Известен путь устранения этих недостатков без конструктивного изменения позисторных температурных защит – контролировать дополнительно неполнофазный и стопорный режимы работы с помощью блоков фазовой и токовой защиты.

Кроме того, включать электродвигатель в сеть требуется только при исправной изоляции обмотки электродвигателя. Для контроля изоляции обмотки перед пуском требуется использовать блок контроля изоляции обмотки.

При разработке температурной защиты следующего поколения следует максимально использовать цифровую технику. Следует предусмотреть предупредительную (за 10 °С до максимальной температуры) сигнализацию, а так же задатчик температуры, обеспечивающий регулировку температуры срабатывания защиты от 110 °С до 140 °С, через 5 °С.

При выполнении этих условий возможны два варианта температурной защиты. В первом варианте используются инерционные термодетекторы, то есть позисторы, во втором варианте – быстродействующие термоэлектрические детекторы (термопары) или инфракрасные термометры.

Структурная схема первого варианта перспективной температурной защиты представлена на рисунке 4.37.

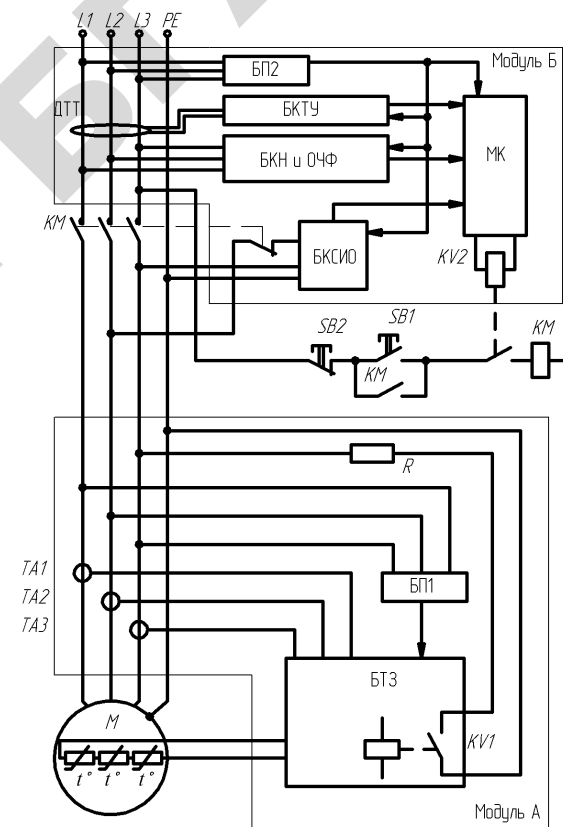


Рисунок 4.37 – Структурная схема первого варианта перспективной температурной защиты с использованием позисторов: БТ3 – блок температурной защиты; БП1, БП2 – блок питания; ТА1–ТА3 – датчики тока; БКТУ – блок контроля тока утечки; ДТТ – дифференциальный трансформатор тока; БКН и ОЧФ – блок контроля напряжения и обратного чередования фаз; БКСИО – блок контроля сопротивления изоляции обмотки перед пуском; МК – микроконтроллер

Устройство содержит два модуля. В модуле *A*, находящемся в коробке выводов электродвигателя, контролируются температура обмотки по сопротивлению позисторов и ток перегрузки с помощью датчиков тока. Схема блока температурной защиты (БТЗ) построена по аналогии с рисунком 4.34 таким образом, чтобы при токе, превышающем ток уставки, происходил дополнительный подогрев позисторов током, пропорциональным перегрузке. Это ускоряет срабатывание блока температурной защиты при перегрузках и в стопорном режиме работы. Срабатывает реле *KV1*, его контакт искусственно создает ток утечки через резистор *R*.

В модуле *B*, находящемся в коробке электромагнитного пускателя, на утечку тока реагирует дифференциальный трансформатор тока блока контроля тока утечки (БКТУ) и пошлет сигнал в микроконтроллер (МК) на отключение электродвигателя. Отключится реле *KV2* (в нормальном режиме работы оно включено) и своим контактом разорвет цепь электромагнитного пускателя *KM*. Электродвигатель отключится от сети.

В модуле *B* находятся дополнительно блок контроля напряжения и обратного чередования фаз (БКНиОЧФ) и блок контроля сопротивления изоляции обмотки (БКСИО). Они работают таким образом, что нельзя включить электродвигатель при отсутствии фазы в сети, при обратном чередовании фаз в сети и при сопротивлении изоляции обмотки менее 0,5 МОм. Алгоритм управления по этим параметрам обеспечивает микроконтроллер.

Структурная схема второго варианта перспективной температурной защиты изображена на рисунке 4.38. Устройство содержит два модуля. В модуле *A*, находящемся в коробке выводов электродвигателя или рядом с ней, контролируется температура обмотки по ЭДС трех термопар, заложенных в обмотки каждой фазы. Четвертая термопара контролирует температуру окружающей среды в модуле. Сигналы от всех термопар усиливаются в блоке температурной защиты (БТЗ) и подаются на аналоговые входы микроконтроллера *МК1*. С помощью задатчика температуры (ЗТ) устанавливается температура срабатывания защиты. При достижении термопарами температуры, на 10 °С ниже температуры срабатывания защиты, микроконтроллер *МК1* включает блок передатчика сигналов (БПеС) на передачу по проводникам силовой сети предупредительного сигнала. Этот сигнал улавливается блоком приемника сигналов (БПрС) в модуле *B*, находящемся в коробке электромагнитного пускателя. Блок приемника сигналов подает команду микроконтрол-

леру *МК2* на включение звуковой сигнализации. Если нагрузку на электродвигатель оператор не уменьшил, то через некоторое время температура обмотки достигнет температуры срабатывания защиты и блок передатчика сигналов пошлет сигнал отключения электродвигателя. Блок приемника сигналов уловит этот сигнал, микроконтроллер *МК2* отключит реле *KV*. Произойдет отключение электромагнитного пускателя *KM* и электродвигателя от сети.

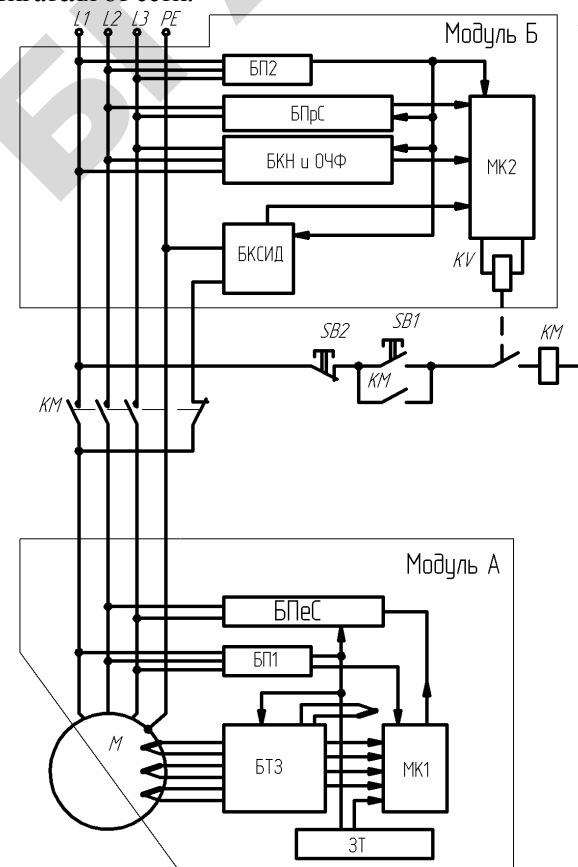


Рисунок 4.38 – Структурная схема перспективной температурной защиты с быстродействующими термодетекторами (термопарами):

БТЗ – блок температурной защиты; БП1, БП2 – блок питания; ЗТ – задатчик температуры; БПеС – блок передачи сигналов; БКСИД – блок контроля сопротивления изоляции двигателя; БПрС – блок приема сигналов; БКНиОЧФ – блок контроля напряжения и обратного чередования фаз; МК1, МК2 – микроконтроллер

В модуле *Б* находятся дополнительно блок контроля напряжения и обратного чередования фаз (БКНиОЧФ), а также блок контроля сопротивления изоляции обмотки (БКСИО). Они работают таким образом, что нельзя включить электродвигатель при отсутствии фазы в сети, при обратном чередовании фаз в сети и при сопротивлении изоляции обмотки менее 0,5 МОм. Алгоритм управления обеспечивает микроконтроллер МК2.

4.10. Монтаж термодетекторов температурных защит и проверка температурных защиты УВТЗ на работоспособность

Особенность монтажа температурной защиты на базе позисторов состоит в прокладке двух дополнительных проводов от коробки выводов электродвигателя к блоку температурной защиты, который устанавливается, как правило, в герметичных шкафах управления. Поскольку ток в цепи термодетекторов не превышает 20 мА, то сечение медных подводящих проводов определяется их механической прочностью и должно составлять не менее 0,5 мм². Проводники должны быть свиты в витую пару.

Термодетекторы могут устанавливаться в обмотку статора во время ее укладки в пазы или при капитальном ремонте его, а также в эксплуатационных условиях [62].

Термодетекторы устанавливают в середине вылета лобовой части обмотки так, чтобы проводники обмотки касались их со всех сторон. Затем накладывают бондаж на лобовые части обмотки, выводы обмотки и термодетекторов. Концы от термодетекторов протягивают через коробку выводов. Соединительные провода нельзя натягивать и изгибать вблизи изоляции термодетекторов. После установки позисторов измеряют омическое сопротивление их цепи, а также сопротивление изоляции относительно обмотки и корпуса. Категорически запрещается проверять целостность цепи термодетекторов мегомметром!

Установка термодетекторов в электродвигатели, находящихся в эксплуатации, осуществляется двумя способами: непосредственно в обмотку (если электродвигатель в эксплуатации не более двух лет); приклеиванием к наружной поверхности лобовых частей обмотки статора (например, клеем Радиал или БФ). Обмотку предварительно разогревают до 100–120 °С одним из доступных способов. С помощью пластмас-

сового клина раздвигают витки катушки и в образовавшуюся щель устанавливают термодетектор (рисунок 4.39). Места установки термодетекторов заливают соответствующим пропиточным лаком или эпоксидной смолой, или клеем Радиал.

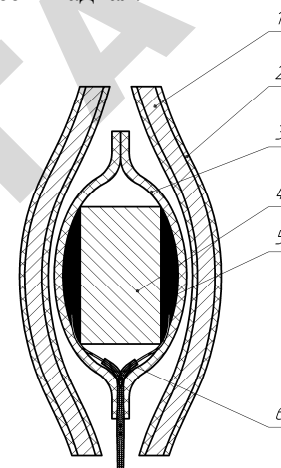


Рисунок 4.39 – Размещение позистора в обмотке электродвигателя:
1 – медный провод; 2 – эмалевая изоляция провода; 3 – защитная полиамидная пленка; 4 – позистор; 5 – место пайки выводов позистора; 6 – выводы позисторов

Термодетекторы встраивают в наиболее нагретую часть электродвигателя, в место с максимальной температурой. У асинхронного электродвигателя, имеющего степень защиты IP44, самой нагретой частью обмотки являются наиболее удаленная от магнитопровода лобовая часть со стороны, противоположной внешнему вентилятору, за коробкой выводов. Термодетекторы встраиваются в лобовую часть обмотки, подальше от магнитопровода.

У асинхронного электродвигателя со степенью защиты IP23 самой нагретой частью при медленном нагревании является обмотка в магнитопроводе, при быстром нагревании – лобовая часть обмотки. Поэтому термодетекторы встраиваются в лобовую часть обмотки, но вблизи магнитопровода.

При двухслойной обмотке целесообразно встраивать термодетекторы во внутренние слои, чтобы лучше учитывать влияние температуры ротора. Термодетекторы встраиваются по одному на фазу перед пропиткой обмотки, но после формовки лобовых частей.

Каждое устройство температурной защиты проверяют на работоспособность при номинальном (220 В), пониженном (175 В) и повышенном напряжениях (240 В) [61]. Для этого собирают схему, представленную на рисунке 4.40. Предположим, проверяется устройство защиты УВТЗ-1М. Сначала определяют значение сопротивления позисторов, при котором устройство защиты срабатывает. Для этого с помощью автотрансформатора устанавливают напряжение 220 В, а с помощью магазина сопротивлений набирают значение сопротивления 800 Ом. Включают тумблер *SA*. Реле устройства защиты УВТЗ-1М не срабатывает. Контрольная лампа *HL*, установленная вместо электромагнитного пускателя, загорается (реле имеет размыкающий контакт).

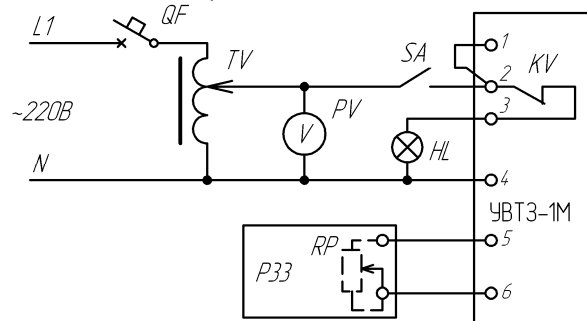


Рисунок 4.40 – Принципиальная электрическая схема проверки работоспособности устройств температурной защиты: TV – автотрансформатор ЛАТР-2; PV – вольтметр ЦЧ 202, 300 В; HL – контрольная лампа 100 Вт, 220 В; SA – тумблер Т3; RP – магазин сопротивлений P33

Если испытывать устройства защиты УВТЗ других марок, то контрольная лампа *HL* не загорается (их реле имеет замыкающий контакт). Увеличивают значение сопротивления, набранное на магазине сопротивлений, до величины $2,1 \pm 0,4$ кОм. Реле устройства защиты УВТЗ-1М должно сработать и лампа *HL* должна погаснуть. Теперь уменьшают значение сопротивления, набранное на магазине сопротивлений, до величины $0,9 \pm 0,05$ кОм. Лампа *HL* должна гореть. Размыкают цепь позисторов (клеммы 5 и 6). Устройство температурной защиты должно сработать. Замыкают накоротко цепь позисторов (клеммы 5 и 6). Устройство температурной защиты должно сработать. Аналогично проверяют работоспособность устройства защиты при напряжениях 175 В и 240 В.

Проверка работоспособности смонтированного устройства защиты УВТЗ, подключенного к электродвигателю, производится следующим образом. Включают электродвигатель в питающую сеть. Убеждаются в нормальной работе его на холостом ходу. Размыкают цепь термодетекторов, состоящую из позисторов. Срабатывание устройства и отключение двигателя от сети свидетельствует о нормальной работе встроенной температурной защиты. Замыкают цепь термодетекторов, состоящую из позисторов. Срабатывание устройства и отключение двигателя от сети свидетельствует о нормальной работе встроенной температурной защиты.

4.11. Области применения тепловых и температурных защит электродвигателей

Электротепловые токовые реле имеют большее распространение, чем температурные защиты, поскольку они просты в монтаже и недороги, ими комплектуются электромагнитные пускатели.

Однако характеристики тепловых токовых реле недостаточно стабильны во времени, их необходимо периодически подстраивать. Если этого не делать, то защитные свойства реле со временем ухудшаются. Электротепловые токовые реле не способны контролировать увеличение температуры обмотки из-за износа подшипников, из-за засорения корпуса электродвигателя, из-за увеличения температуры окружающей среды. Они обеспечивают обратозависимую защитную характеристику, что хорошо согласуется с защитной характеристикой электродвигателя только в продолжительном режиме работы S1.

При кратковременном режиме работы S2, при повторно-кратковременных режимах работы S3-S5 и перемежающихся режимах работы S6-S7 на валу электротепловое токовое реле работает неудовлетворительно. Это связано с тем, что постоянные времени нагрева электротеплового токового реле и защищаемого электродвигателя различны. В связи с этим электротепловое токовое реле и электродвигатель нагреваются с разной скоростью, и электротепловое реле не может моделировать нагрев электродвигателя. По этой причине электротепловые реле не рекомендуются использовать для защиты электродвигателей в кратковременных и повторно-кратковременных режимах работы (например, в подъемных установках), при резкопеременных нагрузках на валу электродвига-

телей, при регулировании частоты вращения электродвигателей. Для защиты электродвигателей в этих случаях необходимо использовать температурные защиты.

Достоинство *температурной защиты* состоит в том, что она реагирует почти на все аварийные состояния и режимы работы электродвигателя (таблица 4.7).

Таблица 4.7 – Результаты качественного анализа влияния аварийных состояний и режимов работы асинхронного электродвигателя на температуру обмотки

Номер п/п	Аварийное состояние и режим работы	Влияние на температуру обмотки		
		Нет влияния	Слабое	Сильное
1	Неполнофазное питание до включения электродвигателя в сеть			
	Неполнофазное питание при работе электродвигателя в холостую			
	Неполнофазное питание при работе электродвигателя под нагрузкой			
2	Перегрузка технологическая (моментом на валу электродвигателя)			
3	Стопорный режим (двухфазное или трехфазное питание)			
4	Отклонение напряжения выше нормы		*	*
5	Асимметрия напряжения выше нормы		**	**
6	Увлажнение обмотки			
7	Износ подшипников			
	Разрушение подшипников			
8	Вибрация электродвигателя выше нормы			
9	Нарушение охлаждения			
10	Частые пуски и реверсы			
11	Затяжные пуски			
12	Коммутационные перенапряжения			

* Влияние напряжения на температуру обмотки зависит от нагрузки электродвигателя: на холостом ходу и при малой нагрузке – слабое; при большой нагрузке – сильное.
 ** Влияние асимметрии напряжения на температуру обмотки статора зависит от нагрузки на валу электродвигателя: на холостом ходу и при малой нагрузке влияние слабое; при большой нагрузке – сильное.

Из таблицы 4.7 следует, что контролируя температуру можно определять все аварийные состояния и режимы электродвигателя, за исключением неполнофазного питания сети перед включением электродвигателя в сеть и увлажнения обмотки.

Температурные защиты не реагируют на вибрации и коммутационные перенапряжения.

Температурная защита является единственной защитой, реагирующей на загрязнение корпуса.

Температурные защиты дороже тепловых защит, они сложнее в монтаже (нужно тянуть дополнительные провода к термодетектору), ими не комплектуются электромагнитные пускатели. Однако температурная защита реагирует непосредственно на температуру статорных обмоток, а тепловая моделирует нагрев обмоток.

Температурные защиты одного типоразмера способны защитить все имеющиеся в хозяйстве электродвигатели, а электротепловых токовых реле требуется иметь несколько десятков типоразмеров.

Для качественной оценки тепловой и температурной защит приведем в таблице 4.8 данные о вероятности их срабатывания в основных аварийных состояниях.

Таблица 4.8 – Вероятность срабатывания устройств тепловой и температурной защит в основных аварийных состояниях электродвигателя

Тип защитного аппарата	Вероятность срабатывания при аварийных состояниях электродвигателя				
	Неполнофазный режим	Заклинивание	Технологическая перегрузка	Нарушение охлаждения	Увлажнение обмотки
Тепловые реле РТТ, РТЛ (неотрегулированные в лабораторных условиях)	0,6	0,45	0,75	0	0
Тепловые реле РТТ, РТЛ (отрегулированные в лабораторных условиях)	0,85	0,65	0,9	0	0
Температурная защита УВТЗ-1	0,76	0,67	0,91	0,91	0
Температурная защита УВТЗ-5 [86]	0,85	0,67	0,95	0,91	0

Из таблицы 4.8 следует, что температурные защиты УВТЗ имеют большую вероятность срабатывания в аварийных состояниях. Они защищают электродвигатель в четырех аварийных состояниях, а тепловое реле – в трех.

Сравнительные испытания тепловой и температурной защит производили различные авторы, например [88, 89].

Установлено, что тепловая защита при правильной ее настройке в большинстве аварийных ситуаций срабатывает и отключает электродвигатель. Однако она уступает температурной защите в режимах резко выраженной случайно-переменной нагрузки, а также при значительной (5 %) асимметрии питающего напряжения и при нарушении охлаждения электродвигателя.

Температурные защиты рекомендуется использовать для защиты следующих электродвигателей [61]:

1) работающих со случайной резко переменной нагрузкой, не имеющих автоматического регулирования подачи (измельчители кормов, дробилки, пневмотранспортеры и т. п.);

2) работающих при схеме соединения обмоток «в треугольник» (измельчители, дробилки, пневмотранспортеры и т. п.). Особенностью таких электродвигателей является то, что при обрыве линейного проводника значение токов в оставшихся линейных проводниках и фазах обмотки различное. При нагрузке на валу 65 % от номинальной мощности и обрыве одного линейного проводника значение тока в других линейных проводниках возрастает до 117 % от номинального значения, а в одной фазной обмотке – до 144 %. Эта фазная обмотка будет перегреваться;

3) при повышенной частоте случаев аварийных ситуаций (затормаживание ротора, технологических перегрузках), которые характерны для транспортеров по уборке навоза типа ТСН-2, ТСН-3 и т. п.;

4) агрегатов с напряженным сезонным характером работы (пневмотранспортеры сенажной массы, выгрузчики сенажа из башен, грануляторы травяной муки и других агрегатов приготовления травяной муки, брикетных прессов и др.). В этом случае внезапный выход из строя электродвигателя наносит повышенный технологический ущерб.

Кроме этого, температурная защита эффективна для защиты регулируемых электродвигателей, например, многоскоростных и регулируемых с помощью преобразователей частоты. Температурная

защита эффективна также при сильном загрязнении электродвигателей и при выходе из строя принудительного охлаждения.

Температурная защита наиболее полно соответствует задачам диагностирования остаточного ресурса обмоток электродвигателей [90].

Температурная защита, выполненная на базе микроэлектронных средств вычислительной техники, пригодна для защиты группы взаимосвязанных электродвигателей поточной линии или комплекса машин [91].

4.12. Температурные защиты, моделирующие нагрев электродвигателя

Изменение температуры перегрева обмоток электродвигателя с холостого состояния описывается уравнением вида:

$$\tau = \tau_{\text{уст}} \left(1 - e^{-\frac{t}{T_n}}\right), \quad (4.23)$$

где $\tau_{\text{уст}}$ – установившаяся температура, °С;

T_n – постоянная времени нагрева обмоток электродвигателя, с.

Напряжение заряда конденсатора описывается уравнением вида:

$$U = U_{\text{пит}} \left(1 - e^{-\frac{t}{T_3}}\right), \quad (4.24)$$

где $U_{\text{пит}}$ – напряжения питания, В;

T_3 – постоянная времени заряда конденсатора, с.

Уравнения (4.23) и (4.24) аналогичны по структуре. При $U_{\text{пит}} = \tau_{\text{уст}}$, а $T_3 = T_n$ контроль напряжения U на интегрирующем конденсаторе равносителен контролю температуры перегрева. Следовательно, моделируя нагрев электродвигателя электрической схемой, можно контролировать его температуру по напряжению на конденсаторе электрической схемы. Замечательным в этом принципе защиты является то, что не требуется устанавливать в обмотке датчиков температуры.

Простейший аналог одномассовой тепловой модели и электрической цепи можно получить, рассматривая электродвигатель как однородное тело (рисунок 4.41).

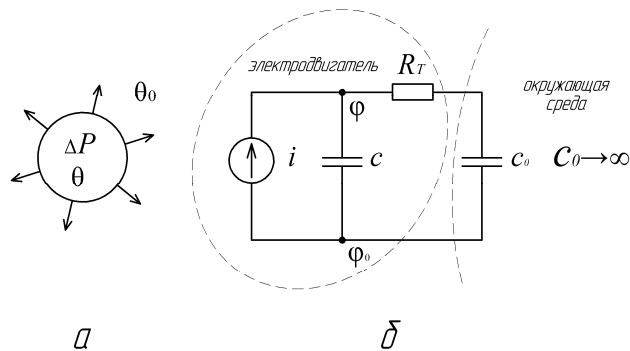


Рисунок 4.41 – Одномассовая тепловая модель электродвигателя (а) и электрическая схема тепловой одномассовой модели (б)

По закону сохранения энергии мощность ΔP , выделенная в электродвигателе, расходуется на нагрев тела ΔP_c и на отдачу в окружающую среду ΔP_a :

$$\Delta P = \Delta P_c + \Delta P_a, \quad (4.25)$$

Мощность ΔP_c теплового потока, идущего на нагрев тела, определяется выражением:

$$\Delta P_c = C \frac{d\tau}{dt}, \quad (4.26)$$

где C – теплоемкость тела, Дж/°С.

Мощность ΔP_a теплового потока, передаваемая в окружающую среду, равна:

$$\Delta P_a = A(\theta - \theta_0) = A\tau, \quad (4.27)$$

где A – теплоотдача в окружающую среду, Вт/°С;

θ – температура электродвигателя, °С;

θ_0 – температура окружающей среды, °С;

τ – температура перегрева, °С.

Величина, обратная теплоотдаче, называется тепловым сопротивлением:

$$R_\tau = \frac{1}{A} \quad (4.28)$$

Тогда можно записать:

$$\Delta P_a = \frac{\tau}{R_\tau}. \quad (4.29)$$

Окончательно получим, подставляя (4.26) и (4.29) в (4.25):

$$\Delta P = C \frac{d\tau}{dt} + \frac{\tau}{R_\tau}, \quad (4.30)$$

или

$$CR_\tau \frac{d\tau}{dt} + \tau = \Delta P R_\tau. \quad (4.31)$$

Дифференциальное уравнение (4.31) теплового баланса электродвигателя аналогично уравнению (4.32) электрической цепи, показанной на рисунке 4.39, б:

$$CR \frac{du}{dt} + u = U_y. \quad (4.32)$$

Установившееся значение напряжения:

$$U_y = iR. \quad (4.33)$$

Тогда дифференциальное уравнение (4.32) будет иметь вид:

$$CR \frac{du}{dt} + u = iR. \quad (4.34)$$

Уравнение (4.34) электрической цепи есть аналог (модель) уравнения (4.31) теплового баланса электродвигателя.

В этой модели току i эквивалентен тепловой поток ΔP , электрическому сопротивлению R эквивалентно тепловое сопротивление R_τ , электрической емкости C эквивалентна теплоемкость C , напряжению u – температура перегрева обмотки τ . Кроме этого, следует учитывать, что температура перегрева обмотки $\tau = \theta - \theta_0$,

где θ – температура обмотки, °C; θ_0 – температура окружающей среды, °C. С другой стороны, напряжение есть разность потенциалов $u = \varphi - \varphi_0$, где φ , φ_0 – потенциал обкладки конденсатора C , В.

Постоянная времени нагрева электрической цепи:

$$T = CR. \quad (4.35)$$

Постоянная времени нагрева тепловой модели:

$$T_T = CR_T. \quad (4.36)$$

Двухмассовую модель (рисунок 4.42) применяют для повышения точности расчетов.

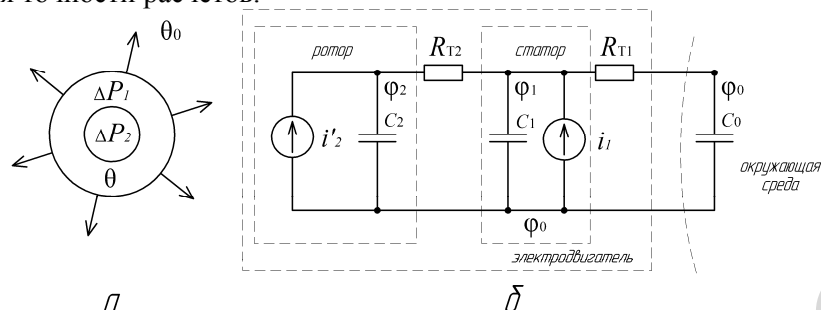


Рисунок 4.42 – Двухмассовая тепловая модель электродвигателя (а) и электрическая схема тепловой двухмассовой модели (б)

В ней разделяют потери в статоре ΔP_1 и в роторе электродвигателя ΔP_2 , причем потери в роторе ΔP_2 передаются к статору через тепловое сопротивление R_{r2} . В результате составляется эквивалентная схема, показанная на рисунке 4.42, б. В ней различают теплоемкость ротора C_2 и теплоемкость статора C_1 , два тепловых сопротивления R_{r1} и R_{r2} , постоянные нагревания статора $T_{n1} = C_1 R_{r1}$ и ротора $T_{n2} = C_2 R_{r2}$.

Известны тепловые модели, составленные из четырех тел: обмотки статора; пакета стали; ротора; корпуса электродвигателя [92].

При построении защит от перегрузки принимают тепловые схемы, учитывающие как нагрев обмотки (теплоемкость моделируется конденсатором $C1$), так и нагрев стали (теплоемкость моделируется конденсатором $C2$), рисунок 4.43.

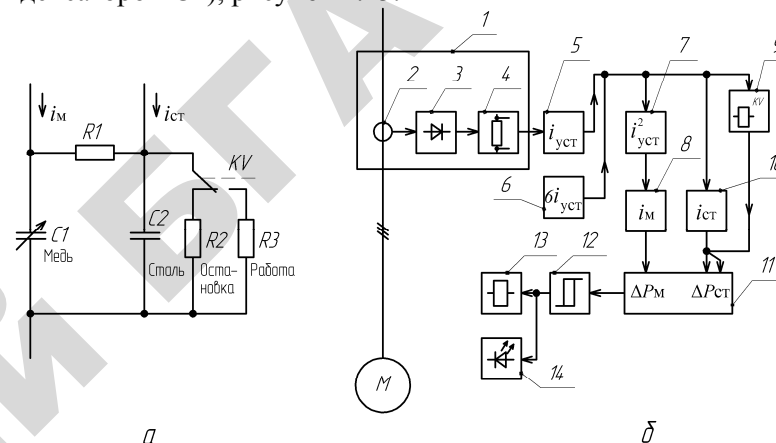


Рисунок 4.43 – Двухконтурная модель, позволяющая воспроизвести нагрев обмотки электродвигателя в режимах работы и остановки (а), и структурная схема ее реализации (б):
 1 – преобразователь тока; 2 – трансформаторы тока; 3 – выпрямитель; 4 – калибровочный шунт; 5 – регулятор уставки номинального тока;
 6 – функциональный проверочный блок с источником сигнала $6i_{уст}$; 7 – блок возведения в квадрат сигнала, пропорционального току электродвигателя;
 8 – преобразователь напряжение-ток (накопление потерь в меди); 9 – датчик тока для переключения «работа – остановка»; 10 – преобразователь напряжение-ток (накопление потерь в стали); 11 – электрическая аналогия тепловой модели электродвигателя с устанавливаемой инерционностью (временем отключения при токе $6i_{уст}$); 12 – компаратор (датчик пороговой величины допустимого нагрева); 13 – выходное реле; 14 – индикатор термической перегрузки

Такое решение применяется в известных зарубежных электронных реле защиты СЕТ1 и СЕТ3 электродвигателей. Главным источником тепла являются потери в меди (ΔP_m заменяется током i_m) и потери в стали ($\Delta P_{ст}$ заменяется током $i_{ст}$). Термической связи между обмоткой и сталью соответствует сопротивление $R1$, а сопротивления $R2$ и $R3$ отображают отдачу тепла в окружающую среду, причем низкоомное сопротивление $R3$ соответствует случаю

вращающегося ротора, а более высокоомное сопротивление $R2$ соответствует случаю заторможенного ротора. Переключение сопротивлений $R3$ и $R2$ проводится узлом, контролирующим ток электродвигателя. Благодаря учету изменяющегося теплового сопротивления удастся достаточно точно моделировать тепловые процессы при периодической работе и после коротких перерывов в работе электродвигателя.

Структурная схема аналоговой защиты, построенной по двухконтурной модели, приведена на рисунке 4.43, б.

Защита электродвигателей с использованием тепловой модели может реализоваться в цифровой форме с применением микроконтроллеров. Например, в [93] описано цифровое устройство защиты для группы электродвигателей, которое использует принцип моделирования тепловых процессов. Цифровая система моделирования обеспечивает более эффективную защиту, чем аналоговая.

4.13. Контрольные вопросы

1. По какому закону изменяется температура электродвигателя после его включения?
2. По какому закону изменяется температура электродвигателя в стопорном режиме?
3. Как определяется постоянная времени нагрева электродвигателя?
4. Как определяется коэффициент ухудшения теплоотдачи?
5. Какую величину имеет постоянная времени нагрева электродвигателя?
6. Какие классы нагревостойкости и допустимые температуры имеет изоляция современных электродвигателей?
7. Назовите 10 причин нагрева электродвигателя выше допустимой температуры.
8. В чем состоит косвенный метод определения температуры обмотки?
9. Объясните устройство и принцип действия дилотометрических датчиков-реле температуры.
10. Объясните устройство и принцип действия биметаллических датчиков-реле температуры.
11. Объясните устройство и принцип действия моторпротекторов.

12. Объясните работу схемы УВТЗ-1 (по рисунку 4.21).
13. Объясните работу схемы УВТЗ-1М (по рисунку 4.23).
14. Объясните работу схемы УВТЗ-5 (по рисунку 4.24).
15. Какие требования предъявляются к термодетекторам температурных защит?
16. Нарисуйте зависимость сопротивления от температуры для позисторов, термисторов и термометров сопротивления.
17. Какие термодетекторы могут использоваться в быстродействующих температурных защитах?
18. Как маркируются позисторы?
19. Сколько позисторов устанавливаются в обмотках двигателя и как они соединяются между собой?
20. Как обозначается электродвигатель, имеющий в обмотках позисторы?
21. Что означает запись СТ14-2-130?
22. Назовите 3 основных недостатка температурных защит?
23. Как осуществляется самоконтроль температурных защит УВТЗ?
24. Объясните работу схемы рисунка 4.32.
25. Объясните работу схемы рисунка 4.33.
26. Где рекомендуется устанавливать термодетекторы в электродвигателе?
27. Нарисуйте схему одномассовой тепловой модели электродвигателя.
28. Как влияют аварийные состояния или режимы работы на температуру обмотки?
29. Укажите область применения температурных защит.

Глава 5. ЗАЩИТА АСИНХРОННЫХ ТРЕХФАЗНЫХ ЭЛЕКТРОДВИГАТЕЛЕЙ ОТ УВЛАЖНЕНИЯ ИЗОЛЯЦИИ ОБМОТОК И ИМПУЛЬСНЫХ ПЕРЕНАПРЯЖЕНИЙ

5.1. Увлажнение изоляции обмоток асинхронных трехфазных электродвигателей в условиях эксплуатации

Изоляция обмоток асинхронных электродвигателей должна иметь высокую влагостойкость. Это требование особенно важно для асинхронных электродвигателей, работающих во влажной среде сельскохозяйственных помещений. Условия эксплуатации и режимы работы электродвигателей влияют на состояние их изоляции. Между изоляцией обмоток электродвигателя и окружающей средой практически постоянно происходит влагообмен.

Влага, находящаяся в изоляции, делится условно на два вида: свободную и связанную. В изоляции обмоток электродвигателей закрытого типа свободная влага отсутствует. Связанная влага (влага в капиллярах, в крупных порах и пустотах, влага смачивания) есть в гигроскопичных изоляционных материалах.

Испарение влаги из материала обуславливается диффузией пара с поверхности материала в окружающую среду (*внешняя диффузия*). Чем больше разность между парциальным давлением пара у поверхности материала и давлением в окружающей среде, тем интенсивнее внешняя диффузия.

Внутренняя диффузия проявляется в виде движения влаги (в жидком или газообразном состояниях) от внутренних увлажненных слоев изоляции к внешним слоям, с подсушенной поверхностью. Влага всегда перемещается от мест с большей влажностью к местам с меньшей влажностью. Под действием градиента температуры влага перемещается также от слоев изоляции более нагретых к слоям изоляции менее нагретым. Это явление называется *термодиффузией*.

Таким образом, влагообмен в изоляции обмоток определяется малярным переносом пара (внешняя диффузия), влагопроводимостью (внутренняя диффузия) и термовлагообменом (термодиффузией).

В сельскохозяйственном производстве применяются повсеместно электродвигатели закрытого обдуваемого исполнения. Эти электродвигатели считаются достаточно герметичными и защищенными от

непосредственного попадания воды и дезинфицирующих растворов. Однако практика показывает, что полной герметичности у них не достигается, так как электродвигатель в процессе нагрева и охлаждения дышит. Воздух окружающей среды через сальниковые уплотнения и отверстия для проводов вводной коробки проникает внутрь электродвигателя. В нем может увлажняться изоляция обмотки и накапливаться конденсат внутри корпуса. Происходит это следующим образом (по исследованиям Л. Г. Прищепа и Ф. Бультье).

При включении электродвигателя температура обмотки и внутреннего воздуха повышается, следовательно, повышается давление воздуха внутри электродвигателя согласно закону термодинамики:

$$PV = mR\theta, \quad (5.1)$$

где P – давление газа внутри полости электродвигателя;
 V – объем газа внутри полости электродвигателя;
 m – масса газа внутри полости электродвигателя;
 R – газовая постоянная;
 θ – температура газа внутри полости электродвигателя.

Повышение давления воздуха вызывает вытеснение его в окружающую среду. По мере выхода воздуха давление внутри электродвигателя снижается.

При отключении электродвигателя и постепенном его охлаждении влажный воздух окружающей среды внутрь электродвигателя не поступает. Это объясняется тем, что градиент температуры от электродвигателя (горячий электродвигатель) оказывается больше, чем градиент давления окружающей среды к внутренней области электродвигателя.

Когда температура обмоток станет ниже температуры равновесия, во внутреннюю полость электродвигателя начинает проникать влажный воздух окружающей среды, пока система не достигнет состояния термодинамического равновесия.

При дальнейшем снижении температуры окружающей среды в полости электродвигателя начинает накапливаться влага. Процесс накопления ее можно показать, пользуясь $I-d$ диаграммой влажного воздуха (рисунок 5.1).

Предположим, что параметры воздуха внутри электродвигателя и окружающей среды одинаковые (точка 1 ($\theta_1 = 28^\circ\text{C}$; $\phi_{в1} = 80\%$) на диа-

грамме рисунка 5.1). При понижении наружной температуры до значения 23 °С (точка 2 на рисунке 5.1) происходит насыщение воздуха водяными парами как в окружающей среде, так и в полости электродвигателя. Начинается процесс конденсации, т. е. выпадения влаги (на $I-d$ диаграмме – точка 2). При последующем понижении окружающей температуры до значения $\theta_3 = 14$ °С относительная влажность воздуха остается неизменной (точка 3). В результате этого процесса влагосодержание внутреннего воздуха изменится с 17 до 10 г/кг сухого воздуха. Следовательно, на каждый килограмм сухого воздуха выпадает 7 г влаги.

При повышении температуры наружного воздуха (после ночи) выпадение влаги в окружающей среде прекращается. Из внутренней полости электродвигателя влага перейти в окружающую среду не может, так как для этого требуются затраты энергии извне, равные теплоте ее испарения.

При испарении влаги в окружающей среде увеличивается абсолютная влажность и, соответственно, возрастает парциальное давление газов и паров. Это вызывает новый приток воздуха в полость электродвигателя и повышение влагосодержания внутри его. В последующем этот процесс циклически повторяется.

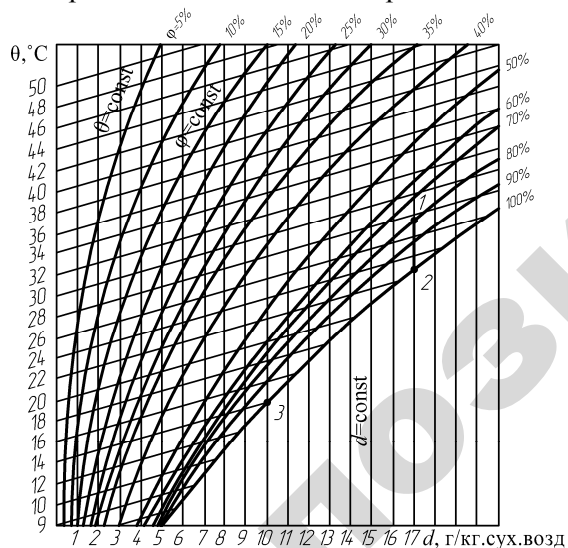


Рисунок 5.1 – Фрагмент $I-d$ диаграммы влажного воздуха, поясняющий конденсацию влаги в закрытом обдуваемом электродвигателе при высокой влажности окружающего воздуха

Количество влаги, накопленное в полости электродвигателя, прямо пропорционально зависит от объема полостей электродвигателя, начального и конечного влагосодержания воздуха и обратно пропорционально конечной температуре воздуха. Чем больше колебания наружного воздуха и ниже конечная температура, тем больше конденсата образуется в электродвигателе.

В электродвигателях защищенного исполнения (IP23) конденсация влаги не происходит, потому что наружный воздух имеет свободный доступ к внутренним полостям электродвигателя и происходит замкнутый термодинамический цикл.

Таким образом, электродвигатели закрытого обдуваемого исполнения (IP44 и IP54), находящиеся во влажной среде, во время технологических пауз работают как термодинамические системы с незамкнутым циклом. Это обуславливает накопление влаги во внутренней полости электродвигателя и нахождение статорных обмоток в среде с повышенным абсолютным влагосодержанием.

Рассмотрим процессы влагообмена в изоляции электродвигателя при пуске и в кратковременном режиме работы.

В начальный период после включения электродвигателя в сеть более нагретой оказывается витковая изоляция обмотки. Поток теплоты направлен от центра обмотки к периферии. В таком же направлении начинает перемещаться влага из пор изоляции, как описано выше. С ростом температуры обмотки влага начинает испаряться не только с пор изоляции, но и из поверхности обмотки в окружающую среду. Происходит процесс сушки. Сопротивление изоляции начинает возрастать и через некоторое время достигает установившегося значения (рисунок 5.2) [2].

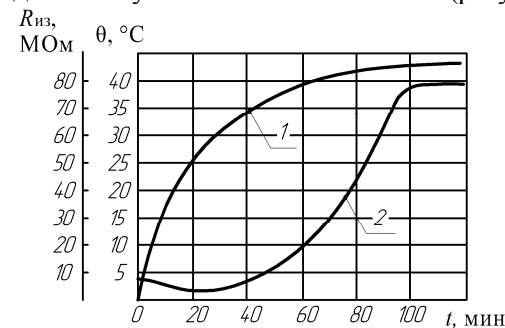


Рисунок 5.2 – Изменение сопротивления изоляции увлажненной обмотки и ее температуры нагруженного электродвигателя: 1 – температура обмотки; 2 – сопротивление изоляции

При загрузке электродвигателя до номинального тока изменение температуры обмотки происходит по экспоненте (кривая 1 на рисунке 5.2), а изменение сопротивления изоляции происходит медленно (кривая 2 на рисунке 5.2). Через 20 минут после включения сопротивление изоляции уменьшилось с 6 до 4 МОм, а после 100 минут работы электродвигателя возросло до 78 МОм [2].

Более интенсивно процессы нагрева и изменения сопротивления изоляции происходят при перегрузке электродвигателя. На рисунке 5.3 показано изменение этих величин при трехкратной перегрузке по току, т. е. при $3I_{ном}$. В этом случае температура обмотки возрастает по линейной зависимости, достигая максимального значения $180\text{ }^{\circ}\text{C}$ через 110 с после начала опыта. За это время сопротивление изоляции обмотки снизилось с 45 до 1 МОм [89]. Начальная влажность воздуха в этом опыте составляла 50 %.

При большей влажности окружающего обмотку воздуха $\varphi_{в} = 65\text{--}75\%$ сопротивление изоляции уменьшается еще в большей степени (более чем в 100 раз, до значения 0,3–0,4 МОм при начальном сопротивлении изоляции 40 МОм).

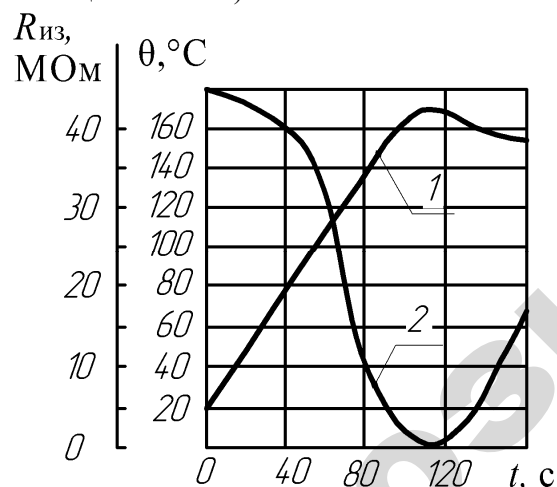


Рисунок 5.3 – Изменение сопротивления изоляции обмотки и ее температуры при трехкратной перегрузке по току электродвигателя:
1 — температура обмотки; 2 — сопротивление изоляции

В нормальных условиях нагрева происходит медленное изменение линейных размеров проводников обмотки. Лаковая пленка вна-

чале эксплуатации эластична и легко меняет свой размер в соответствии с изменением размера проводников. Однако через некоторое время происходит *диструкция пленки*. Она теряет эластичность и становится хрупкой. После таких изменений пленка не расширяется с увеличением размеров проводников при нагревании, а разрывается. При охлаждении проводников обмотки лаковая пленка не возвращается в исходное состояние. Образуются в изоляции *микротрещины*, в которые проникает влага и агрессивные компоненты, содержащиеся в окружающей среде.

Увеличивается влагосодержание изоляции, образуются между отдельными проводниками электропроводящие мостики. Это приводит к электрическому пробое между проводниками. Обычно пробой наступает через несколько минут после включения электродвигателя в сеть. Усугубляет образование микротрещин вибрация проводников и обмотки в целом.

При действии пусковых токов описанные выше явления многократно усиливаются. Количество выделяемого тепла увеличивается в 20–40 раз. Изоляция испытывает *тепловой удар*. Возрастают динамические усилия между отдельными витками обмотки, что приводит к увеличению вибрации витков обмотки. Тепловой удар приводит к резкому увеличению температуры обмотки и увеличению размеров ее проводников. Влага, находящаяся в порах изоляции, начинает переходить в парообразное состояние. Изоляция *«распаривается»*, пары влаги проникают в мельчайшие поры изоляции, ее сопротивление снижается. Степень снижения сопротивления изоляции при пуске зависит от ее начального увлажнения перед включением электродвигателя. При сильно увлажненной изоляции снижается ее сопротивление до опасного уровня и возможен пробой изоляции между витками при пуске электродвигателя.

Электродвигатели, работающие в продолжительном режиме, обеспечивают самоподсушивание изоляции обмоток. Влага из окружающей среды не может проникнуть внутрь нагретого электродвигателя.

Другое состояние возникает в электродвигателях, работающих в кратковременном режиме. За короткое время работы электродвигателя изоляция обмотки не успевает самоподсушиваться, а за продолжительный период простая изоляция увлажняется. На рисунке 5.4 приведены данные об изменении влажности и температуры воздуха внутри

электродвигателя навозоуборочного транспортера ТСН-3Б [89]. Температурно-влажностный цикл этого электродвигателя состоит из ветвей нагрева 1–2 при первом включении и ветви 2–3 при отключении (остывании обмотки), ветви нагрева 3–4 при втором включении и ветви 4–5 при отключении и охлаждении воздуха до начального значения температуры. За два включения влажность воздуха внутри электродвигателя повысилась с 53,5 до 60 %.

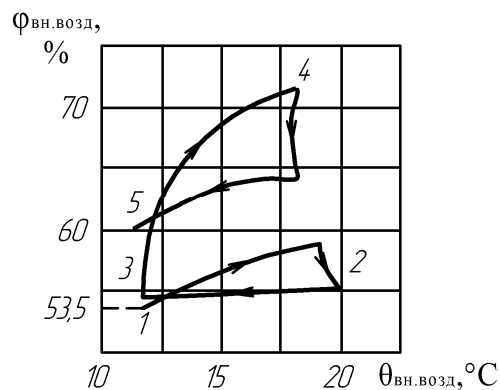


Рисунок 5.4 – Температурно-влажностные циклы состояния внутреннего воздуха электродвигателя транспортера ТСН-3Б: 1–2, 3–5 – нагрев; 2–3, 4–5 – охлаждение внутреннего воздуха

Если и дальше проследить за влажностью воздуха внутри электродвигателя, то можно установить, что процесс повышения влажности воздуха внутри электродвигателя подчиняется экспоненциальному закону. Для электродвигателя навозоуборочного транспортера ТСН-3Б постоянная времени накопления влажности внутреннего воздуха составляет $T_n = 7,28$ суток. Через время $4T_n$ следует ожидать установления внутри объема электродвигателя влажности воздуха 98 %.

Следовательно, несмотря на закрытое исполнение электродвигателя, в нем создаются условия увлажнения обмотки. Постепенно в электродвигателе начинает накапливаться влага в жидкой фазе, обусловленная переходом температуры насыщенного пара через точку росы. Одновременно с увлажнением обмотки уменьшается сопротивление изоляции. На рисунке 5.5 показано изменение со-

противления изоляции электродвигателя транспортера ТСН-3Б в течение трех суток [2].

R , МОм

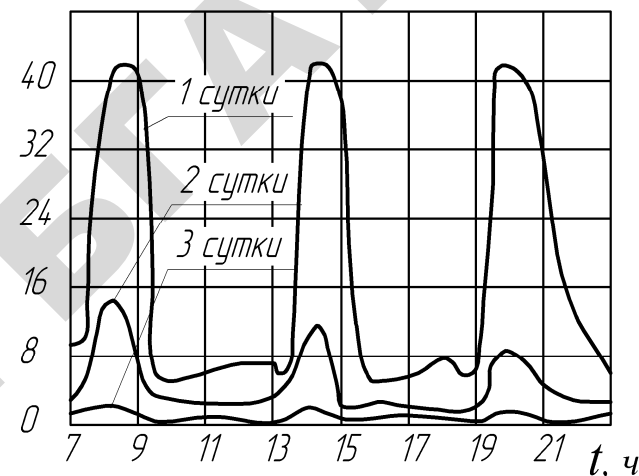


Рисунок 5.5 – Изменение сопротивления изоляции обмоток электродвигателя транспортера ТСН-3Б в течение трех суток

Из рисунка 5.5 следует, что в течение суток электродвигатель включается три раза и каждый раз при включении изоляция подсушивалась не до установившихся значений. На третьи сутки включение электродвигателя не приводило к заметному увеличению сопротивления изоляции, а наоборот, сопротивление изоляции во время пауз снизилось до опасного значения [2].

Состояние равновесного увлажнения материала изоляции обмоток зависит от относительной влажности воздуха и температуры окружающей среды. В условиях постоянной абсолютной влажности воздуха отдача влаги в окружающую среду (сушка изоляции) возникает при повышении температуры окружающей среды, а дальнейшее увлажнение – при понижении температуры. Поскольку максимальная влагоемкость изоляционных материалов соответствует температуре около 0 °C, а увлажнение наступает при понижении температуры, то можно ожидать, что наибольшая аварийность электродвигателей наступает в зимне-весенний период. Этот вывод подтверждает рисунок 5.6.

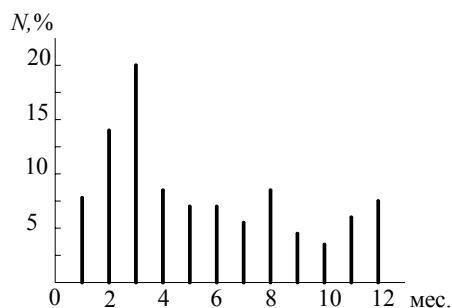


Рисунок 5.6 – Выход из строя асинхронных электродвигателей по месяцам года

На март приходится пятая часть годового количества отказов. Некоторое увеличение количества отказов в августе объясняется отбраковкой электродвигателей при проведении профилактических мероприятий. Меньше всего отказов происходит в октябре, сразу после профилактических мероприятий, и в связи с усилением изоляции в летние месяцы [10].

В обмотке статора асинхронного электродвигателя можно выделить следующие виды изоляции: между витками обмотки; между обмоткой и сталью в пазах; между проводами и корпусом в коробке выводов. В наиболее тяжелых условиях находится изоляция в местах выхода обмотки из пазов. Здесь она подвержена действию электрических и механических нагрузок.

Электрическая изоляция характеризуется, в основном, сопротивлением и максимальным напряжением, которое она может выдержать без повреждения (пробоя). К числу основных параметров относится также коэффициент абсорбции.

Слои изоляции, находящейся под напряжением, имеют определенное сопротивление и емкость, что обуславливает наличие тока утечки и емкостного (зарядного тока).

Ток утечки может проходить как через толщину изоляции (сквозной ток), так и по поверхности изоляции.

С ростом температуры и степени увлажнения изоляции ее сопротивление падает, а ток утечки растет. Ориентировочно можно считать, что увеличение температуры изоляции на $15\text{ }^{\circ}\text{C}$ (в пределах температур $20\text{--}100\text{ }^{\circ}\text{C}$) уменьшает сопротивление изоляции в 2 раза.

В процессе работы под влиянием нагрева, механических (вибрация) и химических воздействий (окисление) изоляция подвергается старению и становится хрупкой, появляются трещины. Эти особенности не обнаруживаются при изменении сопротивления изоляции, оно может даже повышаться, хотя пробивное напряжение снижается.

5.2. Контроль сопротивления изоляции обмоток асинхронных электродвигателей

Контроль сопротивления изоляции обмоток электродвигателей может осуществляться в двух случаях:

- 1) во время работы электродвигателя;
- 2) во время технологической паузы, при отключенном электродвигателе.

Контроль сопротивления изоляции во время работы электродвигателя может осуществляться только косвенным путем, через контроль тока утечки от приложенного к обмотке напряжения переменного тока. В этом случае используется, по сути, встроенное в аппарат защиты электродвигателя устройство защитного отключения (УЗО). В качестве чувствительного элемента УЗО используется дифференциальный трансформатор тока, охватывающий проводники, по которым питается ток электродвигатель. Такое встроенное УЗО должно иметь большую чувствительность, чем УЗО, обеспечивающее электробезопасность, потому что измеряемый ток утечки при сопротивлении изоляции 500 кОм составляет $0,44\text{ мА}$. Устройство защитного отключения, обеспечивающее электробезопасность, реагирует на ток $5\text{--}10\text{ мА}$.

Во время работы электродвигателя изоляция подсушивается, ее сопротивление возрастает. Вероятность пробоя изоляции из-за увлажнения уменьшается. Однако вероятность пробоя изоляции на корпус остается высокой из-за действия импульсных перенапряжений. По этой причине контроль сопротивления изоляции во время

работы электродвигателя сводится к контролю пробоя изоляции на корпус. Своевременный контроль и быстрое отключение электродвигателя уменьшают последствия пробоя изоляции на корпус и повышают электробезопасность установки. Комплексные аппараты защиты электродвигателей должны иметь встроенные УЗО.

Контроль сопротивления изоляции обмоток электродвигателей во время технологических пауз производится для того, чтобы не допустить включения электродвигателя в сеть, если сопротивление изоляции его обмотки менее 0,5 МОм. Можно выделить две группы устройств контроля сопротивления изоляции во время технологических пауз:

1) устройства, которыми пользуются эксплуатационные службы для периодической проверки сопротивления изоляции обмоток электрических двигателей, находящихся в эксплуатации;

2) устройства, автоматически измеряющие сопротивление изоляции во время технологических пауз.

К первой группе относятся всевозможные переносные приборы, имеющие в своем составе функцию высоковольтного мегомметра. Например, мегомметр М127 с питанием от сети переменного тока, мегомметр М4100 с ручным приводом, многофункциональный мегомметр Е6-24. Последним можно измерять напряжение, сопротивление изоляции. Прибор Е6-24 позволяет программировать время измерений от 1 до 10 минут, рассчитывает коэффициент абсорбции. Функции этого прибора отлично подходят для автоматического контроля сопротивления изоляции. Однако эти приборы сложные и рассчитаны для ручного использования.

Ко второй группе относятся стационарные устройства, контролирующие сопротивление изоляции автоматически, без участия обслуживающего персонала. Выпускаются, например, приборы Ф4106, М1503, М1603, МКН380М, Ф419 или реле искробезопасного контроля сопротивлений типа ИКС-3Н для непрерывного контроля сопротивления изоляции в сетях с изолированной нейтралью. Их можно приспособить для использования в сетях с заземленной нейтралью. Например, в [94] описано использование прибора Ф419 для контроля сопротивления изоляции обмоток электродвигателя в птичнике. Недостатки использования прибора Ф419 следующие:

1) продолжительность работы прибора не должна превышать 8 часов в сутки [94];

2) для его использования требуется реле времени, промежуточное реле и элементы сигнализации.

На рисунке 5.7 показана простейшая схема визуального контроля сопротивления изоляции, используемая для контроля изоляции погружного электродвигателя и описанная в [1].

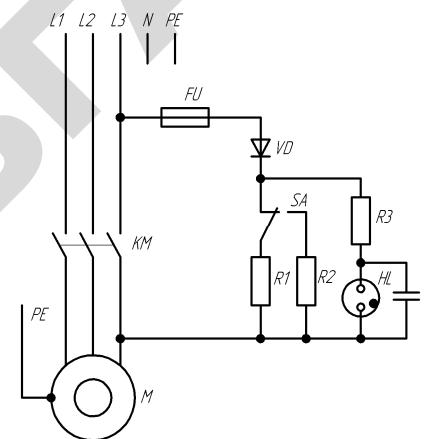


Рисунок 5.7 – Принципиальная электрическая схема простейшего устройства для визуального контроля сопротивления изоляции электродвигателя

Диод VD необходим для выпрямления тока. Резистор $R3$ (100 кОм) служит для ограничения тока через неоновую лампу. Резистор $R1$ (560 кОм) и $R2$ (91 кОм) вместе с переключателем SA задают пределы контролируемых сопротивлений 400 кОм и 40 кОм. Конденсатор $C1$ (МБМ-0,5, 160 В) обеспечивает яркое свечение индикатора HL (неоновой лампы ТН-02).

Схема включается в работу, когда электродвигатель отключается от сети. Если сопротивление изоляции статорной обмотки электродвигателя ниже заданной нормы (400 кОм), начинает вспыхивать лампа HL . Чем ярче вспыхивает лампа HL , тем меньше сопротивление изоляции. Если переключателем SA включают резистор $R2$, то тем самым уменьшают предел сопротивления контролируемой изоляции до 40 кОм. Если в этом положении загорится лампа HL , то это означает, что электродвигатель надо срочно отключить и ремонтировать. Такая простая диагностика износа погружных электродвигателей позволяет предупредить их внезапные отказы.

На рисунке 5.8 показана простая схема контроля сопротивления изоляции с релейным выходом.

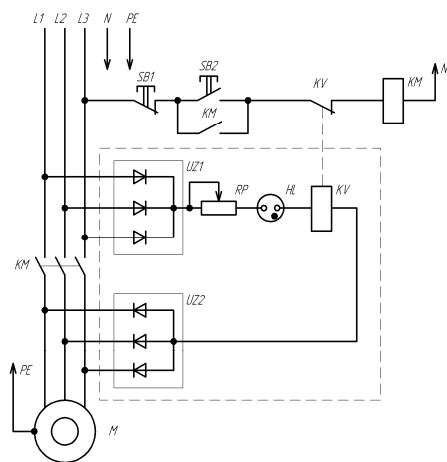


Рисунок 5.8 – Принципиальная электрическая схема устройства контроля изоляции электродвигателя с релейным выходом

При нормальном сопротивлении изоляции обмоток электродвигателя (более 500 кОм) ток через обмотку реле *KV* недостаточен для его включения. Лампа *HL* не светится и реле *KV* отключено. При снижении сопротивления изоляции начинает светиться лампа *HL*, а потом срабатывает реле *KV* (при токе утечки 1,5 мА, что соответствует сопротивлению изоляции около 140 кОм). Контакт *KV* разорвет цепь катушки электромагнитного пускателя *KM* и не позволит включить электродвигатель с отсыревшей изоляцией. Неоновая лампа одновременно сигнализирует об отключении электродвигателя. Чувствительность защиты регулируется резистором *RP*. В устройстве применены диоды КД105Б, резистор *RP* типа СПО-100 кОм, неоновая лампа 1-К5090Е, реле *KV* – типа РКН с сопротивлением обмотки 18 кОм. При использовании более чувствительного реле с током срабатывания 0,4 мА можно повысить уровень контролируемого сопротивления изоляции до 500 кОм.

В лаборатории автоматической защиты электрооборудования в БГАТУ разработано устройство контроля сопротивления изоляции, принципиальная электрическая схема которого изображена на рисунке 5.9. В этой схеме резистор *R3* совместно с сопротивлением изоляции образует делитель напряжения. Чем меньше сопротивление изоляции,

тем больший ток протекает через резистор *R3* и больше падение напряжения на резисторе *R3*. Напряжение на резисторе *R3* контролируется релаксационным генератором, собранном на элементах *R4*, *R5*, неоновой лампе *HL*, конденсаторе *C2*, светодиоде оптопары *U*.

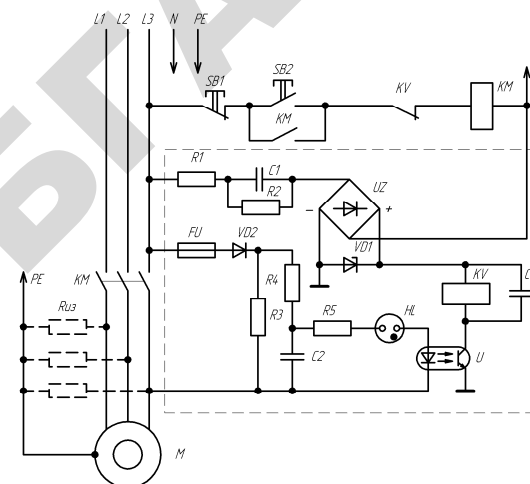


Рисунок 5.9 – Принципиальная электрическая схема устройства контроля изоляции электродвигателя со световой индикацией и релейным выходом

В каждый положительный полупериод сетевого напряжения конденсатор *C2* заряжается током, протекающим через диод *VD2* и резистор *R4*. Как только напряжение на конденсаторе *C2* достигнет напряжения зажигания неоновой лампы *HL* (у ИНС-1 оно не более 90 В), в ней вспыхивает газовый разряд. Протекающий во время вспышки через лампу ток вызывает свечение диода оптопары *U* и одновременно разряжает конденсатор *C2* до напряжения гашения лампы *HL* (приблизительно 60 В). После окончания вспышки происходит снова заряд конденсатора *C2* и его разряд через неоновую лампу *HL*, резистор *R5* и светодиод оптопары *U*. Так продолжается в том случае, если напряжение на резисторе *R3* вызывает заряд конденсатора *C2* до напряжения 90 В. В этот период транзистор оптопары *U* открывается, в течение каждой вспышки неоновой лампы происходит заряд конденсатора *C3*. Как только напряжение на конденсаторе *C3* достигнет напряжения втягивания реле *KV*, оно включится и разорвет цепь электромагнитного пускателя *KM*. Электродвигатель нельзя включить в сеть.

Кроме функции контроля изоляции электродвигателя, эта схема обеспечивает подсушку изоляции во время технологических пауз за счет джоулевых и диэлектрических потерь (смотрите следующий параграф).

Для оценки степени увлажнения изоляции широкое распространение получил метод контроля абсорбции. Он основан на определении зависимости тока утечки от времени приложения постоянно напряжения. Объясняется это следующим образом.

Электроды (проводники), разделенные изоляцией, представляют собой определенную электрическую емкость, способную накапливать заряд. Структура изоляции может рассматриваться как состоящая из большого числа элементарных RC-цепей, включенных последовательно и параллельно. Как известно, скорость заряда конденсаторов RC-цепи определяется постоянной времени $T = R \cdot C$. Чем больше T , тем медленнее происходит процесс заряда. Наряду с цепями, в которых преобладает емкость, изоляция включает в себя цепи, в которых преобладают сопротивления больших значений.

При подаче постоянного напряжения через изоляцию начинает протекать активная составляющая тока утечки i_y . Вторая составляющая этого тока вызвана емкостью цепей. Этот ток утечки быстро снижается до нуля и его можно не учитывать. Третья составляющая тока утечки вызвана током заряда элементарных RC-цепей. Это ток абсорбции i_a . Он медленно затухает. Значение этого тока связано не только с большими постоянными времени RC-цепей, но и с временем перетекания-выравнивания этих зарядов через параллельные связи цепей, так называемым временем релаксации, измеряемым десятками секунд. Чем больше увлажнение изоляции, тем больше ток утечки и меньше (ближе к единице) отношение токов абсорбции и утечки. Коэффициент абсорбции определяется выражением [11]:

$$k_a = (i_y + i_a) / i_y = 1 + i_a / i_y \quad (5.2)$$

Практически установлено, что определение коэффициента абсорбции k_a сводится к определению показаний мегомметра $R_{и}$ через 15 и 60 с после приложения к обмотке (изоляции) постоянного напряжения:

$$k_a = R_{и60} / R_{и15} \quad (5.3)$$

Для увлажненной изоляции $k_a \leq 1,3$ [11]. Для неувлажненной изоляции k_a достигает значений 3–4 и более.

Основное преимущество определения коэффициента абсорбции по отношению сопротивлений изоляции (уравнение (5.3)) состоит в том, что температура изоляции мало влияет на результаты измерений.

Таким образом, для контроля состояния изоляции требуется обеспечить ее измерение в течение 60 с, фиксировать значения через 15 и 60 с и вычислять по (5.3) коэффициент абсорбции. Эти действия можно выполнить с помощью микроконтроллера.

Известны две схемы измерения сопротивления изоляции обмоток электродвигателя (рисунок 5.10). В первой схеме (рисунок 5.10, а) источник постоянного напряжения включается между обмоткой и корпусом через измерительный резистор $R1$.

Во второй схеме измерения (рисунок 5.10, б) используется мост из трех одинаковых резисторов R и четвертого резистора, представляющего сопротивление изоляции. Выходное напряжение моста используется для контроля сопротивления изоляции.

В схемах рисунка 5.10 на сопротивлении изоляции падает напряжение:

$$U_{из} = U_{пит} \frac{R_{из}}{R + R_{из}} \quad (5.4)$$

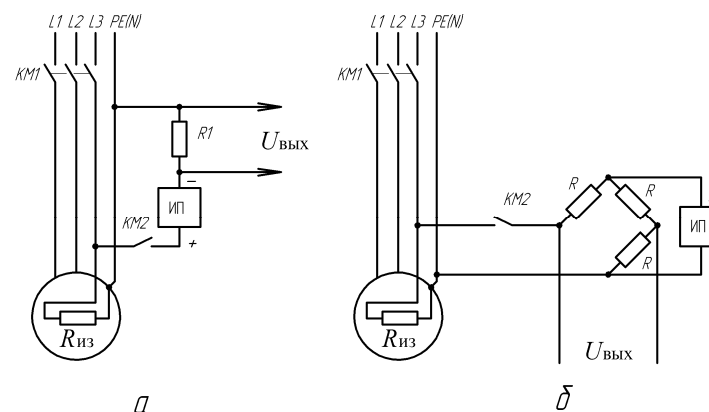


Рисунок 5.10 – Принципиальные электрические схемы измерительных цепей с последовательным включением сопротивления изоляции и измерительного резистора (а) и с включением сопротивления изоляции в плечо мостовой схемы (б)

В схеме рисунка 5.10, а выходное напряжение определяется выражением:

$$U_{\text{вых}} = U_{\text{пит}} \frac{R}{R + R_{\text{из}}} \quad (5.5)$$

При $R = 0,5 \text{ МОм}$ и $R_{\text{из}} = 0 \text{ МОм}$ получаем по уравнению (5.5) $U_{\text{вых}} = U_{\text{пит}}$, а при $R = R_{\text{из}} = 0,5 \text{ МОм}$ – $U_{\text{вых}} = U_{\text{пит}}/2$.

Изменение выходного напряжения $U_{\text{вых}}$ (рисунок 5.10, а) от величины сопротивления изоляции изображено на рисунке 5.11.

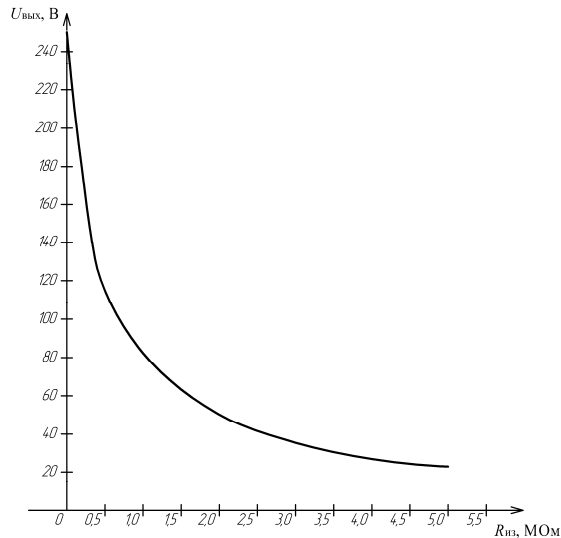


Рисунок 5.11 – Изменение выходного напряжения $U_{\text{вых}}$ (рисунок 5.10, а) от величины сопротивления изоляции

Изменение выходного напряжения мостовой схемы рисунка 5.10, б определяется выражением:

$$U_{\text{вых}} = \frac{U_{\text{пит}}}{2} \left(\frac{R - R_{\text{из}}}{R + R_{\text{из}}} \right) \quad (5.6)$$

При $R = 0,5 \text{ МОм}$ и $R_{\text{из}} = 0 \text{ МОм}$ получаем по уравнению (5.6)

$U_{\text{вых}} = U_{\text{пит}}/2$, а при $R = R_{\text{из}} = 0,5 \text{ МОм}$ – $U_{\text{вых}} = 0$.

Следовательно, если сопротивление изоляции равно сопротивлению резисторов моста, то выходное напряжение моста равно нулю. Если обрывается цепь измерения ($R_{\text{из}} = \infty$), то выходное напря-

жение отрицательное и составляет $U_{\text{вых}} = -0,5U_{\text{пит}}$. Если сопротивление изоляции равно нулю ($K3$ в цепи измерения), то выходное напряжение положительное и составляет $U_{\text{вых}} = 0,5U_{\text{пит}}$. Таким образом, в мостовой схеме обеспечивается четкий контроль обрыва цепи измерения, $K3$ в цепи измерения и изменение знака выходного напряжения при сопротивлении изоляции, равном сопротивлению плеч мостовой схемы. Этот способ контроля сопротивления изоляции реализован в устройстве для автоматической сушки изоляции обмоток асинхронного электродвигателя во время технологических пауз, разработанном в лаборатории автоматической защиты электрооборудования в БГАТУ [95] и в устройстве защиты [96].

Изменение выходного напряжения $U_{\text{вых}}$ (рисунок 5.10, б) от величины сопротивления изоляции изображено на рисунке 5.12.

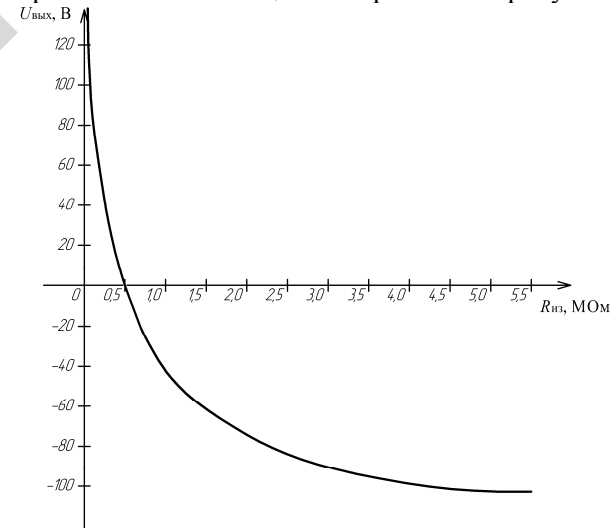


Рисунок 5.12 – Зависимость выходного напряжения $U_{\text{вых}}$ (рисунок 5.10, б) от сопротивления изоляции обмотки

Естественная скорость увлажнения обмотки во влажной среде не превышает 3 МОм/ч [15]. Это означает, что в самом худшем случае каждые 10 минут сопротивление изоляции уменьшается на $0,5 \text{ МОм}$. Отсюда следует, что измерение сопротивления изоляции можно проводить через 10 минут, из них 1 минута уходит на измерение сопротивления изоляции, а 9 минут – на паузу между измерениями.

Для реализации устройства контроля сопротивления изоляции с управлением от микроконтроллера используется схема, разработанная в лаборатории автоматической защиты электрооборудования в БГАТУ.

Устройство обеспечивает измерение и регистрацию текущего значения сопротивления изоляции при совместной работе с микроконтроллером. Кроме того, устройство обеспечивает предупредительную сигнализацию при снижении сопротивления изоляции ниже заданного значения (400–500 кОм) и автоматическое отключение электродвигателя при аварийном снижении сопротивления изоляции (40–100 кОм для погружного электродвигателя).

Разработанное устройство в отличие от известных устройств позволяет определить коэффициент абсорбции изоляции и хранить его в памяти микроконтроллера. Этот параметр представляет собой отношение сопротивления изоляции, измеренное через 60 с после подачи постоянного напряжения, к сопротивлению изоляции, измеренному через 15 с после подачи постоянного напряжения.

Принципиальная электрическая схема блока контроля сопротивления изоляции с частотным выходом изображена на рисунке 5.13.

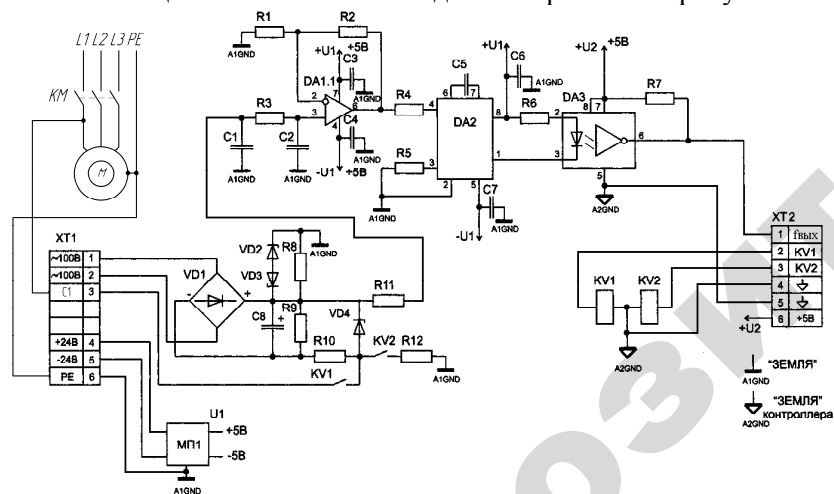


Рисунок 5.13 – Принципиальная электрическая схема блока контроля сопротивления изоляции с частотным выходом

Схема контроля сопротивления изоляции состоит из стабилизированного источника питания напряжением 100 В (диодный мост $VD1$,

стабилитрон $VD4$, резисторы $R8, R9$, конденсатор $C8$), предназначенного для питания измерительной цепи, ограничителя напряжения (стабилитроны $VD2, VD3$), усилителя с RC-фильтром на входе ($DA1, R11, R3, R1, R2, C1, C2$), преобразователя «напряжение – частота» ($DA2, R4, R5, C5$) и оптрона $DA3$, предназначенного для гальванического разделения выхода $DA2$ и входа микроконтроллера [97].

Падение напряжения ΔU , пропорциональное току утечки изоляции, через RC-фильтр $R11, C1, R3, C2$ поступает на вход неинвертирующего усилителя на микросхеме $DA1$, имеющей коэффициент усиления $k_1 = \frac{R2}{R1} + 1$. Фильтр подавляет переменную составляющую в сигнале ΔU . Стабилитроны $VD2, VD3$ образуют двусторонний ограничитель напряжения, благодаря которому напряжение на резисторе $R8$ не превышает 5 В даже при возникновении КЗ на землю в контролируемой цепи.

Выходная частота преобразователя «напряжение – частота» ($U - f$) пропорциональна сигналу ΔU . Поскольку период импульсов $T = 1/f$, то при условии $R_{из} \gg R8$ ($R8 = 2$ кОм, $R_{из} > 10$ МОм) можно записать $R_{из} \cong AT$, где A – коэффициент пропорциональности (масштабный коэффициент).

Таким образом, микроконтроллер выполняет операцию измерения периода, при этом после умножения на заданный масштабный коэффициент A на индикаторе отображается сопротивление изоляции в кОм или МОм.

При контроле работоспособности устройства контакт реле $KV2$, управляемого микроконтроллером, подключает резистор $R12$ (10 МОм) к «–» источника питания 100 В. Реле $KV1$ также управляется микроконтроллером и служит для подключения цепи контроля изоляции к источнику питания. Программа микроконтроллера позволяет при каждом включении электродвигателя автоматически определять коэффициент абсорбции.

5.3. Защита обмоток асинхронных электродвигателей от увлажнения во время технологических пауз

Правила устройств электроустановок требуют, чтобы эксплуатируемые в сети 0,4 кВ электродвигатели имели сопротивление изоляции не менее 0,5 МОм. Увлажнение обмотки приводит к снижению сопротивления изоляции. Возможен пробой изоляции и КЗ. Поэтому требуется не только контролировать сопротивление изоляции электродвигателя и отключать его от сети при недопустимо низких значениях сопротивления изоляции, но и защищать обмотки электродвигателя от увлажнения.

Ранее, в п. 5.1 рассмотрена изоляция обмоток асинхронных электродвигателей и ее свойства в условиях эксплуатации. Показано:

- 1) несмотря на закрытое использование электродвигателей, в них создаются условия увлажнения обмотки;
- 2) при пуске происходит снижение сопротивления увлажненной изоляции; степень снижения сопротивления изоляции зависит от ее начального увлажнения перед включением электродвигателя;
- 3) электродвигатели, работающие в кратковременном режиме, не успевают самоподсушиваться и накапливают влагу.

Для обеспечения требуемого уровня сопротивления изоляции обмоток используются следующие способы защиты их от увлажнения:

- 1) полная герметизация электродвигателя или обмотки;
- 2) дополнительное покрытие изоляции влагостойкими лаками, эмалями или компаундами;
- 3) использование явления электроосмоса для вытеснения влаги из объема изоляции во время нерабочих пауз;
- 4) подсушка изоляции в переменном электрическом поле повышенной частоты или частоты 50 Гц во время нерабочих пауз за счет джоулевых и диэлектрических потерь;
- 5) поддержание температуры обмоток выше температуры окружающей среды на $(5-7)^\circ\text{C}$.

Способы защиты обмоток электродвигателей от увлажнения при эксплуатации изображены на рисунке 5.14.

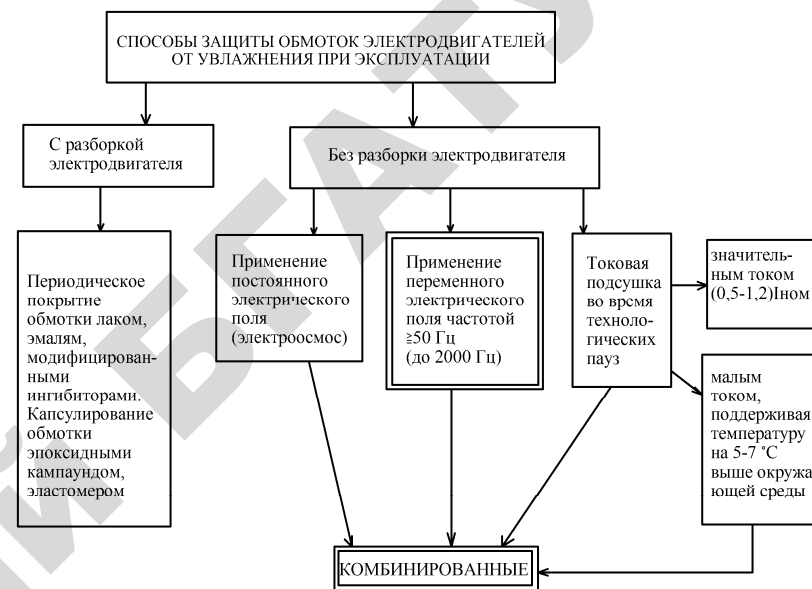


Рисунок 5.14 – Способы защиты обмоток электродвигателей от увлажнения при эксплуатации

● Добиться *полной герметизации* электродвигателя сложно. Воздух проникает внутрь через сальники, коробку выводов, микротрещины. Полная герметизация обмотки может быть реализована только на заводе-изготовителе.

Можно повысить влагостойкость обмотки, производя покрытие обмоток термореактивным лаком МЛ-92, эмалями ГФ-92-ХС и ГФ-92-ГС с последующей сушкой или пропитывая обмотки электродвигателя термостойким гидрофобным компаундом с противогрибковым действием, а также размещая обмотку в компаунде. Эти меры усиливают изоляционные свойства обмотки, препятствуют образованию и развитию микротрещин, увеличивают рабочую температуру электродвигателя и является эффективным средством повышения эксплуатационной надежности электродвигателей [9]. Их используют при текущих ремонтах, в условиях пунктов технического обслуживания электрооборудования, при правильно организованной эксплуатации электродвигателей. Эти способы не предотвращают увлажнения обмотки во время эксплуатации, но увеличивают стой-

кость изоляции к увлажнению. Дополнительной мерой является нанесение защитной эмали на внутренние поверхности статора и ротора. Это устраняет вредное влияние водяного конденсата, образующегося из-за температурных перепадов в рабочем зазоре электродвигателя, устраняет коррозию, разрушение изолирующего слоя краев статорных и роторных пластин, появление вихревых токов и необратимое ухудшение свойств магнитопровода.

- Один из способов защиты от увлажнения обмотки во время технологических пауз основан на использовании явления электроосмоса. Под *электроосмосом* понимается процесс переноса жидкости в капиллярных системах под действием постоянного электростатического поля. Способ реализуется просто. На обмотку двигателя подается «плюс» от источника постоянного тока, а на корпус двигателя – «минус». Влага при электроосмотической сушке вытесняется в направлении электрического поля, т. е. от положительного плюса источника к отрицательному полюсу. Влага из системы изоляции выходит на поверхность изоляции и скапливается на поверхности пазов и в лобовых частях, далее испаряется в окружающую среду при включении электродвигателя.

Этот способ кажется весьма заманчивым. Основное достоинство способа – малая потребляемая мощность, поэтому исключаются локальные перегревы изоляции [98]. Однако этот способ имеет несколько недостатков.

Первый недостаток состоит в том, что конденсат влаги скапливается на поверхности изоляции и сам не удаляется. Надо обдуть обмотку нагретым воздухом или включать электродвигатель. Тогда под действием температуры влага испарится с обмотки.

Второй недостаток состоит в том, что влага удаляется из фазной изоляции, а междуфазная изоляция подсушивается косвенным путем и медленно. Следовательно, скорость сушки обмотки определяется скоростью сушки междуфазной изоляции лобовых частей обмотки, самого слабого по электрической прочности места в изоляции обмотки. Известно, что в 85–90 % случаев пробой изоляции происходит в лобовых частях обмотки.

Третий недостаток способа – активизация электрохимического окисления металлов внутри электродвигателя. При соединении обмотки с «плюсом» источника питания, а корпуса с «минусом» источника питания происходит вытеснение влаги на поверхность об-

мотки и усиление электрохимических реакций в трещинах изоляции проводов, отчего медь окисляется, омическое сопротивление обмоток увеличивается [99].

Если соединить «минус» источника питания с обмоткой, а плюс подать на корпус, то усиливаются электрохимические реакции окисления элементов корпуса, особенно электротехнического железа в пазах статора. Такое присоединение источника питания эффективно при величине сопротивления изоляции менее 20 кОм [99].

Таким образом, электроосмотический способ защиты обмотки от увлажнения не предотвращает накопление влаги во внутреннем объеме электродвигателя, но предотвращает накопление влаги в изоляции, активизирует при этом электрохимические реакции окисления внутри электродвигателя. Эти особенности делают третий способ неперспективным.

- *Известен способ защиты обмотки от увлажнения во время технологических пауз, основанный на сушке изоляционных материалов в переменном электрическом поле за счет диэлектрических и джоулевых потерь. Величина диэлектрических потерь пропорциональна частоте тока, а джоулевых потерь – пропорциональна квадрату тока утечки.* Исследования, проведенные Д. Я. Воденисовым и А. С. Челпановым, показали эффективность сушки изоляционных материалов токами повышенной частоты. Если за единицу принять эффективность сушки без электрического поля, то электроосмос эффективнее его в 1,4 раза, частота 50 Гц – в 1,6 раза, частота 500 Гц – в 3,8 раза, а 1000 Гц – в 4,8 раза.

Известна простейшая реализация этого способа на частоте 50 Гц: одну из фаз сети через предохранитель на ток 2,5–5 мА подключают к обмотке отключенного электродвигателя (информация Вологодского ЦНТИ). При этом через обмотку, систему изоляции и корпус электродвигателя начинает протекать ток проводимости, величина которого зависит от увлажнения изоляции. Прохождение тока проводимости вызывает выделение джоулевого тепла пропорционально квадрату тока, сопротивлению изоляции и времени. Чем больше увлажнена изоляция, тем больше величина тока проводимости. В свою очередь это вызывает более интенсивную сушку. Таким образом, интенсивность подсушки автоматически регулируется самой изоляцией. В результате не происходит увлажнение обмоток и сопротивление изоляции поддерживается на должном уровне.

Этот способ, как и электроосмос, не предотвращает проникновения влаги внутрь двигателя, но предотвращает накопление влаги в изоляции, подсушивая ее. По сравнению с электроосмосом этот способ не вызывает активизации электрохимических реакций окисления и эффективнее его.

- *Поддержание температуры обмотки выше температуры окружающей среды на 5–7 °С во время технологических пауз не вызывает увлажнения обмотки. Влага не осажается на наружных поверхностях обмоток, т. к. температура их выше точки росы.* Отсутствие влаги в микротрещинах изоляции, появляющейся из-за механической перегрузки изоляции, дефектов при изготовлении машины, повышенной вибрации или старения благотворно влияет на работоспособность электродвигателя. Кроме того, при обогреве током не получают развития предпробойные явления (перекрытие участков по поверхности), исключается опасность вспучивания электрической изоляции, наблюдаемой при пуске холодных и влажных электродвигателей.

Этот способ надежнее других, поскольку препятствует накоплению влаги внутри электродвигателя. При нагреве обмотки протекающим током тепло выделяется в обмотке, непосредственно контактирует с изоляцией. Единственный недостаток способа – более высокий расход электрической энергии.

- *Комбинированные способы защиты изоляции обмоток от увлажнения* используют несколько методов защиты в одном устройстве. Известны работы А. Е. Немировского (Вологодский политехнический институт) о применении электроосмоса с обдувом обмотки нагретым воздухом, с наложением на постоянное поле высокочастотного поля. Комбинированные способы показали хорошие результаты [100]. В целом комбинированные способы мало изучены и не реализованы в выпускаемых устройствах защиты.

5.4. Токовая подсушка и предотвращение увлажнения изоляции обмоток асинхронных двигателей во время технологических пауз

Токовая подсушка изоляции во время технологических пауз значительным током (0,5–1,2I_{ном}) позволяет быстро восстановить сопротивление изоляции обмоток асинхронных двигателей, нагревая обмотки до

100–120 °С. Она используется при вводе электродвигателей в эксплуатацию, при аварийном увлажнении электродвигателей.

Токовая подсушка изоляции во время технологических пауз малым током позволяет поддержать температуру обмотки на уровне 5–7 °С выше температуры окружающей среды. Изоляция обмотки в этом случае не увлажняется [101].

В случае сушки значительным током изоляция подвергается термическому удару, а при сушке малыми токами – мягкому нагреву.

Поддержание температуры обмотки на уровне 5–7 °С выше температуры окружающей среды надежнее всех ранее рассмотренных способов предотвращения увлажнения обмоток, поскольку препятствует накоплению влаги внутри электродвигателя.

Устройства токовой подсушки и устройства, предотвращающих увлажнение обмоток во время технологических пауз представлены на рисунке 5.15.

При обогреве обмотки переменным током большая часть общего тепла выделяется в меди статора, т. е. вблизи охраняемой электрической изоляции. Поскольку нагрев изоляции незначительный, то не происходит ее коробления, растрескивания и т. п.

Способ токовой подсушки нашел наибольшее применение. Он может быть реализован различными путями. Например, использование специальных подогреваемых резисторов, которые могут быть смонтированы в самом электродвигателе, пропускание переменного, постоянного или импульсного токов через обмотку с помощью тиристорных регуляторов или коммутаторов, трансформаторов с отпайками, конденсаторов.

Экспериментально установлено, что для нагрева обмоток электродвигателей на 5–7 °С выше окружающей среды требуется величина тока не менее $(0,14–0,25)I_{ном}$. Обмотки электродвигателя могут быть соединены в схемы «звезда» или «треугольник». Удельная мощность подогрева составляет не менее (15–5) Вт/кВт номинальной мощности электродвигателя, причем большие удельные значения соответствуют меньшим электродвигателям (0,55 кВт), а меньшие удельные значения соответствуют большим электродвигателям (22 кВт).

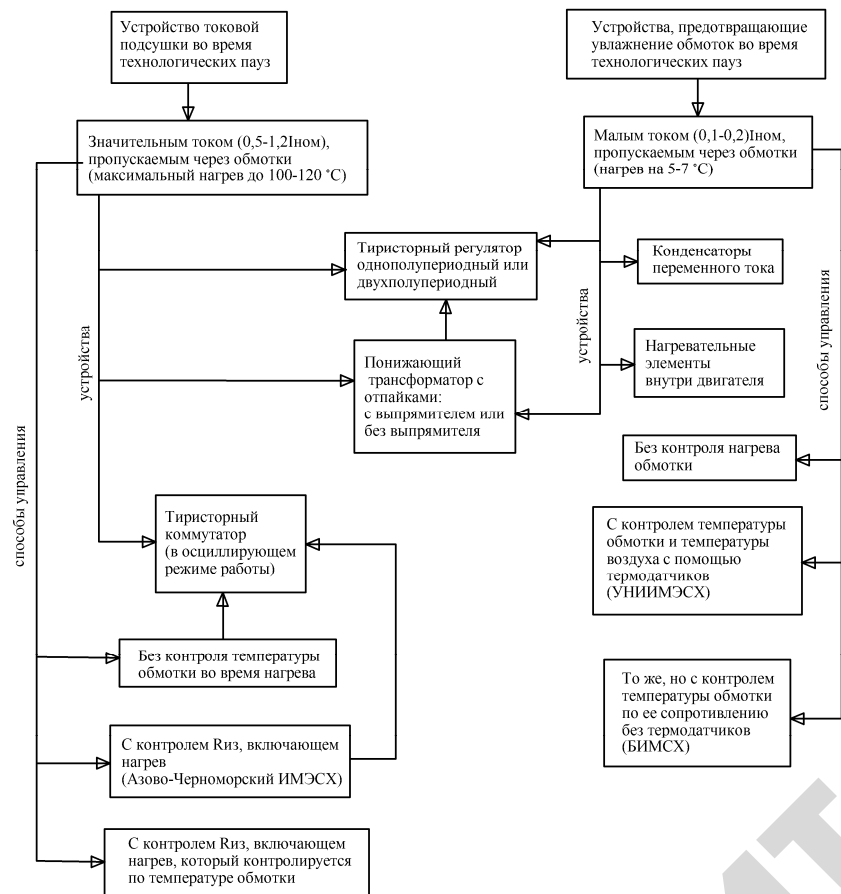


Рисунок 5.15 – Устройства токовой подсушки и устройства, предотвращающих увлажнение обмоток во время технологических пауз

На рисунке 5.16, *а* изображена схема устройства токовой подсушки обмоток электродвигателя с помощью понижающего трансформатора с отпайками. Первичная обмотка трансформатора подключена к фазному напряжению 220 В. Напряжение вторичной обмотки трансформатора зависит от сопротивления двух фаз обмотки электродвигателя. Оно составляет от 30 В (для мощности электродвигателя 0,09 кВт) до 16 В (при мощности 22 кВт). С увеличением мощности электродвигателя напряжение подпитки уменьшается.

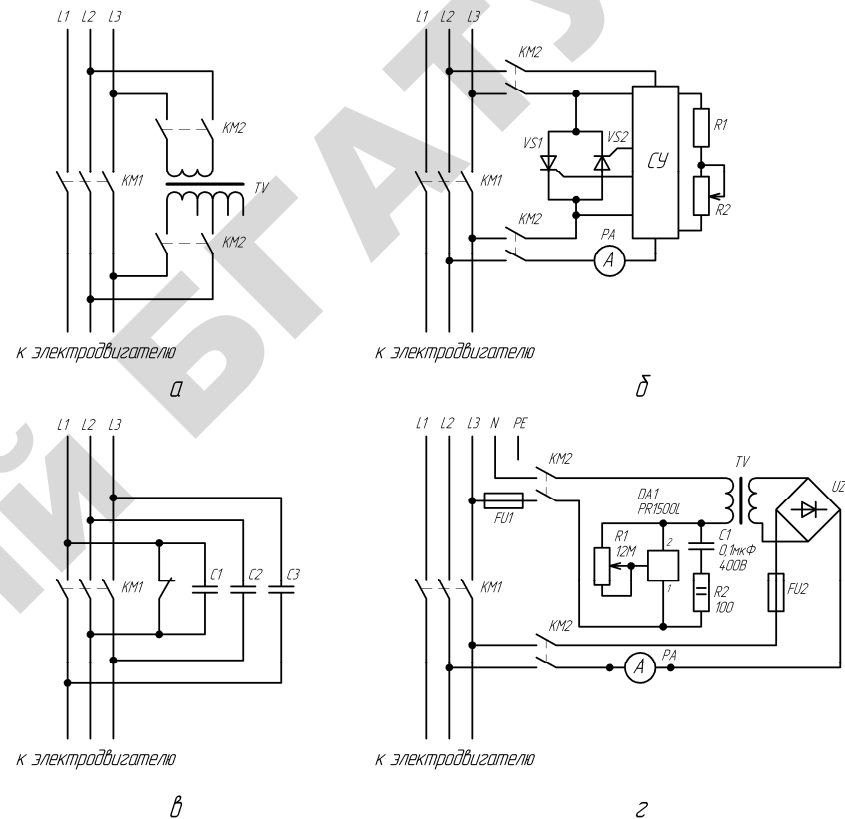


Рисунок 5.16 – Принципиальная электрическая схема токовой подсушки обмоток электродвигателя во время технологических пауз с помощью понижающего трансформатора с отпайками (*а*), тиристорного регулятора переменного тока с фазовым управлением (*б*), блока конденсаторов (*в*), регулируемого выпрямителя (*г*)

На рисунке 5.16, *б* изображена схема устройства токовой подсушки обмоток электродвигателя с помощью тиристорного (или симисторного) регулятора переменного тока с фазовым управлением. Ток подсушки регулируют с помощью резистора R2. Резистор R1 позволяет ограничить величину импульсов тока и не допустить режима КЗ. Для контроля тока требуется амперметр PA переменного тока, хотя его показания при импульсном токе будут неточны.

На рисунке 5.16, *в* изображена схема устройства токовой подсушки обмоток электродвигателя с помощью трех конденсаторов, включенных

параллельно контактам электромагнитного пускателя. При включении электромагнитного пускателя конденсаторы образуют схему «треугольник», включенную в сеть. В таком состоянии они компенсируют реактивный ток электродвигателя, повышая его коэффициент мощности. При отключении электромагнитного пускателя KM получается включение двух фазных обмоток в сеть через конденсаторы, а третьей фазной обмотки – напрямую в сеть. В этом случае емкость конденсаторов требуется меньшая, чем при отсутствии размыкающего контакта электромагнитного пускателя KM . В исследованиях Л. Г. Прищепа и А. А. Медведева показано, что емкость конденсаторов должна составлять (в микрофарадах) $C = (1,1 - 1,3) I_{ном}$, а для схемы без размыкающего контакта $KM - C = (2,03 - 2,9) I_{ном}$. Для предохранительного подогрева и частичной компенсации реактивной мощности могут быть использованы конденсаторы МВГЧ-1, самовосстанавливающиеся К78-25 и К 73-36.

На рисунке 5.16, *г* изображена схема устройства токовой подсушки обмоток электродвигателя с помощью регулируемого выпрямителя, разработанного на базе зарядного устройства [102]. В отличие от схем рисунка 5.16, *а-в*, здесь обеспечивается питание обмоток электродвигателя постоянным выпрямленным током. Источником тепла является обмотка электродвигателя и нет дополнительных потерь мощности в роторе и стали статора, как в схемах рисунка 5.16, *а-в*. В этой схеме используется амперметр постоянного тока со шкалой 10 А, симисторный регулятор мощности A (микросхема $PR1500i$), трансформатор TV типа $OCC-0,25$ мощностью 250 ВА, имеющий напряжение вторичной обмотки 24 В. Диоды рассчитаны на ток 10 А, например, типа КВРС1001. Устройство способно подсушивать обмотки электродвигателей мощностью до 22 кВт. Вариант включения регулятора мощности $PR1500i$ соответствует заводским рекомендациям по конструированию устройства с индуктивными нагрузками. При отсутствии цепи $CIR2$ устройство не работает. Большим плюсом данной схемы, наряду с ее простотой, является не критичность схемы управления к выбору трансформатора разной мощности и напряжения, отсутствие необходимости в налаживании, гальваническое отделение нагрузки от сети. В устройствах, выполненных по схемам рисунка 5.16, *б, в* обмотки электродвигателя гальванически не разделены с сетью и сетевое напряжение представляет опасность для обслуживающего персонала.

Для снижения энергоемкости подогревающее устройство должно включаться тогда, когда температура перегрева обмотки снизится до $+5\text{ }^{\circ}\text{C}$. Удобно в этом случае использовать таймер или устройство температурной защиты, контролирующее температуру обмотки. Такое устройство описано в [103]. Оно содержит измерительный мост переменного тока, в плечи которого включены терморезисторы. Один из них служит датчиком температуры обмоток электродвигателя, а другой терморезистор – датчиком температуры окружающей среды. Устройство содержит также усилитель и исполнительный орган на тиристоре, пропускающем ток к обмоткам при неработающем электродвигателе. При достижении превышения температуры обмоток на $7\text{ }^{\circ}\text{C}$ выше температуры окружающей среды сигнал с измерительного моста равен нулю и тиристор закрывается. При снижении температуры до $5\text{ }^{\circ}\text{C}$ выше температуры окружающей среды тиристор снова открывается. Таким образом, поддерживается температура обмотки $(5-7)\text{ }^{\circ}\text{C}$ выше температуры окружающей среды, предотвращая ее увлажнение.

В устройстве, предотвращающем увлажнение обмотки и описанном в [104], не требуется датчика температуры. Устройство снабжено дифференциальным усилителем и мостовой схемой, в одно плечо которой включена обмотка электродвигателя вместо датчика температуры. Измерение и подогрев обмотки производятся таким образом, что в один полупериод сетевого напряжения измеряется температура обмотки, в другой полупериод сетевого напряжения производится подогрев обмотки.

Упростить технологические средства автоматической сушки можно, исключив из них системы контроля температуры обмотки и перейдя от тиристорных регуляторов с фазовым управлением к тиристорным коммутаторам с релейным управлением. При этом обеспечиваются импульсные, осциллирующие режимы сушки, с периодом токовых импульсов $(15-17)\text{ с}$ [105]. Недостаток такой подсушки состоит в том, что в период импульса по обмотке протекает ток, составляющий половину пускового тока электродвигателя. Обмотка при этом испытывает термические и динамические удары.

Дальнейшее усовершенствование устройств, предотвращающих увлажнение обмотки, достигается контролем сопротивления изоляции с автоматическим включением тока подсушки изоляции при ее

снижении. Примером такого решения является устройство, описанное в [106] (рисунок 5.17). Устройство состоит из узла питания (трансформатор *T1*, диодные мосты *VD1*, *VD3*), узла контроля сопротивления изоляции (микросхема *DA1*, транзистор *VT2*, реле *K1*) и узла управления (микросхема *DD1*, транзисторы *VT1*, *VT3*, реле *K2*). Исполнительными элементами служат симисторы *VS1* и *VS2*. Включают устройство сушки переключателем *SA1*, первая группа контактов которого (*SA1.1*) замыкает цепь первичной обмотки трансформатора *T1*, а вторая группа контактов (*SA1.2*) соединяет обмотку электродвигателя *M1* с входом узла контроля.

Если силовые контакты контактора *KM1* замкнуты и электродвигатель подключен к сети, устройство сушки не функционирует, так как цепь первичной обмотки трансформатора *T1* разомкнута вспомогательным контактом контактора *KM1*.

Стабилитроны *VD6* и *VD7* предназначены для стабилизации напряжений, необходимых для питания микросхем *DA1* и *DD1*, а стабилитрон *VD2* – для стабилизации напряжения 130 В, служащего испытательным напряжением для проверки сопротивления между обмотками и корпусом электродвигателя *M1*. Испытательное напряжение передается на корпус электродвигателя через защитный резистор *R4*.

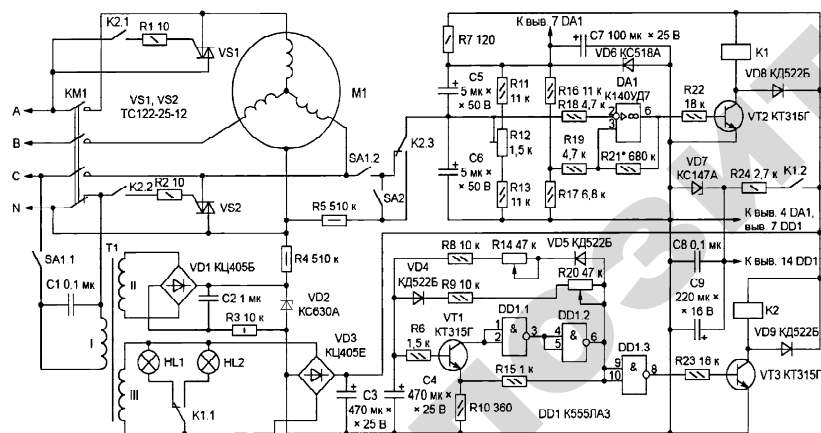


Рисунок 5.17 – Устройство автоматической сушки обмоток электродвигателя во время технологических пауз импульсами тока [106]

Контролирует сопротивление изоляции операционный усилитель *DA1*, охваченный положительной обратной связью (резистор *R21*), превращающий его в триггер Шмитта. Напряжение на инвертирующем входе операционного усилителя (*OY*) зависит от тока, протекающего под действием испытательного напряжения через сопротивление изоляции между корпусом и обмоткой электродвигателя, и от положения движка построечного резистора *R12*, которым регулируют порог срабатывания триггера Шмитта. Благодаря относительно небольшим номиналам резисторов *R11–R13*, узел контроля сопротивления изоляции не чувствителен к наводкам. Провода, соединяющие его с электродвигателем, могут быть значительной длины.

Если сопротивление изоляции в норме, то напряжение на инвертирующем входе *OY DA1* больше, чем на неинвертирующем входе. Напряжение на входе *OY* – низкое, транзистор *VT2* закрыт, обмотка реле *K1* обесточена. Горит сигнальная лампа *HL1* «Контроль изоляции».

При увлажнении обмоток сопротивление изоляции падает, напряжение на инвертирующем входе *OY DA1* уменьшается. По достижении напряжения порога срабатывания триггера Шмитта транзистор *VT2* открывается, реле *K1* срабатывает. Лампа *HL1* гаснет, зажигается лампа *HL2* «Сушка изоляции». Контакты реле *K1.2* подают питание на микросхему *DD1*, на элементах которой и транзисторе *VT1* собран мультивибратор. Предусмотрена независимая регулировка длительности импульсов и пауз между ними. Длительность импульсов можно изменять переменным резистором *R20* в пределах 0,3–7 с, а пауз – переменным резистором *R14* в пределах 3–16 с. Выходной сигнал мультивибратора поступает на транзисторный ключ *VT3*, управляющий реле *K2*. Контакты *K2.1* и *K2.2* находятся в цепях управляющих электродов симисторов *VS1* и *VS2*. Включаются симисторы *VS1* и *VS2*. Они подают фазное сетевое напряжение на две последовательно соединенные обмотки электродвигателя *M*. Для вращения ротора этого недостаточно, но протекающий по обмоткам ток подогревает и сушит их.

На время сушки контакты *K2.3* разрывают цепь контроля. Резистор *R5* предотвращает ложное срабатывания триггера Шмитта, имитируя пониженное до 510 кОм сопротивление изоляции. Выключателем *SA2* этот резистор можно подключить на постоянно,

5.5. Предпусковой контроль параметров электрической сети и асинхронного электродвигателя

что вызовет принудительный переход устройства в режим сушки. Конденсаторы *C5*, *C6* сохраняют неизменным напряжение на входе триггера во время «перелета» и дребезга контактов *K2.3*. Они же защищают вход от помех.

В паузах между импульсами, когда реле *K2* обесточено, а симисторы *VS1*, *VS2* закрыты, временно восстанавливается режим контроля. Если сопротивление изоляции уже пришло в норму, триггер на ОУ *DA1* изменит свое состояние, обесточит реле *K1* и прекратит сушку. В противном случае сушка будет продолжена с началом очередного импульса мультивибратора.

Следует отметить, что в этой схеме напряжение фазы 220 В включается на две обмотки электродвигателя, отчего на каждую обмотку приходится по 110 В. Следовательно, ток через обмотки составит половину пускового. Обмотка при этом испытывает термические и динамические удары, снижающие срок ее службы. Благодаря импульсному характеру протекающего тока с паузами в 2,3–10 раз более длинными, чем импульс нагревающего тока, перегрева обмоток, по данным автора, не происходит. Обычно температуру корпуса стабилизируют в интервале 70–75 °С [106] (температура обмотки будет гораздо выше).

Отметим, что описанное выше устройство автоматической токовой сушки обеспечивает интенсивный нагрев и сушку обмотки за счет почти пусковых токов. Такой процесс сушки может быть приемлем при аварийном увлажнении обмотки, возникающем, например, при мойке оборудования и попадании воды внутрь электродвигателя. При медленном увлажнении обмотки во время технологических пауз за счет скапливающегося внутри конденсата не требуется нагревать обмотку так интенсивно почти пусковыми токами. Достаточно использовать подсушку малыми токами, что более благоприятно сказывается на надежности работы электродвигателя.

Следует также отметить, что электродвигатель можно подключать по рассмотренной выше схеме сушки только к промышленной трехфазной электросети с глухозаземленной нейтралью, иначе потребуется переделка схемы. Если при работе электродвигателя выключатель *SA1* оставлен замкнутым, элементы устройства защиты оказываются соединенными с одной из фаз сети и прикосновение к ним опасно для жизни.

Пуск трехфазного асинхронного электродвигателя может быть разрешен только в том случае, если в электрической сети присутствуют три фазы и изоляция электродвигателя в норме.

Анализ показывает, что для предпускового контроля наличия всех фаз в сети наиболее просто использовать фильтр напряжения обратной последовательности. Кроме контроля неполнофазного режима он обеспечит дополнительную функцию – контроль порядка чередования фаз. Это важно для приводов рабочих машин, не допускающих вращения в обратную сторону. Фильтр напряжения обратной последовательности очень чувствителен к асимметрии напряжения, поэтому в ответственных случаях можно организовать дополнительно с его помощью контроль асимметрии напряжения фаз сети. Этих параметров достаточно для предпускового контроля электрической сети.

Анализ способов контроля изоляции асинхронных электродвигателей перед пуском показал, что наиболее просто измерение сопротивления изоляции может быть организовано косвенным путем, измеряя ток утечки на частоте 50 Гц. При этом обеспечивается важный сопутствующий эффект: подсушка изоляции во время технологических пауз за счет диэлектрических и джоулевых потерь.

Рассмотрим два устройства предпускового контроля, разработанные в БГАТУ магистрантом кафедры электрооборудования сельскохозяйственных предприятий В. В. Мурашко.

Устройство предпускового контроля, построенное на базе аналоговых элементов, конструктивно состоит из семи функциональных блоков (рисунок 5.18):

блок *A1* контролирует напряжение всех трех фаз сети, чередование фаз и недопустимую асимметрию;

блок питания *A2* обеспечивает схему необходимыми напряжениями;

блок *A3* измеряет ток утечки, по которому определяют величину сопротивления изоляции электродвигателя;

блок *A4* – устройство защитного отключения, которое необходимо для отключения цепи измерения тока утечки и электромагнитного пускателя в случае, когда ток утечки превысит предельное значение (5 мА);

блок *A5* (триггер) обеспечивает временные задержки, необходимые для нормальной работы устройства;

блок *A6* – обеспечивает выдержку времени на включение цепи, измеряющей ток утечки. Это необходимо потому, что после отключения электродвигателя от сети его ротор вращается по инерции еще некоторое время. Выдержка времени должна быть большей, чем время остановки электропривода;

блок *A7* разрешает или запрещает включение электромагнитного пускателя.

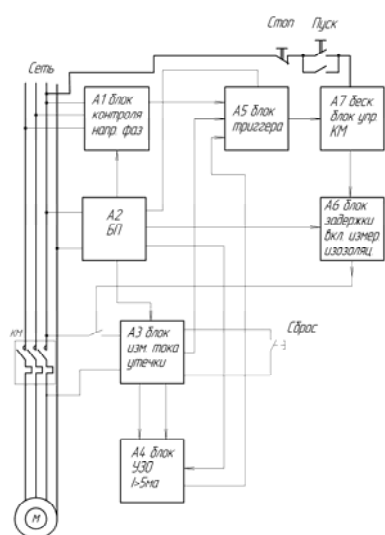


Рисунок 5.18 – Блок-схема аналогового устройства предупредительного контроля сети и электродвигателя

Принципиальная электрическая схема устройства защиты приведена на рисунке 5.19. Устройство состоит из блока коммутации *1*, фильтра напряжения обратной последовательности *2*, блока *3* контроля выходного напряжения указанного фильтра, исполнительного органа *4*, блока питания *5*, датчика тока утечки *6*, блока *7* задержки времени включения датчика тока утечки в цепь электродвигателя, компаратора *8* тока утечки, блока *9* защитного отключения.

Блок коммутации включает кнопку *SB2* «Пуск» и кнопку *SB1* «Стоп», электромагнитный пускатель *KM*, имеющий силовые контакты *KM* и электротепловое токовое реле *KK*. В цепи катушки электромагнитного пускателя *KM* включен электронный ключ *VS3* на базе симистора, который управляется тиристорной оптопарой *VV2*.

Входы фильтра напряжения обратной последовательности *2* присоединены к фазам питающей сети, а выходы – к блоку *3* контроля выходного напряжения указанного фильтра, состоящего из двух параллельных цепочек. В первую цепочку последовательно включены первый диод *VD2*, первый светодиод *HL2* «Неполнофазный режим», первый динистор *10*, составленный из тиристора *VS2* и входного элемента транзисторной оптопары *VV1*, выход которого соединен с первым входом элемента ИЛИ *12* исполнительного органа *4*.

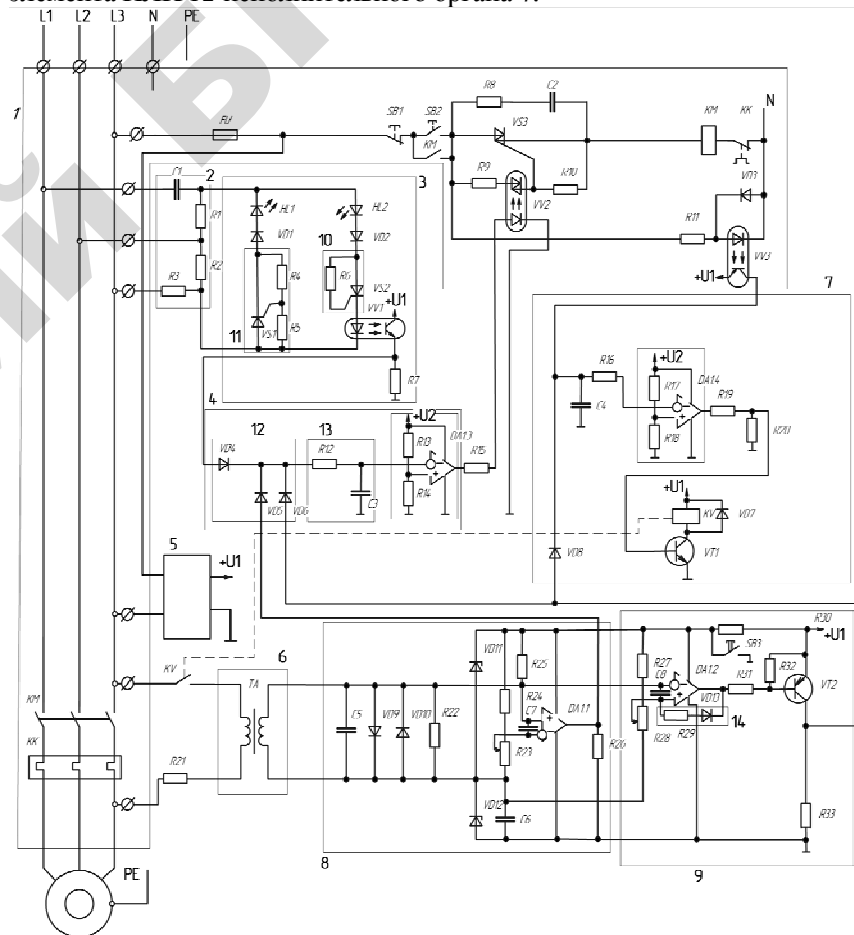


Рисунок 5.19 – Принципиальная электрическая схема устройства предупредительного контроля электродвигателя и предотвращения увлажнения обмотки во время технической паузы

Во вторую цепочку, последовательно и встречно первой цепочке, включены второй диодистор *II*, составленный из тиристора *VS1* и резисторов *R4* и *R5*, второй диод *VD1* и второй светодиод *H11* «Обратное чередование фаз».

Исполнительный орган *4* содержит трехходовой элемент ИЛИ *I2*, нагруженный на интегрирующий элемент *I3*, выход которого соединен с входом компаратора *DA1.3*, нагруженного на вход тиристорной оптопары *VV2*.

Блок питания *5* включен в ту же фазу, что и цепочка блока коммутации *1*. На выходе блока питания обеспечивается однополярное напряжение, от которого получают питание другие элементы устройства.

Датчик тока утечки *6* имеет первичную токовую обмотку *TA*, включенную через замыкающий контакт *KV* блока задержки *7* и резистор *R21* параллельно силовым замыкающим контактам *KM* одной фазы электромагнитного пускателя *KM*. Вторичная обмотка датчика тока *6* нагружена на резистор *R22* и далее включена на неинвертирующий вход операционного усилителя *DA1.1*, включенного компаратором, выход которого соединен со вторым входом элемента ИЛИ *I2* исполнительного органа *4*.

Блок *7* задержки времени включения датчика тока *6* в цепь электродвигателя содержит операционный усилитель *DA1.4*, включенный компаратором. На входе блока *7* содержится емкость *C4*, которая через резистор *R16* соединена с инвертирующим входом операционного усилителя *DA1.4*, а выход его – с базой транзистора *VT1*, в коллекторную цепь которого включено реле *KV*. Замыкающий контакт *KV* реле *KV* включен в первичной цепи *TA* трансформатора тока утечки *6*. Вход блока *7* соединен с выходом транзисторной оптопары *VV3* блока коммутации *1*.

Блок *9* защитного отключения содержит операционный усилитель *DA1.2*, включенный триггером с обратной связью *I4*, транзисторный ключ *VT2* и кнопку «Сброс» *SB3*. Инвертирующий вход операционного усилителя *DA1.2* соединен с вторичной обмоткой датчика тока *TA*, а выход – с базой транзисторного ключа *VT2*. Выход транзисторного ключа *VT2* соединен с третьим входом элемента ИЛИ *I2* исполнительного органа *4*, и с входом блока *7* задержки времени включения датчика тока утечки *TA* через диод *VD8* в прямом направлении. Кнопка «Сброс» *SB3* соединяет через резистор *R30* плюс питания с минусом питания.

Устройство защиты работает следующим образом. При включении устройства в исправную электрическую сеть и при сопротивлении изоляции обмоток выше нормы на выходе компаратора *DA1.3* положительный сигнал, оптотиристор *VV2* открыт и симистор *VS3* открыт.

На входе блока *7* задержки времени включения сигнал отсутствует, поэтому на выходе компаратора *DA1.4* положительный сигнал, который открывает транзистор *VT1* и включается реле *KV*, отчего его контакт *KV* замыкается и трансформатор тока утечки *TA* включается в сеть. Через его первичную обмотку течет переменный ток утечки, который ограничен сопротивлением изоляции $R_{\text{изол}}$ и сопротивлением резистора *R21*.

$$I_{\text{ут}} = \frac{U_{\phi}}{R_{\text{изол}} + R_{21}} . \quad (5.7)$$

Поскольку $R_{21} \ll R_{\text{изол}}$, то ток утечки определяется сопротивлением изоляции.

Ток утечки вызывает в трансформаторе *TA* электромагнитный поток, пропорциональный ему, а также ЭДС во вторичной обмотке, которая также пропорциональна току утечки. Эта ЭДС вызывает падение напряжения на резисторе *R22*. Это напряжение поступает на инвертирующий вход триггера *DA1.2* и неинвертирующий вход компаратора *DA1.1*. Если уровень тока утечки выше установленного значения, то на неинвертирующем входе компаратора *DA1.1* напряжение выше, чем на инвертирующем, и на выходе его появляется положительный сигнал, который поступает на элемент ИЛИ *I2*. Компаратор *DA1.3* переключается, на его выходе появляется отрицательный сигнал и оптотиристор *VV2* закрывается, отчего симистор *VS3* тоже закрывается. Электромагнитный пускатель *KM* нельзя включить, нажимая на кнопку «Пуск» *SB2*.

Если уровень тока утечки ниже нормы, то на неинвертирующем входе компаратора *DA1.1* напряжение ниже, чем на инвертирующем входе, отчего на его выходе отрицательный сигнал. При этом компаратор *DA1.3* имеет на выходе положительный сигнал, поэтому оптотиристор *VV2* и симистор *VS3* открыты. В таком состоянии переменное напряжение частотой 50 Гц подводится к обмотке электродвигателя, вызывая ток утечки через изоляцию. Этот ток в свою очередь вызывает джоулевые потери в изоляции, благодаря чему изоляция подсушивается.

Таким образом, благодаря включению в устройство трансформатора тока утечки, блока задержки времени включения датчика тока утечки в цепь электродвигателя и компаратора тока утечки обеспечивается запрет на включение электродвигателя в сеть при пониженном сопротивлении изоляции. Дополнительно производится подсушка изоляции электродвигателя во время технологической паузы, что уменьшает аварийность электродвигателей и обеспечивает положительный экономический эффект.

Если случится замыкание обмотки на корпус и ток утечки возрастет выше 5–10 мА (величине, опасной для жизни человека или животного), то вступает в работу блок 9 защитного отключения. Напряжение на инвертирующем входе триггера *DA1.2* станет больше, чем на неинвертирующем входе, отчего на выходе триггера появится отрицательный сигнал, транзистор *VT2* откроется и положительное напряжение поступит на вход элемента ИЛИ *I2* исполнительного органа *4* и на вход блока *7*. Это вызывает быстрый заряд конденсатора *C4*, переключение компаратора *DA1.4* и отключение транзистора *VT1* и реле *KV*, контакт *KV* которого разрывается в цепи датчика тока утечки. Одновременно переключается компаратор *DA1.3* и отключается оптотиристор *VV2* и симистор *VS3*. Электродвигатель нельзя включить в сеть. Для возврата схемы в исходное состояние нажимают кнопку «Сброс» *SB3*.

Таким образом, снабжение устройства блоком 9 защитного отключения обеспечивает электробезопасность и повышение надежности работы устройства.

Если в сети пропало напряжение в одной фазе, то на выходе блока 2 фильтра обратной последовательности возникает напряжение, достаточное для открытия диодистора *I0*, отчего светится диод *HL2*, открывается оптопара *VV1* и положительное напряжение поступает на вход элемента ИЛИ исполнительного блока *4*. С небольшой задержкой это напряжение поступает на компаратор *DA1.3*, отчего он переключается, на выходе появляется отрицательное напряжение и оптотиристор *VV2* и симистор *VS3* закрываются. Теперь электромагнитный пускатель *KM* и электродвигатель нельзя включить.

Если в сети случилось обратное чередование фаз, то напряжение на выходе блока 2 фильтра обратной последовательности увеличивается примерно в два раза, отчего пробиваются диодисторы *I1*, *I0*

и загораются светодиоды *HL1* и *HL2* «Обратное чередование фаз». Сработает оптопартиристор *VV1* и положительное напряжение поступит на вход элемента ИЛИ и переключится компаратор *DA1.3*, отчего на его выходе появится отрицательное напряжение и закроется тиристорная оптопара *VV2* и симистор *VS3*. Теперь электромагнитный пускатель *KM* и электродвигатель нельзя включить.

Устройство размещено в корпусе электромагнитного пускателя типа ПМЛ совместно с контакторами, электротепловым реле и двумя кнопками.

На данную разработку получен патент на полезную модель № 6082 Республики Беларусь [107].

Также было разработано устройство предпускового контроля сети и электродвигателя на базе микроконтроллера.

Микропроцессорное устройство предпускового контроля сети и электродвигателя конструктивно состоит из семи функциональных модулей (рисунок 5.20).

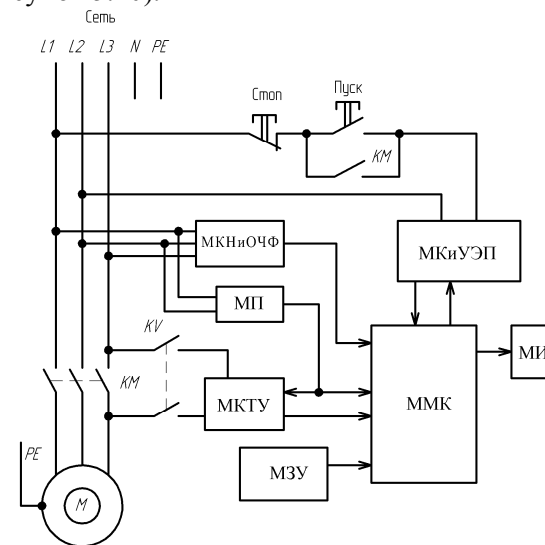


Рисунок 5.20 – Блок схема микропроцессорного устройства предпускового контроля сети и электродвигателя:

МКНиОЧФ – модуль контроля напряжений и обратного чередования фаз; МП – модуль питания; МКТУ – модуль контроля тока утечки; МКиУЭП – модуль контроля и управления электромагнитным пускателем; ММК – модуль микроконтроллера; МИ – модуль индикации; МЗУ – модуль задания уставок

Принципиальная электрическая схема микропроцессорного устройства предпускового контроля сети и электродвигателя изображена на рисунке 5.21.

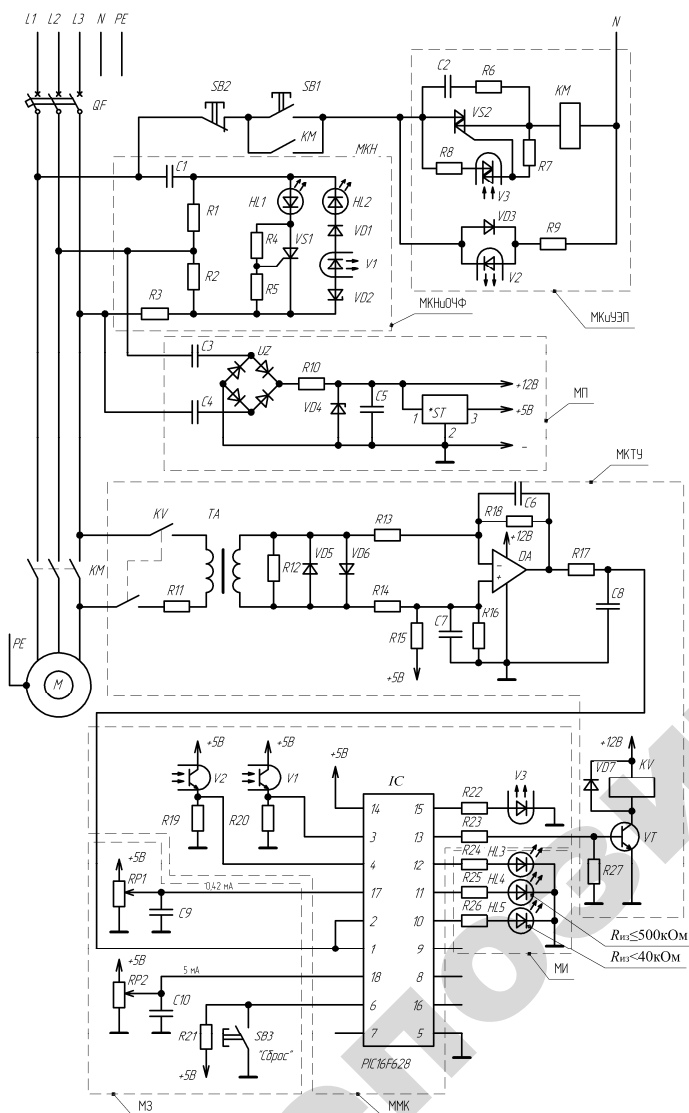


Рисунок 5.21 – Принципиальная электрическая схема микропроцессорного устройства предпускового контроля сети и электродвигателя

При разработке принципиальной электрической схемы устройства предпускового контроля основным критерием являлась стоимость аппарата. В нем не должно было быть дефицитных и дорогостоящих элементов. В устройстве использоваться простой, недорогой МК без АЦП, не имеющий цифрового индикатора.

При включении автоматического выключателя *QF* напряжение фаз подается на модуль контроля напряжения и обратного чередования фаз (МКНЮЧФ) сети и на модуль питания (МП), от которого получают питание модуль контроля тока утечки (МКТУ) и модуль микроконтроллера (МКМ). Включается светодиод *HL3*, сигнализируя о том, что устройство исправно и подключено к сети. Включается реле *KV* и его контакты замыкают цепь первичной обмотки трансформатора тока *ТА*. По цепи фаза *L3*, контакты *KV*, обмотка *ТА*, резистор *R11*, сопротивление изоляции обмотки и заземляющий проводник *PE* потечет ток утечки. Чем меньше сопротивление изоляции, тем больше ток утечки. При $R_{i3} = 500 \text{ кОм}$ ток утечки составляет примерно $0,44 \text{ мА}$. Эта величина тока утечки безопасна для людей и животных. Стандартные устройства защитного отключения (УЗО) реагируют на минимальный ток утечки $5\text{--}10 \text{ мА}$, что соответствует сопротивлению изоляции $40\text{--}22 \text{ кОм}$. Эта величина тока утечки безопасна для человека при быстром отключении цепи с помощью УЗО. Резистор *R11* составляет 22 кОм . Контроль тока утечки осуществляет модуль контроля тока утечки (МКТУ), содержащий усилитель переменного тока на операционном усилителе *DA*. С его выхода переменное напряжение поступает на входы *1* и *2* микроконтроллера *IC*. На этих входах находятся компараторы, порог срабатывания которых регулируется резисторами *RP1* (уровень тока утечки $0,42 \text{ мА}$) и *RP2* (уровень тока утечки 5 мА).

Если сопротивление изоляции обмотки станет менее 500 кОм , то напряжение на выходе *DA* станет больше порога срабатывания компаратора, подключенного к входу *2* внутри микроконтроллера *IC*. Переключение этого компаратора вызывает свечение светодиода *HL4*. Кроме этого, блокируется включение электродвигателя.

Если сопротивление изоляции обмотки уменьшится до 44 кОм и менее, то включается второй встроенный компаратор микроконтроллера *IC*, который отключает реле *KV* и становится на удержание его в отключенном состоянии. Контакты *KV* отключаются

в цепи тока утечки, загорается светодиод *HL5*. Электродвигатель нельзя включать в сеть. Для снятия этой блокировки нажимают кнопку *SB3* «Сброс».

При включении *QF* напряжение трех фаз подается на модуль МКН. На входе модуля находится фильтр напряжений обратной последовательности, состоящий из конденсатора *C1*, резисторов *R1–R3*. На выходе фильтра включены параллельно две цепочки. Первая цепочка состоит из светодиода *HL1*, тиристора *VS1* и двух резисторов *R4* и *R5*, вторая – из светодиода *HL2*, диода *VD1*, стабилитрона *VD2* и оптопары *V1*. В нормальном режиме работы напряжение на выходе фильтра обратной последовательности мало и светодиоды не светятся.

При обрыве фазы сети напряжение на выходе фильтра обратной последовательности возрастает. Пробивается стабилитрон *VD2* и загорается светодиод *HL2*. Включается оптопара *V1* и на вход 3 микроконтроллера поступает напряжение 5 В. Микроконтроллер блокирует включение электродвигателя. При обратном чередовании фаз напряжение на выходе фильтра обратной последовательности еще более возрастает, отчего включается тиристор *VS1* и загорается светодиод *HL1*. Кроме этого, загорается светодиод *HL2* и светодиод оптопары *V1*, отчего микроконтроллер снова блокирует включение электродвигателя.

Если изоляция обмотки исправна и сеть в норме, то можно включать электродвигатель, нажав на кнопку *SB1*. При этом потечет ток через оптопару *V2*, отчего на вход 4 микроконтроллера поступит напряжение. Микроконтроллер отключает реле *KV* (выход 13 микроконтроллера) и включает оптопару *V3* (выход 15 микроконтроллера). Выход этой оптопары включен в цепь управления тиристором *VS2*. Тиристор *VS2* включается и напряжение сети поступает на электромагнитный пускатель *KM*. Он включается и через силовые контакты *KM* электродвигатель запускается.

При нажатии на кнопку *SB2* «Стоп» отключаются оптопара *V2* и электромагнитный пускатель *KM*. Напряжение на входе 4 микроконтроллера пропадает, отчего он отключает оптопару *V3*. Через некоторую задержку времени (программируется больше времени торможения электропривода) включается выход 13 микроконтроллера и реле *KV*. Происходит контроль изоляции обмотки.

5.6. Защита асинхронных электродвигателей от импульсных перенапряжений

Для асинхронных трехфазных электродвигателей наибольшую опасность представляют импульсные перенапряжения.

Электродвигатели в большинстве случаев получают питание от низковольтных комплектных устройств (НКУ) внутренних кабельных электрических сетей зданий. В этих сетях уровень импульсных перенапряжений снижен применением кабелей и установкой УЗИП (устройств защиты от импульсных перенапряжений) на вводе и в распределительном пункте, или НКУ [108]. В этом случае установка отдельных УЗИП в местах подключения электродвигателей в электрическую кабельную сеть не требуется.

Однако встречаются исключения, например, при подключении электродвигателя погружной насосной установки артезианской скважины. В этом случае электрическая сеть представляет собой длинную воздушную линию, на конце которой находится естественный заземлитель низкого сопротивления в виде артезианской скважины. Эти условия благоприятны для «улавливания» воздушной линией импульсных перенапряжений от высоковольтных атмосферных разрядов молнии прямого и непрямого воздействия. Электродвигатель погружной насосной установки оказывается под действием импульсных перенапряжений. Исследования ученых Челябинского государственного агроинженерного университета (ЧГАУ) выявило тесную взаимосвязь между количеством отказов электродвигателей погружных скважинных насосов и грозовой деятельностью. Чем больше гроз в регион, тем больше аварий электродвигателей погружных насосов. Поэтому для защиты электродвигателей погружных насосов от импульсных перенапряжений требуется установка ограничителей перенапряжений нелинейных (ОПН) на концевой опоре воздушной линии, питающей их. Кроме этого, в низковольтном комплектном устройстве (НКУ) управления насосом требуется установить на вводе УЗИП [108].

Импульсные перенапряжения возникают также при коммутации цепей тока. В случае с электродвигателем импульсные перенапряжения возникают на обмотках электродвигателя при коммутации тока контактором, электромагнитным или тиристорными пускателями.

В диссертационной работе [109] исследованы импульсные перенапряжения, возникающие при коммутации цепи электродвигателя электромагнитными пускателями ПМЛ и ПМЕ.

В таблице 5.1 приведены результаты экспериментальных исследований коммутационных перенапряжений на обмотках электродвигателей [109].

Таблица 5.1 – Результаты экспериментальных исследований коммутационных перенапряжений на обмотках электродвигателей

Коммутационный процесс	Параметр асинхронного электродвигателя	Значение параметра при длине кабеля		
		4 м	25 м	80 м
Включение асинхронного электродвигателя	Максимальная кратность коммутационных перенапряжений, K_u	2,66	2,8	2,88
	Длительность переднего фронта импульса, мкс	0,01–1,2	0,2–1,2	0,8–1,8
	Длительность заднего фронта импульса, мкс	1–12	4,4–40,8	8,6–53,8
Отключение асинхронного электродвигателя	Максимальная кратность коммутационных перенапряжений, K_u	4,02	7,1	7,61
	Длительность переднего фронта импульса, мкс	1–12	5,4–23	8,4–43,2
	Длительность заднего фронта импульса, мкс	0,05–1,2	0,4–1,2	0,8–1,4

Установлено, что при включении электродвигателя одиночные импульсы перенапряжений имеют крутой передний фронт и медленно затухающий задний, или пилообразную форму с крутым передним фронтом. При отключении электродвигателя также наблюдаются импульсы перенапряжений двух видов: одиночные импульсы в форме свободного затухающего колебания; импульсы пилообразной формы с крутым задним фронтом. Установлено также, что импульсные коммутационные перенапряжения наибольшие при отключении и что на параметры импульсов оказывает влияние длина питающего электродвигатель кабеля: с увеличением длины кабеля кратность перенапряжения ($K_u = U_{\text{имп}} / U_{\text{ном}}$) увеличивается.

Частота свободных колебаний импульсов перенапряжения – от 20 кГц при длине кабеля 4 м до 4,4 кГц при длине кабеля 80 м.

Для защиты от импульсных коммутационных перенапряжений автор диссертационной работы [109] рекомендует устройство, электрическая схема которого изображена на рисунке 5.22.

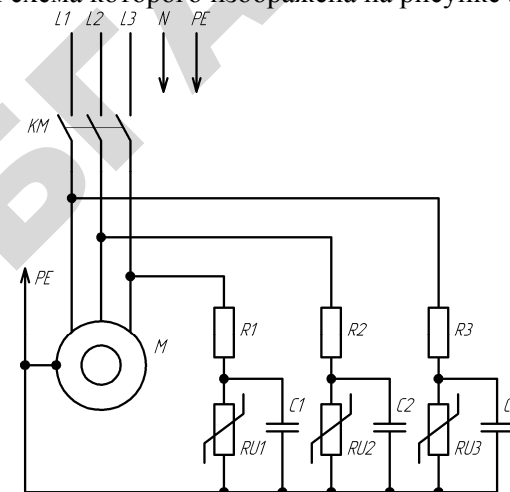


Рисунок 5.22 – Принципиальная электрическая схема устройства для защиты обмоток асинхронного электродвигателя от импульсных коммутационных перенапряжений

В каждую фазу включается R-С цепочка, а параллельно конденсатору – варистор. В этом случае скорость нарастания перенапряжений ограничивается конденсатором, а требуемое ограничение амплитуды импульсов обеспечивается варистором. Емкость конденсаторов – 0,025–0,05 мкФ, сопротивление резисторов – 50–120 Ом. Варисторы типа СН2-16 на 360 В рекомендуется использовать с конденсатором емкостью 0,025 мкФ, а варисторы СН2-16 на 560 В – с конденсатором емкостью 0,05 мкФ и с сопротивлением резистора 82 Ом.

5.7. Контрольные вопросы

1. От каких параметров зависит количество влаги, накапливающейся в полости электродвигателя во время технологической паузы?

2. Как изменяется сопротивление изоляции после включения электродвигателя?

3. Объясните понятия «изоляция испытывает тепловой удар», «изоляция распаривается».

4. Какими средствами осуществляется контроль сопротивления изоляции во время работы электродвигателя?

5. Какими средствами осуществляется контроль сопротивления изоляции во время технологической паузы?

6. Объясните работу схемы, изображенной на рисунке 5.7.

7. Объясните работу схемы, изображенной на рисунке 5.8.

8. Назовите пять способов защиты обмотки электродвигателя от увлажнения во время технологической паузы.

9. Объясните использование электроосмоса для защиты обмотки электродвигателя от увлажнения.

10. Какие три недостатка свойственны электроосмосу при использовании его для защиты обмоток электродвигателя от увлажнения?

11. Объясните способ защиты обмоток от увлажнения, основанный на сушке изоляционных материалов в переменном электрическом поле.

12. Объясните способ защиты обмоток от увлажнения, основанный на поддержании температуры обмотки выше температуры окружающей среды на 5–7 °С.

13. Объясните работу схемы, изображенной на рисунке 5.16 б.

14. Объясните работу схемы, изображенной на рисунке 5.16 в.

15. Объясните работу схемы, изображенной на рисунке 5.16 г.

16. Объясните работу схемы, изображенной на рисунке 5.17.

17. Объясните работу схемы, изображенной на рисунке 5.21.

18. Объясните работу схемы, изображенной на рисунке 5.22.

19. Нарисуйте схему устройства для защиты обмоток асинхронных электродвигателей от импульсных коммутационных перенапряжений.

20. Какие блоки должно содержать устройство предпускового контроля изоляции электродвигателя?

Глава 6. КОМПЛЕКСНАЯ ЗАЩИТА АСИНХРОННЫХ ТРЕХФАЗНЫХ ЭЛЕКТРОДВИГАТЕЛЕЙ

6.1. Выбор основного параметра асинхронного трехфазного электродвигателя для построения комплексной и универсальной защиты

К устройствам защиты электродвигателей в сельском хозяйстве предъявляются следующие требования:

1) комплексность, т. е. способность защищать электродвигатель комплексно, во многих аварийных состояниях и режимах;

2) универсальность, т. е. возможность применяться в одном габарите для многих электродвигателей по мощности, например, имеющих номинальные токи от 5 до 25 А;

3) модульность, т. е. устройство должно состоять из основного и дополнительных функциональных модулей защиты, контролирующих определенное аварийное состояние электродвигателя. Изъятие из устройства определенного модуля защиты не должно нарушать функционирование других модулей. Это позволяет, во-первых, выбирать модули защиты в зависимости от аварийных состояний электродвигателя на данной рабочей машине; во-вторых, повысить ремонтпригодность устройства защиты. Требование модульности устройства актуально для сложных электронных защит. Для простых защитных устройств низкой стоимости принцип модульности мало приемлем, поскольку требует применения разъемов для модулей. Разъемы уменьшают надежность и увеличивают стоимость устройства;

4) перед пуском электродвигателя устройство защиты должно определять наличие и уровень трехфазного сетевого напряжения, порядок чередования фаз сети;

5) перед пуском электродвигателя устройство защиты должно определять состояние изоляции электродвигателя;

6) наличие индикации о причине аварийного отключения;

7) степень защиты устройства должна быть IP65 при индивидуальном монтаже и IP31 – при монтаже в оболочке комплектного низковольтного устройства со степенью защиты IP54.

Анализ изменения параметров асинхронного электродвигателя (АД) в аварийных режимах показал, что контролем одного параметра невозможно обеспечить полную защиту электродвигателя от всех аварийных режимов и состояний [110]. Такой же вывод находим в работах [1, 86].

Возможность контроля аварийных состояний через параметры электродвигателя представлена в таблице 6.1.

Таблица 6.1 – Возможность контроля аварийных состояний трехфазного асинхронного электродвигателя

Но- мер	Аварийное состояние или режим работы	Параметр контроля*									
		U , В	I , А	P_1 , Вт	θ^{**} , °С	γ , град	$\cos\varphi$, о. е.	ΔQ , Дж	$R_{из}$, кОм	$\Phi_{рас}$, В·с	δ , м/с ²
1	Неполнофазное пита- ние перед включением и обратное чередова- ние фаз	+	-	-	-	⊕	-	-	-	-	-
	Неполнофазное пита- ние при работе	±	⊕	±	+	+	-	±	-	±	-
2	Перегрузка технологи- ческая спокойная	-	+	+	+	-	±	⊕	-	±	-
	То же (пульсирующая)	-	+	+	⊕	-	±	+	-	±	-
3	Стопорный режим	-	⊕	±	±	-	±	±	-	+	-
4	Отклонение напряже- ния выше нормы ***	⊕	±	±	±	-	±	±	-	±	-
5	Асимметрия напряже- ния выше нормы	+	⊕	±	+	±	±	±	-	±	±
6	Увлажнение обмотки	-	-	-	-	-	-	-	⊕	-	-
7	Износ подшипников	-	±	±	+	-	-	-	-	±	⊕
8	Вибрация электродви- гателя выше нормы	-	-	-	-	-	-	-	-	-	⊕
9	Нарушение охлаждения	-	-	-	⊕	-	-	-	-	-	-
10	Частые пуски	-	±	±	⊕	-	-	±	-	±	-

Примечания.
 Обозначения: “+” – возможен контроль; “±” – ограничен контроль (при некото-
 рых условиях возможен); “-” – не возможен контроль; ⊕ – наиболее приемлемый
 параметр контроля;
 * Параметры контроля следующие: U – напряжение, В; I – ток, А; P_1 – потребляе-
 мая мощность, Вт; θ – температура, °С; γ – фазовый угол между напряжениями, град;
 $\cos\varphi$ – коэффициент мощности, о. е.; ΔQ – количество тепла в тепловом реле, Дж; $R_{из}$ –
 состояние изоляции, кОм; $\Phi_{рас}$ – магнитное поле рассеяния обмотки статора, В·с; δ –
 виброускорение, м/с².
 ** При использовании позисторов СТ14 (при использовании менее инерционных
 термодетекторов, например термопар, температура – наиболее приемлемый параметр
 контроля).
 *** Отклонение напряжения опасно только при увеличении тока выше номиналь-
 ного значения.

Из таблицы 6.1 следует:

1) контроль наибольшего числа аварийных режимов обеспечивают ток и температура;

2) состояние изоляции обмотки можно контролировать только отдельной защитой по ее сопротивлению. Этот же параметр контроля рекомендуется в ПУЭ;

3) виброускорение (m/c^2) электродвигателя можно контролировать только с помощью датчика вибрации. Этот датчик косвенно контролирует также износ подшипников;

4) нарушение охлаждения электродвигателя и частые пуски можно контролировать только температурной защитой.

Таким образом, в основу построения комплексной модульной защиты должен быть положен модуль контроля тока. Такая защита должна быть трех уровней сложности [110].

Для рабочих машин со спокойным графиком нагрузки, работающих в продолжительном режиме (вентиляторы, насосы и т. п.) достаточно применение первого уровня комплексной защиты. Он включает в себя модуль контроля трех линейных токов, позволяющий контролировать пусковые токи и токи при заторможенном роторе, токи перегрузки и недогрузки (холостого хода рабочей машины). Этот модуль должен быть обязательно дополнен следующими модулями:

- 1) предпускового контроля неполнофазного режима питающей сети;
- 2) предпускового контроля обратного чередования фаз;
- 3) предпускового контроля сопротивления изоляции (рисунок 6.1, а).

В более сложной комплексной защите второго уровня (при пульсирующих нагрузках на валу, кратковременных или повторно-кратковременных режимах работы, при частых пусках, при возможности нарушения охлаждения электродвигателя) используются модули первого уровня защиты и добавляется к ним модуль контроля температуры обмотки электродвигателя. Дополнительно рекомендуется использовать модуль контроля тока утечки во время работы электродвигателя на базе дифференциального трансформатора тока (контроль замыкания на землю) и модуль защиты от коммутационных перенапряжений. Это позволяет построить полную защиту обмотки (электрической части) электродвигателя (рисунок 6.1, б).

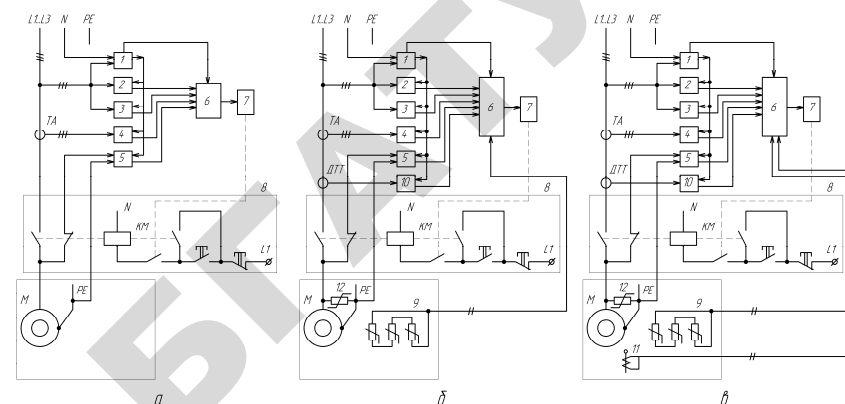


Рисунок 6.1 – Структурные схемы комплексной универсальной токовой защиты первого уровня сложности (а), второго уровня сложности (б) и третьего уровня сложности (в): 1 – блок питания; 2 – модуль контроля обратного чередования фаз; 3 – модуль контроля неполнофазного режима; 4 – модуль контроля тока; 5 – модуль контроля сопротивления изоляции; 6 – микропроцессорный блок; 7 – исполнительный орган; 8 – блок коммутации; 9 – термодетектор; 10 – модуль контроля тока утечки при работающем электродвигателе; 11 – датчик вибрации; 12 – блок защиты от импульсных коммуникационных перенапряжений; ТА – датчик тока; ДТТ – дифференциальный трансформатор тока

Комплексная защита третьего уровня дополнительно к модулям второго уровня защиты контролирует механическую часть электродвигателя (вибрацию подшипникового щита и износ подшипников) и имеет модуль контроля вибрации (рисунок 6.1, в).

В соответствии с принципом модульности, каждый модуль защиты может быть исключен из работы без нарушения работоспособности других модулей.

В отдельных случаях комплексные защиты указанных уровней могут иметь дополнительные модули, обусловленные особенностями использования электродвигателя на данной рабочей машине, особенностями управления и автоматизации защищаемого электродвигателя.

Дополнительные модули могут быть следующие:

- 1) защиты обмоток от увлажнения во время технологических пауз;
- 2) сушки обмоток во время технологических пауз;

3) внешнего управления от технологических датчиков;
4) коммутации (при переключениях «звезда – треугольник» в силовой цепи);

5) интерфейса связи с ПЭВМ высшего уровня или с пультом управления.

• Комплексные защиты могут быть построены также на базе модуля контроля температуры, имеющего быстродействующие термодетекторы (см. главу 4). В этом случае температурная защита имеет преимущества перед токовой защитой во всех аварийных состояниях и режимах работы, приведенных в таблице 6.1.

Кроме этого, громадным преимуществом температурной защиты является то, что в одном габарите (устройстве) она способна защищать электродвигатели всех мощностей. Комплексная защита асинхронного двигателя на базе температурной защиты должна иметь дополнительно блок контроля сопротивления изоляции обмоток электродвигателя (это позволит не включать в сеть АД с низким значением сопротивления изоляции) и блок контроля трехфазного напряжения перед пуском АД (чтобы не запускать его на заведомо неполнофазную сеть и при обратном чередовании фаз). Такая защита может иметь дополнительные блоки, указанные выше.

6.2. Простейшая комплексная защита асинхронного электродвигателя

Простейшая комплексная защита электродвигателя строится из отдельных элементов, выполняющих определенные функции защиты. Примером может служить комплексная защита, предложенная ранее Саратовским институтом механизации сельского хозяйства (в настоящее время – Саратовский государственный аграрный университет имени Н. И. Вавилова).

Защита электрических цепей электродвигателя от токов $K3$ осуществляется автоматическим выключателем QF , имеющим электромагнитный расцепитель максимального тока (рисунок 6.2).

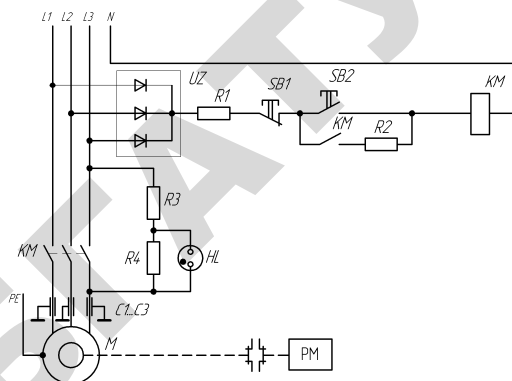


Рисунок 6.2 – Принципиальная электрическая схема простейшей комплексной защиты асинхронного электродвигателя

Защита электродвигателя от перегрузок осуществляется тепловыми расцепителями автоматического выключателя, имеющего регулируемую уставку. Использование электротеплового токового биметаллического реле было бы лучшим решением.

Защита электродвигателя от работы на двух фазах осуществляется простейшим способом с контролем выпрямленного напряжения фаз. Для этого используется выпрямитель UZ , резисторы $R1$ и $R2$. Описание работы такого узла изложено в параграфе 2.2. Использование фильтра напряжений обратной последовательности было бы лучшим решением. С помощью фильтра напряжений обратной последовательности можно дополнительно контролировать уровень допустимой асимметрии напряжений и порядок чередования фаз.

Защита обмоток статора от импульсных коммутационных перенапряжений осуществляется с помощью проходных конденсаторов $C1-C3$. Проходные конденсаторы выбираются по величине пропускаемого тока, а ток зависит от мощности электродвигателя. Поэтому с изменением мощности электродвигателя требуется изменять тип проходных конденсаторов. Использование блока защиты от импульсных перенапряжений (параграф 5.6) было бы лучшим решением.

Сигнализация об уровне сопротивления изоляции обмоток статора обеспечивается цепочкой $R3, R4$ и неоновой лампой HL . О работе такой цепи рассказано в параграфе 5.2. Она не обеспечивает автоматического отключения электродвигателя от сети.

Защита от стопорного режима электродвигателя, возникающего при заклинивании рабочей машины, осуществляется механическим путем, с помощью калиброванной шпонки предохранительной муфты. В стопорном режиме шпонка срезается. Электродвигатель вращается, а рабочая машина останавливается. Для работы рабочей машины требуется снять муфту и установить новую калиброванную шпонку. Это вызывает затраты времени и неудобства в работе.

Современные комплексные защиты бывают электронные и микропроцессорные.

6.3. Комплексные электронные устройства защиты асинхронных электродвигателей

Комплексные электронные устройства защищают электродвигатель от двух и более аварийных состояний. К ним относятся устройства защиты, указанные в таблице 6.2.

Таблица 6.2 – Характеристика электронных токовых комплексных универсальных устройств защиты асинхронного электродвигателя [110]

Марка защитного устройства, страна-изготовитель	Защищаемые аварийные состояния АД	Примечания
1	2	3
СиЭЗ-4А, СиЭЗ-8-25 и СиЭЗ-20-80, Беларусь, НПП «БИНАР», г. Витебск	Неполнофазный режим, стопорный режим, перегрузка,	На токи 0,2–8 А, 8–25 А, 20–80 А. Питание – от токовых цепей защищаемого электродвигателя. Контролируются токи трех фаз. Задание уставки тока – потенциометром при работающем электродвигателе. При необходимости включаются позисторы СТ14-1. Степень защиты IP40. Рабочая температура – от –40 до +55 °С

Продолжение таблицы 6.2

1	2	3
РЗД-3М, Россия, ОАО «ВНИИР», г. Чебоксары	Неполнофазный режим, стопорный режим, перегрузка	На ток от 2,5 до 800 А (с трансформаторами тока). Контролируются токи трех фаз. Питание – от токовых цепей защищаемого электродвигателя. Задание уставки тока – потенциометром при работающем двигателе. Степень защиты IP40
АЗД, Украина, г. Донецк	Неполнофазный режим, стопорный режим, перегрузка	На токи от 50 до 2500 А (с трансформаторами тока). Контролируется ток двух или трех фаз. Питание – от токовых цепей защищаемого электродвигателя. Задание уставки тока – потенциометром. Степень защиты IP40
ЗРВ10, Германия, «Siemens»	Неполнофазный режим, стопорный режим, Перегрузка с характеристиками класса 5, 15, 25	Питание – от токовых цепей защищаемого электродвигателя. Токи до 100 А. Встроенные трансформаторы тока. Контролируются токи трех фаз. Используется специальная схема ASIC – электронный аналог теплового биметаллического реле, имеющая тепловую память. Уставка тока задается по шкале до включения электродвигателя. Степень защиты IP31
РЗД-1, Россия, ОАО «ВНИИР», г. Чебоксары	Неполнофазный режим, перегрузка, контроль изоляции перед пуском	На ток до 100 А со встроенными трансформаторами тока. При токе более 100 А – с внешними трансформаторами тока. Контролируются токи двух фаз. Задание уставки тока путем набора комбинации фиксированных дискретных уставок в двоичном коде. Степень защиты IP30. Интервал рабочих температур – от минус 40 до плюс 55 °С

Продолжение таблицы 6.2

1	2	3
РЭЗЭ-6, ООО «Тетра Ltd», Украина, г. Харьков	Перегрузка, неполнофазный режим, перегрев обмотки, контроль минимальной нагрузки (сухохода погрузных электродвигателей), контроль изоляции перед пуском	На токи от 1 до 625 А в 4-х диапазонах: 1–5 А; 5–25 А; 25–125 А; 125–625 А. Специальные датчики тока 4-х типоразмеров. Контролируются токи двух фаз. Термодетектор – интегральная микросхема КТ1019СТ1. Задание уставки тока – потенциометром при работающем двигателе с использованием токоизмерительных клещей и вольтметра с пределом измерения 2 В. Степень защиты IP30. Для защиты электродвигателей мощностью до 3 кВт используется реле РЭЗЭ-7
БТ31-1У, Россия, ОАО «Рикор Электроникс» (Арзамасский завод радиодеталей)	Неполнофазный, перегрузка, обратное чередование фаз, контроль изоляции перед пуском	На токи 0,7–600 А. Используются специальные датчики тока накладного типа. В дежурном (отключенном) положении контролируется $R_{из}$ и наличие напряжения по фазам, производится профилактическая сушка обмоток электродвигателя. Контролируются токи трех фаз. Задание уставки тока – потенциометром при работающем двигателе с использованием токоизмерительных клещей и вольтметра. Степень защиты IP31

Окончание таблицы 6.2

1	2	3
УЗ-ЭД, Россия, ОАО «Старорус-прибор», г. Старая Русса Новгородской обл.	Предпусковой контроль сопротивления изоляции, перегрузка, неполнофазный режим, асимметрия токов	На токи от 2 до 165 А с шагом 1 А, от 20 до 680 А с шагом 4 А, от 5 до 37,4 А с шагом 0,2 А. Задание уставки тока осуществляется с помощью переключателей ВДМ. Контроль тока двух фаз. Диапазон уставок времени срабатывания при токе $1,3 I_n$ составляет от 2 до 15 с, с шагом 1 с. Имеется выдержка времени на повторный пуск. Переключение «звезда–треугольник». Степень защиты IP40
УЗОТЭ-2У, Россия, ОАО «ОВЕН», Москва	Неполнофазный режим, перегрузка, контроль температуры, изоляция перед пуском	Мощность защищаемых электродвигателей от 1,5 до 160 кВт. Контролируются токи трех фаз. Уставка тока задается по шкале с помощью потенциометра. Контролируется температура корпуса электродвигателя

К комплексным электронным устройствам защиты электродвигателей относятся также некоторые устройства защиты, описанные ранее, например, УВТЗ-5М, ФУЗ-М, ЕЛ-10, ФЕ2000.

Из таблицы 6.2 можно сделать следующие выводы:

- 1) комплексные универсальные электронные защиты различных производителей являются токовыми;
- 2) наиболее простые комплексные универсальные электронные защиты имеют проходные датчики тока (устройства СиЭЗ, РЗД-3М, АЗД, ЗРВ10). Они защищают асинхронные электродвигатели в неполнофазном режиме, при перегрузке и в стопорном режиме. Питание их электронных схем организовано от токовых цепей защищаемого электродвигателя. Они имеют 3 недостатка:
 - позволяют включать электродвигатель на заведомо неполнофазную сеть;
 - позволяют включать электродвигатель без проверки сопротивления изоляции обмотки перед пуском;
 - имеют неточную настройку номинального тока.

3) большие функциональные возможности имеют токовые электронные реле в сочетании с температурной защитой (СиЭЗ, РЭЗЭ-6, УЗОТЭ-2У, в некоторых исполнениях РЗД-1) и устройства защиты, контролирующие сопротивление изоляции перед пуском электродвигателя (РЭЗЭ-6, БТЗ1-1У, УЗ-ЭД, УЗОТЭ-2У, РЗД-1).

• **Устройство защиты электродвигателей электронное СиЭЗ-4А** предназначено для защиты электродвигателей с номинальным (рабочим) током в диапазоне 0,2–8 А (ориентировочной мощностью от 0,1 до 3 кВт) при следующих аварийных режимах:

- обрыв фазы;
- перегрузка;
- заклинивание ротора электродвигателя.

Мощность, потребляемая устройством от сети, составляет не более 3ВА. Устройство обеспечивает электронную настройку защиты на рабочий ток в цепи питания электродвигателя при его работе в номинальном (штатном) режиме. Режимы работы и перегрузок отслеживаются с помощью светодиодного индикатора.

Устройство защиты СиЭЗ-4А производит отключение электродвигателя за 40 с при кратности тока перегрузки 1,3; за 15с – при кратности тока перегрузки 1,5; за 12 с – при кратности тока перегрузки 2; за 6 с – при кратности тока перегрузки 2,5; за 5 с – при кратности тока перегрузки 3,5; за 4 с – при кратности тока перегрузки 4; за 3 с – при кратности тока перегрузки 5. При обрыве любого из фазных проводов или перекосе фазных токов отключение электродвигателя происходит за 2 с. При КЗ – время срабатывания устройства составляет не более 0,1 с.

Габаритные размеры – не более 90×70×65 мм. Масса – не более 0,4 кг.

Общий вид устройства защиты электродвигателей СиЭЗ-4А изображен на рисунке 6.3 [111].



Рисунок 6.3 – Общий вид устройства защиты электродвигателей СиЭЗ-4А

Принципиальная электрическая схема включения устройства защиты СиЭЗ-4А изображена на рисунке 6.4.

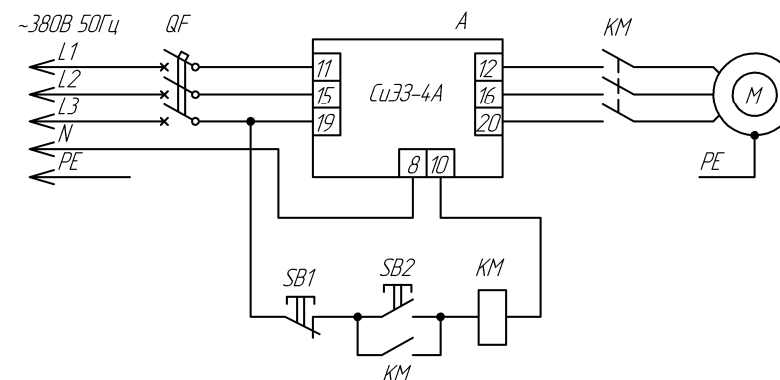


Рисунок 6.4 – Принципиальная электрическая схема включения аппарата защиты СиЭЗ-4А

Для вхождения защиты СиЭЗ-4А в режим настройки необходимо при нажатой кнопке «Настройка» на передней панели устройства подать электропитание на него, включив автоматический выключатель. Индикатор «Настройка» будет светиться желтым мигающим светом, сигнализируя о вхождении защиты СиЭЗ-4А в режим настройки.

Далее необходимо включить электродвигатель в рабочем (штатном) режиме. После выхода электродвигателя на установившийся режим работы нажать кнопку «Настройка» на передней панели СиЭЗ-4А и удерживать ее до момента, пока индикатор «Настройка» на передней панели не засветится зеленым цветом.

Если индикатор «Настройка» засветится красным цветом, то это показывает, что настройка устройства защиты СиЭЗ-4А не произошла, так как значение тока, протекающего по цепи питания электродвигателя, не попало в рабочий диапазон защиты СиЭЗ-4А. В этом случае необходимо измерить значение рабочего тока и сравнить его с номинальным диапазоном токов защиты СиЭЗ-4А. Свечение индикатора зеленым цветом означает, что защита СиЭЗ-4А настроена на рабочий ток электродвигателя. После этого необходимо отключить питание устройства СиЭЗ-4А. Теперь устройство СиЭЗ-4А запомнило настройки и готово к работе. При последующем включении устройство СиЭЗ-4А будет обеспечивать защиту электродвигателя в соответствии с параметрами последней настройки. О работе двигателя в пределах настроенного режима свидетельствует постоянное свечение зеленым цветом индикатора «Настройка».

Свечение индикатора «Настройка» СиЭЗ-4А зеленым цветом означает, что среднее значение тока (по трем фазам) в цепи электродвигателя находится в диапазоне $\pm 20\%$ от значения тока, на которое было настроено устройство СиЭЗ-4А. Отсутствие свечения индикатора означает, что ток в цепи электродвигателя ниже уровня $0,8 I_{настр}$. Мигание индикатора зеленым цветом означает, что ток в цепи электродвигателя выше $1,2 I_{настр}$.

При превышении тока в цепи питания электродвигателя выше значения аварийного уровня срабатывания защиты индикатор устройства часто мигает красным цветом, сигнализируя о превышении аварийного порога тока. Начинается отсчет времени аварийного отключения электродвигателя.

После аварийного отключения электродвигателя по причине перегрузки красный индикатор горит непрерывно. После ава-

рийного отключения электродвигателя по причине обрыва фазы красный индикатор мигает редко (период мигания – 2 с), а по причине КЗ – мигает часто (период мигания – 0,3 с).

При возникновении аварийной ситуации СиЭЗ-4А отключает электродвигатель, на передней панели устройства загорается индикация «Настройка» и защита СиЭЗ-4А входит в режим самоблокировки. После возникновения аварии необходимо устранить причину аварии и затем повторно включить электродвигатель. Для повторного запуска необходимо отключить электропитание устройства СиЭЗ-4А. После отключения электропитания произойдет разблокировка устройства СиЭЗ-4А. При последующей подаче питания устройство готово к работе.

• **Устройства защиты бесконтактные электронные СиЭЗ-8-25 и СиЭЗ-20-80** предназначены для защиты трехфазных асинхронных электродвигателей при следующих аварийных режимах [111]:

обрыв любой из фаз;

увеличение тока двигателя сверх номинального (рабочего) значения вследствие электрических или технологических перегрузок;

затормаживание (заклинивание) ротора электродвигателя.

Устройства защиты СиЭЗ-8-25 рассчитаны на ток 8–25 А, а СиЭЗ-20-80 – на ток 20–80 А.

Особенностями устройств защиты СиЭЗ-8-25 и СиЭЗ-20-80 являются питание их от токовых цепей защищаемого электродвигателя и отсутствие выходного реле (включение и выключение катушки пускателя производится встроенным тиристором). Режим перегрузки отслеживается по оптическому индикатору при превышении уставки тока электродвигателя в 1,5 раза.

Общий вид устройств защиты СиЭЗ-8-25 и СиЭЗ-20-80 изображен на рисунке 6.5.



Рисунок 6.5 – Общий вид устройства защиты СиЭЗ-8-25 и СиЭЗ-20-80

Настройка прибора производится следующим способом. Выкручивают пробку, находящуюся в верхней части корпуса, которая закрывает доступ к подстроечному резистору $R1$, служащему регулятором настройки системы на номинальный (рабочий) ток электродвигателя. Регулятор должен находиться в крайнем левом положении. Включить электродвигатель без подключения цепи управления магнитным пускателем.

После включения электродвигателя и перехода его в рабочий режим необходимо с помощью отвертки с изолированной ручкой вращать регулятор настройки $R1$ по ходу часовой стрелки до момента включения оптического индикатора (зеленое свечение), находящегося в верхней части корпуса.

Принципиальная электрическая схема включения СиЭЗ-8-25 (СиЭЗ-20-80) в цепь управления реверсивного электромагнитного пускателя приведена на рисунке 6.6.

После включения оптического индикатора вращать регулятор настройки более 2-х полных оборотов не допускается во избежание ухода характеристик за пределы допусков. Регулятор имеет 60 полных оборотов.

Начинать настройку необходимо после выведения регулятора настройки в крайнее левое положение.

Режимы работы двигателя отслеживаются по светодиодному индикатору:

- если электродвигатель работает в номинальном (рабочем) режиме, свечение индикатора – зеленое;
- при увеличении тока электродвигателя в 1,5 раза от номинального свечение индикатора будет оранжевое, свыше 3,5 раз – красное.

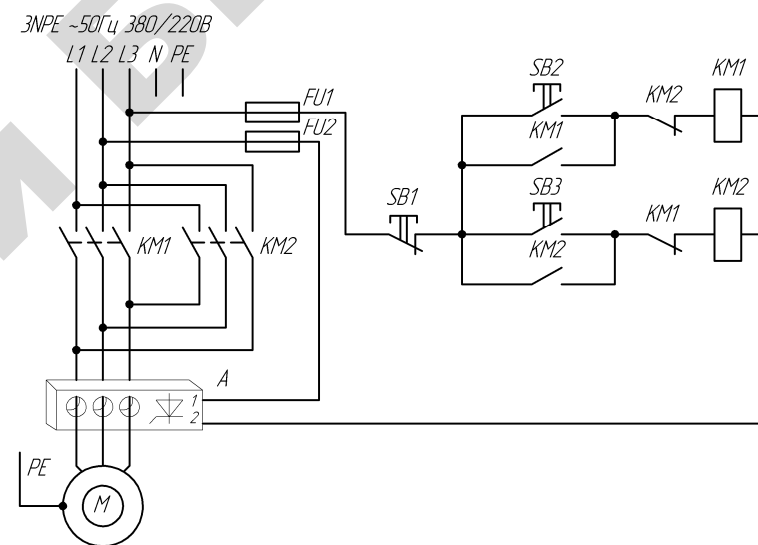


Рисунок 6.6 – Принципиальная электрическая схема включения устройства защиты СиЭЗ-8-25 (СиЭЗ-20-80) в цепь управления реверсивного электромагнитного пускателя:
А – устройство СиЭЗ-8-25 (СиЭЗ-20-80)

В процессе эксплуатации устройство защиты СиЭЗ может быть перенастроено не более 200 раз.

При перегрузке электродвигателя током до значения $1,5 I_{уст}$ устройство защиты СиЭЗ-8-25 (СиЭЗ-20-80) не реагирует. В этом состоит недостаток устройства.

При срабатывании системы в цепях автоматики, где пуск осуществляется электроконтактным манометром или аналогичными устройствами, цепь катушки магнитного пускателя с по-

следовательно соединенной системой защиты СиЭЗ после отключения электродвигателя остается под напряжением. При этом осуществляется блокировка включения системы. Индикатор светится красным светом. При полном снятии напряжения с цепи управления происходит установка системы в рабочий режим.

Если номинальный рабочий ток двигателя менее 8 А, то силовой провод пропускается через отверстие в корпусе несколько раз с тем, чтобы суммарный ток, проходящий через полученные витки силового проводника, был не менее 8 А. Требуемое количество витков N определяется по формуле: $N \geq 8/I_n$.

Функция контроля температуры реализуется при подключении к клеммам 3 и 4 устройства защиты СиЭЗ цепи датчика температуры, состоящего из 3-х последовательно включенных позисторов СТ14-1, встроенных в статорную обмотку.

При исключении датчиков температуры к клеммам 3 и 4 устройства защиты СиЭЗ необходимо подключить резистор типа МЛТ, имеющий сопротивление $R = 220\text{--}390$ Ом (мощность 0,5–2 Вт).

Отключение электродвигателя по сигналу от позисторов происходит при достижении температуры статорной обмотки не более $1,1T_{\text{кл}}$, где $T_{\text{кл}} = 105$ °С – классификационная температура позистора.

В системе предусмотрена возможность ввести режим электронной блокировки повторных пусков электродвигателя после срабатывания защиты, до устранения неисправности. Схема реализуется путем шунтирования последовательной RC-цепочкой цепи управления катушкой электромагнитного пускателя. Возврат системы в рабочий режим производится при полном снятии напряжения с цепи управления электромагнитным пускателем.

• **Реле защиты двигателей РЗД-3М** защищает в аварийных состояниях, указанных в таблице 6.2.

Общий вид реле РЗД-3М изображен на рисунке 6.7 [112].



Рисунок 6.7 – Общий вид реле защиты РЗД-3М асинхронных электродвигателей

На рисунке 6.8 изображены принципиальные электрические схемы включения реле РЗД-3М.

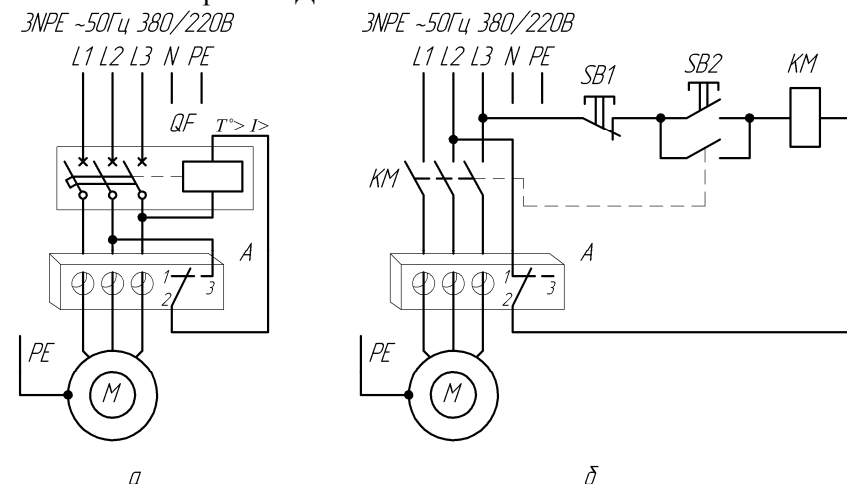


Рисунок 6.8 – Принципиальная электрическая схема включения реле защиты электродвигателя типа РЗД-3М с автоматическим выключателем (а) и электромагнитным пускателем (б): А – устройство защиты РЗД-3М

На лицевой стороне корпуса расположен потенциометр для регулирования номинального тока. На ручке потенциометра установлен колпачок, на который нанесена риска для ориентировки относительно шкалы. Шкала в пределах диапазона регулирования тока линейная.

На рисунке 6.9 представлена типовая характеристика срабатывания реле защиты РЗД-3М.

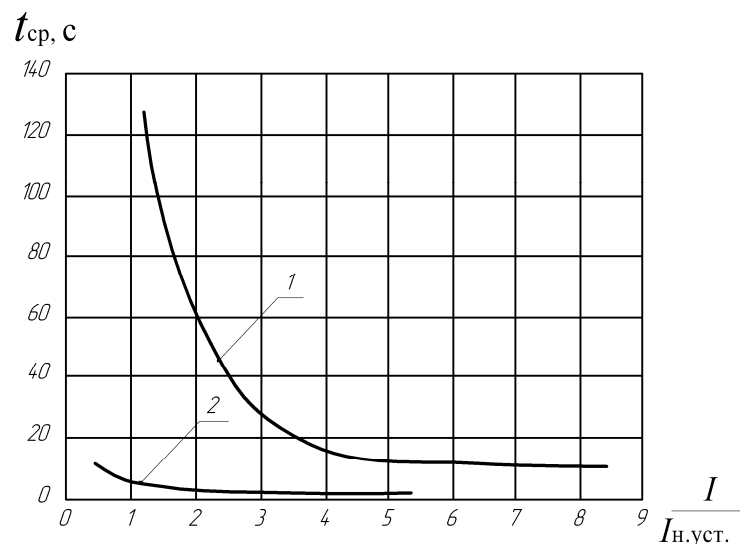


Рисунок 6.9 – Типовые характеристики срабатывания реле защиты двигателей РЗД-3М: 1 – перегрузка по току; 2 – неполнофазный режим

В зависимости от номинальных токов реле защиты РЗД-3М имеет 4 типоисполнения.

Рабочая температура окружающей среды – от -40 до $+50$ °С. Габаритные размеры – не более $160 \times 135 \times 90$ мм. Масса – не более 1,1 кг.

• **Аппарат защиты электродвигателей АЗД** обеспечивает выполнение функций, указанных в таблице 6.2 [113].

Аппараты защиты АЗД выпускаются нескольких исполнений, без пульта управления и с пультом управления. В последних конструкциях используются 3 датчика тока. Есть исполнения, когда 1 пульт связан с несколькими аппаратами защиты. Простейший аппарат защиты АЗД имеет вид, изображенный на рисунке 6.10.



Рисунок 6.10 – Общий вид аппарата защиты электродвигателя АЗД

Общий вид аппарата защиты электродвигателей АЗД 5 и блока индикации БИ 5 изображен на рисунке 6.11.



Рисунок 6.11 – Общий вид аппарата защиты электродвигателей АЗД5 и блока индикации БИ5

Для защиты электродвигателей насосов используется аппарат защиты АЗД5. Он обеспечивает дополнительно следующие функции:

- защиту от холостого хода электродвигателя (потери производительности или «сухого хода» насоса, проскальзывания соединительных муфт и т. п.);

- индикацию технологических и экстренных перегрузок электродвигателя;
- индикацию работы электродвигателя в режиме потери производительности.

Изменение тока при пуске асинхронного электродвигателя и характеристики различных защит аппарата АЗД5 приведены на рисунке 6.12.

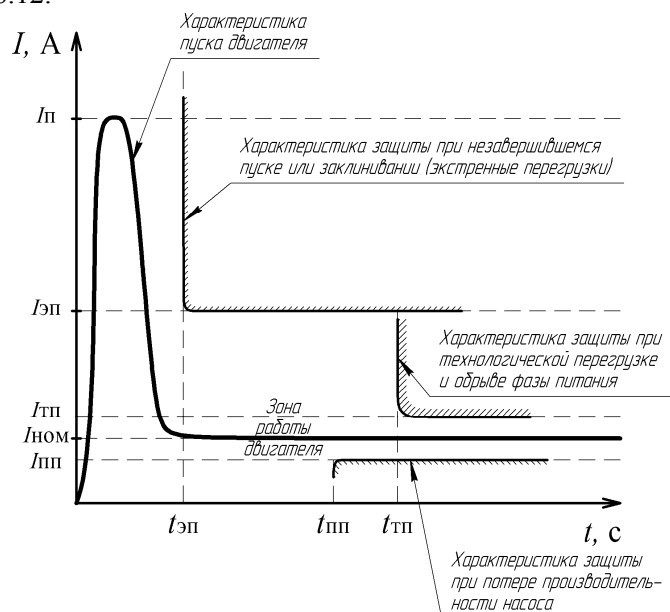


Рисунок 6.12 – Изменение тока при пуске асинхронного электродвигателя и характеристики трех защит аппарата АЗД5

Из рисунка 6.12 следует, что у аппарата защиты электродвигателей АЗД5 имеются три уставки тока и три уставки времени. Току срабатывания защиты при незавершенном пуске и заклинивании электродвигателя (току экстренной перегрузки) $I_{эп}$ соответствует уставка выдержки времени при отстройке от экстренной перегрузки $t_{эп}$. Току технологической перегрузки $I_{тп}$ соответствует уставка выдержки времени при контроле технологической перегрузки $t_{тп}$. Току электродвигателя при потере производительности насоса $I_{пп}$

соответствует уставка выдержки времени при отстройке от потери производительности $t_{пп}$.

При комплектовании аппарата защиты электродвигателей АЗД5 блоком индикации БИ5 дополнительно обеспечиваются следующие функции:

- блокировка и деблокировка повторного пуска электродвигателя после срабатывания защиты;
- индикация причины срабатывания аппарата.

Аппарат защиты электродвигателей АЗД5 не требует отдельного источника питания, т. к. питание аппарата обеспечивается исключительно за счет индуктивной связи его с жилами защищаемого электродвигателя.

Схема подключения аппарата АЗД5 приведена на рисунке 6.13.

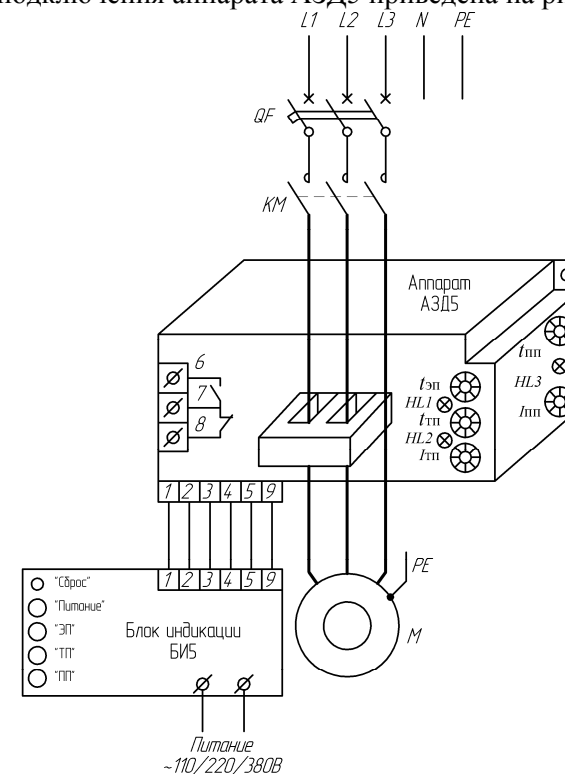


Рисунок 6.13 – Схема подключения аппарата АЗД5

Конструктивно аппарат защиты электродвигателей АЗД5 выполнен единым блоком, включающим в себя датчики тока, электронную схему и исполнительный элемент, залитые герметизирующим компаундом. На корпусе аппарата расположены потенциометры для настройки защитных характеристик.

- **Электронное реле защиты ЗРВ10** защищает в аварийных состояниях, указанных в таблице 6.2.

Устройства защиты ЗРВ10 характеризуется большим диапазоном регулировки уставки тока и улучшенными функциями защиты. Они защищают трехфазные электродвигатели, имеющие ток до 100 А (45 кВт при напряжении 400 В, 50/60 Гц). Выпускаются 4 типоразмера устройств защиты ЗРВ10. Типоразмер S00 имеет следующие диапазоны регулировки тока: 0,1–0,4 А; 0,4–1,6 А; 1,5–6 А; 3–12 А. Типоразмер S0 – диапазоны регулировки тока 3–12 А и 6–25 А. Типоразмер S2 – диапазоны регулировки тока 3–12 А, 6–25 А и 15–50 А. Типоразмер S3 – диапазоны регулировки тока 3–12 А, 6–25 А, 15–50 А и 25–100 А.

Внешний вид устройства защиты ЗРВ10 приведен на рисунке 6.14 [58].

Электронные реле защиты от перегрузок ЗРВ10 обладают тем преимуществом, что они не создают потерь мощности и имеют большие диапазоны регулировки по сравнению с электротепловыми токовыми реле. Нет необходимости в управляющем напряжении. Имеется большая ручка регулировки тока, поэтому возможна точная регулировка тока уставки. Реле имеют быстрое срабатывание (< 3 с) при выпадении фазы. Для тяжелого запуска в течение 20 с реле обеспечивает характеристику CLASS 20 (при шестикратном номинальном токе время срабатывания составляет 20 с).



Рисунок 6.14 – Внешний вид устройств защиты ЗРВ10 на малый и большой ток

- **Реле защиты электродвигателя типа РЗД-1** защищает в аварийных состояниях, указанных в таблице 6.2.

Общий вид реле РЗД-1 изображен на рисунке 6.15 [112].



Рисунок 6.15 – Общий вид реле РЗД-1

Реле РЗД-1 отличаются широкими функциональными возможностями, простотой задания уставок срабатывания (путем набора комбинации фиксированных дискретных уставок в двоичном коде), не требующей имитации, и точности их задания (в пределах дискреты). Напряжение питания реле – 380 В трехфазного переменного тока. Потребляемая мощность реле не более 35 ВА.

Реле РЗД-1 имеет следующие исполнения по току электродвигателя:

- до 10 А – со встроенными в реле трансформаторами тока. Диапазон задания уставок тока 0,2–12,6 А (6 разрядов двоичного кода с дискретой 0,2 А);
- от 10 до 100 А – со встроенными в реле трансформаторами тока. Диапазон задания уставок тока 2–126 А (6 разрядов двоичного кода с дискретой 2 А);
- свыше 100 А – питание от внешних трансформаторов тока. Диапазон задания уставок тока внешнего трансформатора 0,2–12,6 А (6 разрядов двоичного кода с дискретой 0,2 А).

Номинальный ток и дополнительные функции типоразмеров реле РЗД-1 приведены в таблице 6.3.

Таблица 6.3 – Номинальный ток и дополнительные функции типоразмеров реле РЗД-1

Типоразмер реле	Номинальные параметры трехфазной питающей сети		Номинальный ток электродвигателя, А	Дополнительные функции			
	напряжение (линейное), В	частота, Гц		температурная защита	контроль технологического параметра	контроль по току нагрузки механизма	информационные выходы для связи с контроллером или ЭВМ
РЗД-1-1УЗ	380	50	до 10	-	-	-	-
РЗД-1-1ТУЗ				+	-	-	-
РЗД-1-1КУЗ				-	+	-	-
РЗД-1-1ТКУЗ				+	+	-	-
РЗД-1-1ПУЗ				-	-	+	-
РЗД-1-1ИУЗ				-	-	-	+
РЗД-1-1ПИУЗ				-	-	+	+
РЗД-1-2УЗ				-	-	-	-
РЗД-1-2ТУЗ				+	-	-	-
РЗД-1-2КУЗ				-	+	-	-
РЗД-1-2ТКУЗ			+	+	-	-	
РЗД-1-2ПУЗ			-	-	+	-	
РЗД-1-2ИУЗ			-	-	-	+	
РЗД-1-2ПИУЗ			-	-	+	+	
РЗД-1-3УЗ			-	-	-	-	
РЗД-1-3ТУЗ			+	-	-	-	
РЗД-1-3КУЗ			-	+	-	-	
РЗД-1-3ПУЗ			-	-	+	-	
РЗД-1-3ИУЗ			-	-	-	+	
РЗД-1-3ПИУЗ			-	-	+	+	
РЗД-1-10УЗ	более 100			-	-	-	-
РЗД-1-10ТУЗ				+	-	-	-
РЗД-1-10КУЗ				-	+	-	-
РЗД-1-10ТКУЗ				-	-	+	-
РЗД-1-10ПУЗ				-	-	-	+
РЗД-1-10ИУЗ				-	-	-	+
РЗД-1-10ПИУЗ				-	-	+	+
РЗД-1-100УЗ				-	-	-	-
РЗД-1-100ТУЗ				+	-	-	-
РЗД-1-100КУЗ				-	+	-	-

Из таблицы 6.3 следует, что реле защиты РЗД-1 могут иметь одну или две следующие дополнительные функции:

температурную защиту (при наличии позисторов в обмотках электродвигателя);

контроль технологических параметров (например, давления в трубопроводе);

контроль по току перегрузки механизма, работающего в стопорном режиме;

информационные выходы для связи с контроллером или ЭВМ.

Реле защиты РЗД-1 запрещает пуск электродвигателя при недопустимом снижении сопротивления изоляции его обмоток относительно корпуса.

Реле защиты РЗД-1 имеет индикацию причин аварийного отключения.

Схема подключения реле РЗД-1-1У3 приведена на рисунке 6.16.

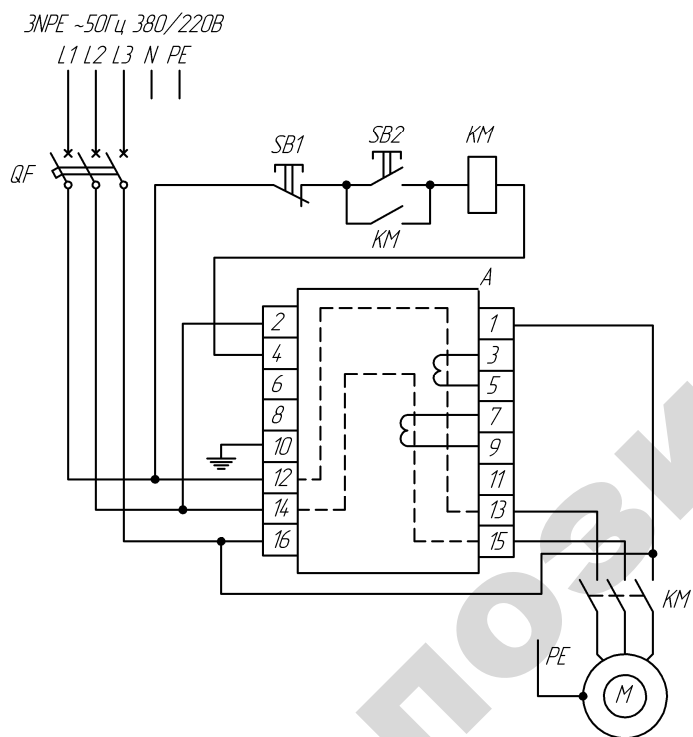


Рисунок 6.16 – Принципиальная электрическая схема включения реле РЗД-1-1У

• Реле электронное защиты электродвигателей РЭЗЭ-6 защищает в аварийных состояниях, указанных в таблице 6.2.

Вид на лицевую панель и вид сбоку на реле РЭЗЭ-6 приведен на рисунке 6.17 [70].

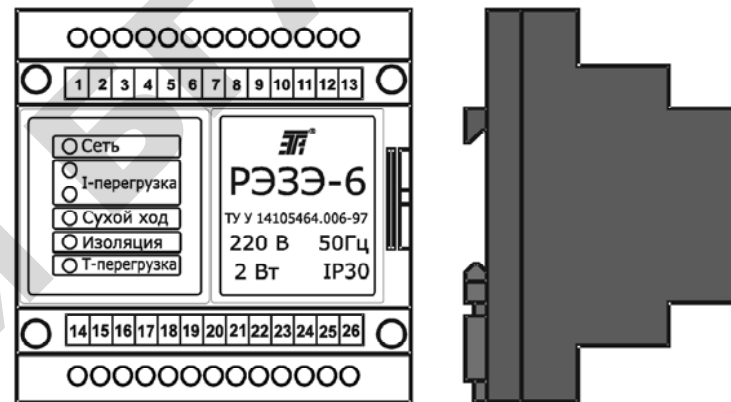


Рисунок 6.17 – Вид на переднюю панель и вид сбоку на реле РЭЗЭ-6

Реле РЭЗЭ-6 функционирует совместно с электромагнитным пускателем (контактором), а также с датчиками тока и температуры. Номер исполнения датчиков тока выбирается потребителем в зависимости от диапазона контролируемых токов: № 1 – в диапазоне 1–5 А; № 2 – в диапазоне 5–25 А; № 3 – в диапазоне 25–125 А; № 4 – в диапазоне 125–625 А.

Принцип действия реле основан на обработке сигналов от датчиков тока и датчика температуры. При превышении одним из сигналов заданной уставки срабатывает промежуточное реле в цепи питания катушки электромагнитного пускателя (контактора), отключает его и, соответственно, электродвигатель.

Защитная характеристика реле защиты РЭЗЭ-6 приведена на рисунке 6.18.

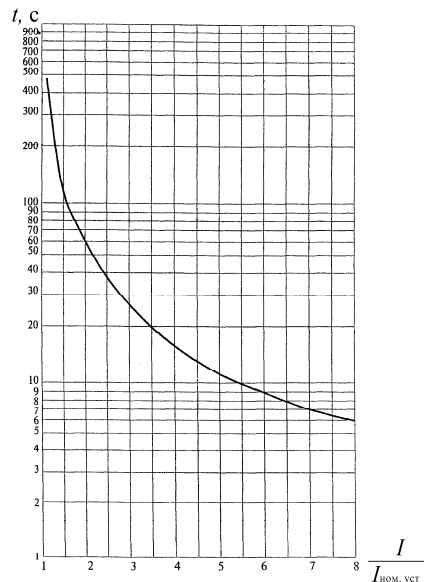


Рисунок 6.18 – Защитная характеристика реле защиты РЭЗЭ-6

Общий вид датчиков тока реле электронной защиты электродвигателей РЭЗЭ-6 изображен на рисунке 6.19.

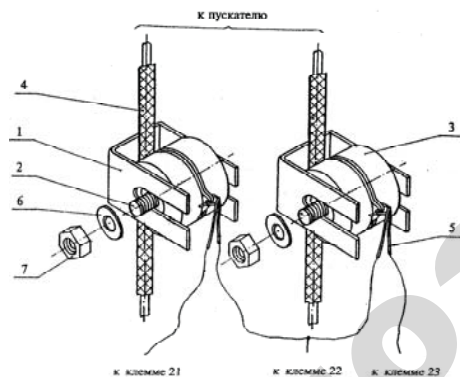


Рисунок 6.19 – Общий вид датчиков тока реле электронной защиты электродвигателей РЭЗЭ-6:

1 – стальная скоба; 2 – болт; 3 – катушка датчика тока; 4 – фазный провод; 5 – проводники выводов катушки; 6 – шайба; 7 – гайка

Схема подключения реле защиты РЭЗЭ-6 изображена на рисунке 6.20.

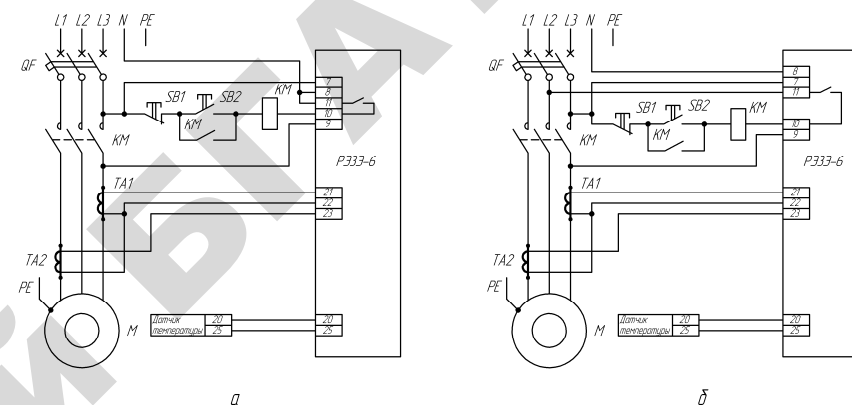


Рисунок 6.20 – Схема подключения реле защиты РЭЗЭ-6 при катушке электромагнитного пускателя на 220 В (а) и на 380 В (б)

• Реле электронной защиты электродвигателей РЭЗЭ-7 предназначено для защиты асинхронных электродвигателей мощностью до 3 кВт путем отключения их при возникновении следующих аварийных ситуаций:

- недопустимая перегрузка электродвигателя по току, вызванная асимметрией фазных напряжений, технологической перегрузкой, заклиниванием ротора или междувитковыми замыканиями;
- недопустимая асимметрия фазных токов, обусловленная асимметрией фазных напряжений, междувитковыми замыканиями, обрывом фазы статорной обмотки, плохим контактом в пускателе или в клеммной коробке электродвигателя.
- Дополнительная функция реле – выдача выходного аналогового сигнала, пропорционального току электродвигателя.

• Блок токовой защиты БТЗ1-1У защищает в аварийных состояниях, указанных в таблице 6.2 [114].

Устройство БТЗ1-1У может применяться для защиты электродвигателей с номинальным током 0,7–600 А, с уставкой на рабочий ток по каждой фазе цепи нагрузки. Оно получает питание от переменного тока 220 В частотой 50 Гц.

В дежурном режиме (электродвигатель отключен) производится контроль питающего напряжения сети и сопротивления изоляции. При снижении или повышении напряжения, изменении чередования фаз или при наличии перекоса фаз более допустимого значения, а также снижения сопротивления изоляции до значения 500 кОм, пуск электродвигателя блокируется. Одновременно с контролем сопротивления изоляции осуществляется сушка обмоток электродвигателя.

Общий вид устройства защиты электродвигателей БТЗ1-1У приведен на рисунке 6.21.



Рисунок 6.21 – Общий вид устройства защиты БТЗ1-1У асинхронных электродвигателей

В рабочем режиме, кроме контроля по напряжению, производится контроль по току во всех трех фазах. При наличии аварийной ситуации, обеспечивается запоминание и индикация вида аварийной ситуации с одновременной блокировкой электродвигателя. Без устранения причины аварийного отключения каждое новое включение электродвигателя блокируется.

В качестве источника первичной информации о величине и наличии тока в фазах нагрузки используются датчики тока накладного типа ДТ-3НЗ, которые устанавливаются на токоведущие провода

электродвигателя без нарушения существующего монтажа и изоляции провода, что упрощает монтаж устройства.

Принцип работы датчиков основан на регистрации напряженности магнитного поля, образующегося вокруг проводника с током. Внешний вид датчика тока накладного типа ДТ-3НЗ изображен на рисунке 6.22.

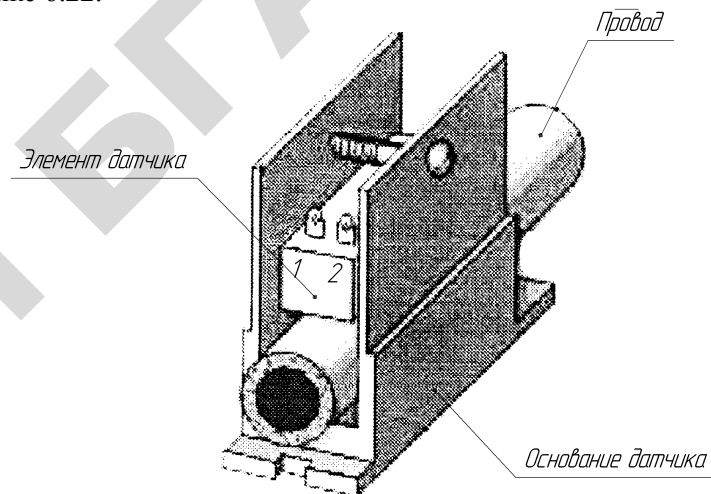


Рисунок 6.22 – Внешний вид датчика тока накладного типа ДТ-3НЗ

На передней панели устройства защиты БТЗ1-1У находятся кнопка «Сброс», индикаторы «Сеть» и «Авария», индикаторы видов аварийных ситуаций.

Регулирующие и коммутирующие элементы, клеммы для подключения подводящих проводов размещены под верхней крышкой электронного блока.

В комплект прибора входят три датчика тока одного размера.

• **Универсальное электронное устройство защиты трехфазных асинхронных электродвигателей серии УЗ-ЭД-ХХ-ИВ-220** защищает в аварийных состояниях, указанных в [115] и в таблице 6.2.

В обозначении устройства защиты буква «И» обозначает наличие функции контроля сопротивления изоляции, а буква «В» – исполнение с выносными датчиками. Цифры «220» обозначают напряжение питания устройства (220 В, 50 Гц).

Устройство выполнено в корпусе из ударопрочного материала. Для установки устройства на монтажной панели электрошкафа предусмотрена установочная планка с двумя пазами (под винт М5), расположенная на задней стенке корпуса устройства.

Все органы управления и индикации вынесены на переднюю панель устройства и закрыты прозрачной крышкой. Общий вид и габаритные размеры устройства защиты УЗ-ЭД-XX изображены на рисунке 6.23.

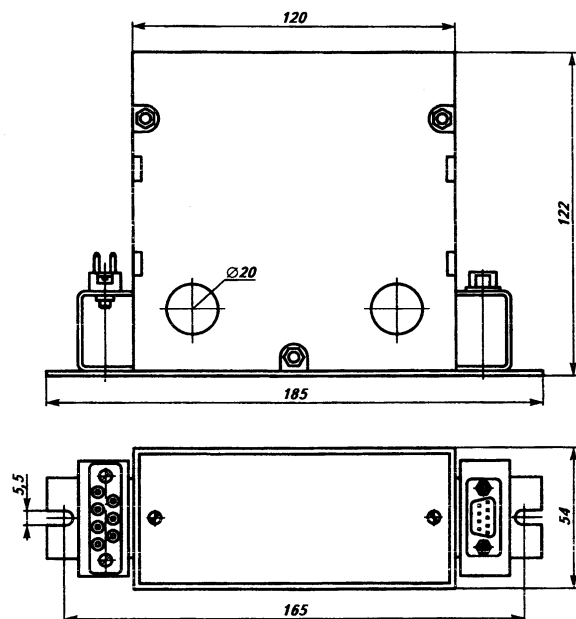


Рисунок 6.23 – Общий вид и габаритные размеры устройства защиты УЗ-ЭД-XX

Функционально устройство УЗ-ЭД содержит преобразователи сигналов токовых датчиков, пороговые устройства, схему контроля изоляции, таймеры временных интервалов, выходные коммутаторы.

Устройство УЗ-ЭД-25 позволяет коммутировать электродвигатель с переключением схемы «звезда» на схему «треугольник» при пуске. Задание времени пуска электродвигателя до момента переключения схем устанавливается на передней панели устройства: с точностью 1 с в интервале 1–16 с; с точностью 2 с – в интервале 1–31 с; с точностью 5 с в интервале 30–180 с.

Принципиальная электрическая схема подключения устройства УЗ-ЭД-25 в электрическую сеть представлена на рисунке 6.24.

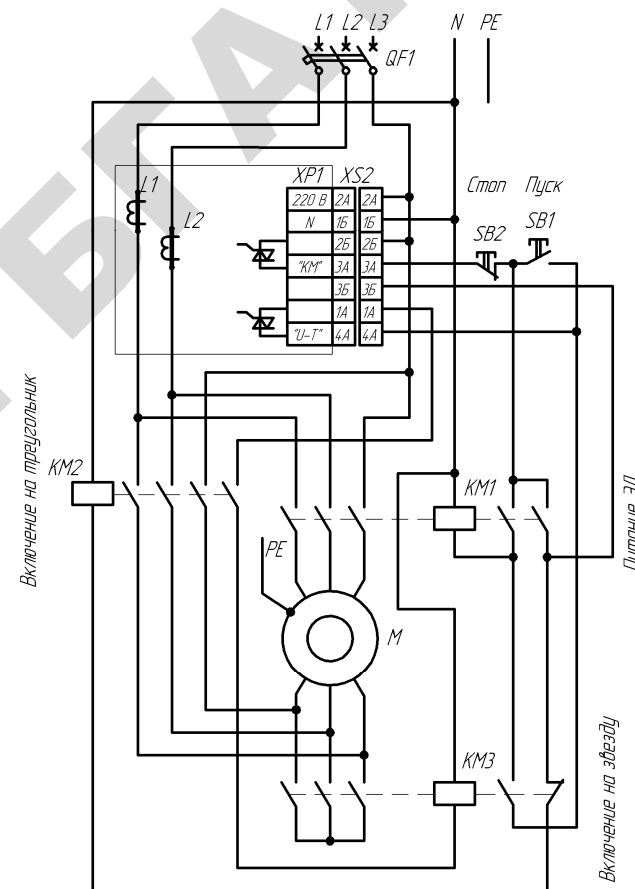


Рисунок 6.24 – Принципиальная электрическая схема подключения устройства защиты УЗ-ЭД-25

Изменение параметров управления осуществляется с помощью микровыключателей типа ВДМ.

Диапазон уставок тока срабатывания защиты:

- с шагом 0,2 А для устройств защиты типов УЗ-ЭД-26 и УЗ-ЭД-27;
- с шагом 1 А для устройств защиты типов УЗ-ЭД-22;

– с шагом 4 А для устройств всех типов на ток 20–680 А. Предельная погрешность токов уставки $\pm 5\%$. Диапазон уставок времени срабатывания:

при перегрузке 130 % (с шагом 1 с) – 2–15 с;

при перегрузке 600 % (с шагом 1 с) – 1–7 с.

Порог срабатывания защиты по перекосу фаз (по току уставки): по току – $(35 \pm 4)\%$; по углу – $(20 \pm 3)^\circ$.

Устройство УЗ-ЭД-26 может коммутировать цепь катушки электромагнитного пускателя, питаемого напряжением 127 В и более от постороннего источника напряжения. Принципиальная схема включения устройств типа УЗ-ЭД-26 приведена на рисунке 6.25.

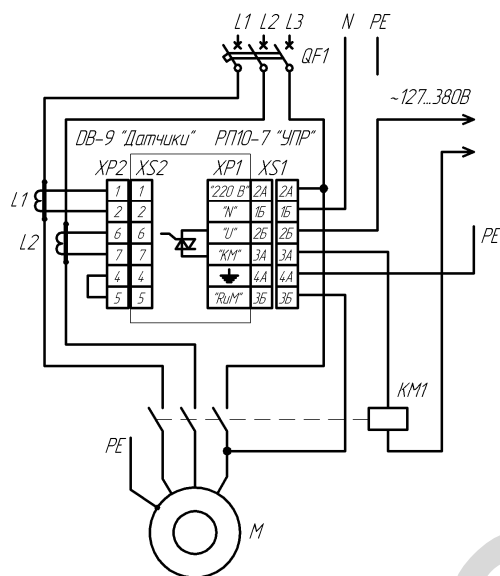


Рисунок 6.25 – Принципиальная электрическая схема включения устройства УЗ-ЭД-26

Порог контроля сопротивления изоляции:

на отключение – 400 ± 50 кОм;

на восстановление – 500 ± 50 кОм.

Устройства типа УЗ-ЭД-26 и УЗ-ЭД-27 имеют дополнительные диапазоны контроля сопротивления изоляции: отключение – 100 кОм; восстановление – 200 кОм.

Устройство защиты асинхронных электродвигателей типа УЗ-ЭД-27 может быть использовано для защиты электродвигателей погружных насосов. Для этой цели устройство защиты имеет блок, контролирующий аварийный для артезианской скважины сухой ход насосного агрегата (используется датчик «сухого» хода (ДСХ)). Кроме того, устройство защиты электродвигателей типа УЗ-ЭД-27 имеет блок контроля изоляции с пониженными значениями диапазона контроля сопротивления изоляции (100–200 кОм). Цепи управления электродвигателя могут подключаться к источнику управляющего напряжения переменного тока 127–380 В. Напряжения на разомкнутых контактах ДСХ составляет 17 ± 5 В.

Габаритные размеры устройства защиты УЗ-ЭД-XX составляют $185 \times 54 \times 122$ мм. Устройство защиты способно работать при температуре окружающей среды от минус 30°C до $+50^\circ\text{C}$.

Принципиальная электрическая схема включения устройства УЗ-ЭД-27 приведена на рисунке 6.26.

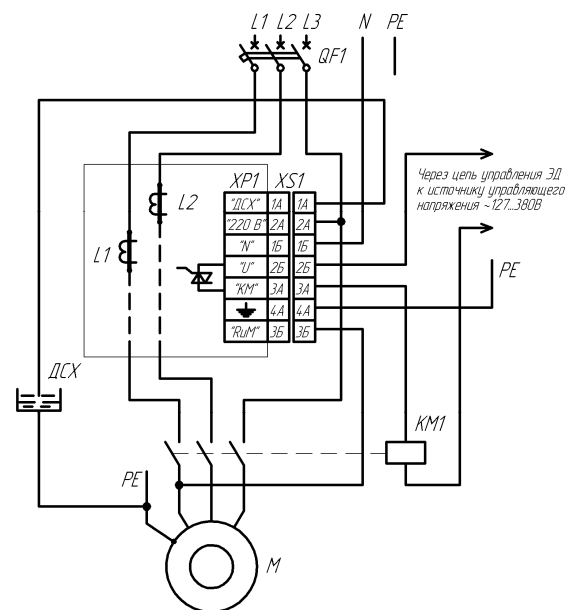


Рисунок 6.26 – Принципиальная электрическая схема включения устройства защиты УЗ-ЭД-27 с датчиком сухого хода

- Устройство защитного отключения трехфазного электродвигателя УЗОТЭ-2У защищает от аварийных состояний и режимов, указанных в таблице 6.2.

Внешний вид устройства УЗОТЭ-2У изображен на рисунке 6.27 [72].



Рисунок 6.27 – Внешний вид устройства защиты УЗОТЭ-2У

Устройство защиты УЗОТЭ-2У предназначено для защиты трехфазных асинхронных электродвигателей, работающих в тяжелых производственных условиях:

- при технологических перегрузках;
- при токовых перегрузках, вызванных пониженным напряжением в сети;
- при повышенной влажности и температуре, высокой запыленности.

Устройство защиты УЗОТЭ-2У выпускается в корпусе настенного крепления. Оно включает в себя 4 блока контроля состояния электродвигателя:

- блок контроля температуры корпуса электродвигателя (БКТ);
- блок контроля тока утечки обмотки статора электродвигателя (БКУ);
- блок контроля перекоса фаз (БКФ);

- блок контроля тока, потребляемого электродвигателем (БКП).

Превышение уровня сигнала в любом из каналов контроля приводит к срабатыванию выходного реле и аварийному отключению электродвигателя.

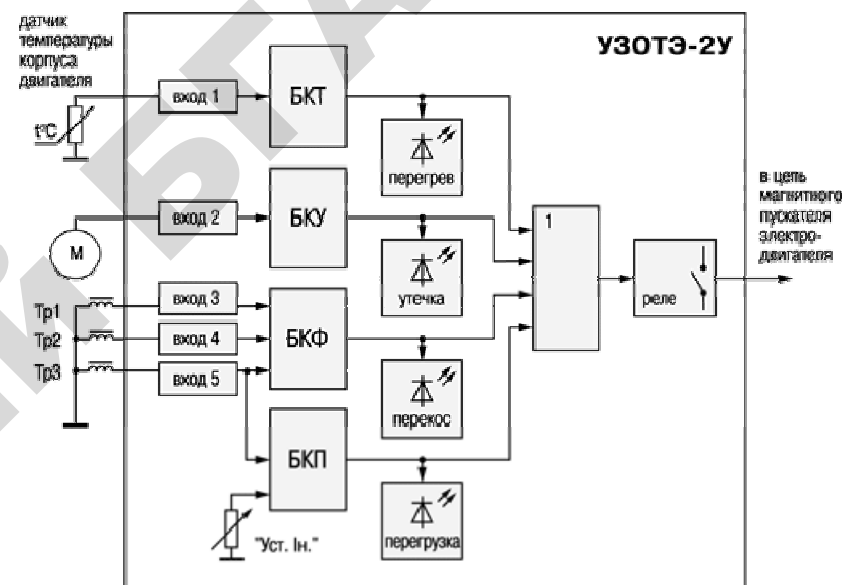


Рисунок 6.28 – Функциональная схема устройства защиты УЗОТЭ-2У

Для контроля за состоянием защищаемого электродвигателя к входам устройства защиты УЗОТЭ-2У подключаются датчики двух типов:

- термодетектор в виде позистора, предназначенный для контроля температуры корпуса электродвигателя (подключается к входу 1, сигнал с которого обрабатывает БКТ);
- трансформаторные датчики тока ТА1–ТА3, которые служат для формирования сигнала, пропорционального току, потребляемому электродвигателем (подключаются ко входам 3–5, сигналы с которых обрабатываются БКФ и БКП).

Габаритные размеры трансформаторных датчиков тока изображены на рисунке 6.29.

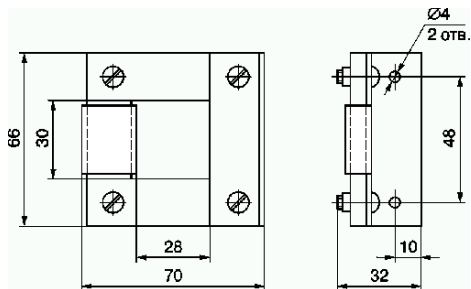


Рисунок 6.29 – Габаритные размеры трансформаторных датчиков тока устройства защиты электродвигателей УЗОТЭ-2У

На лицевой панели прибора расположены 4 светодиодных индикатора. Здесь же расположена ручка потенциометра «Уст. I_n », которая служит для уставки значения номинального тока, потребляемого электродвигателем.

На рисунке 6.30 изображена схема подключения устройства защиты электродвигателей УЗОТЭ-2У.

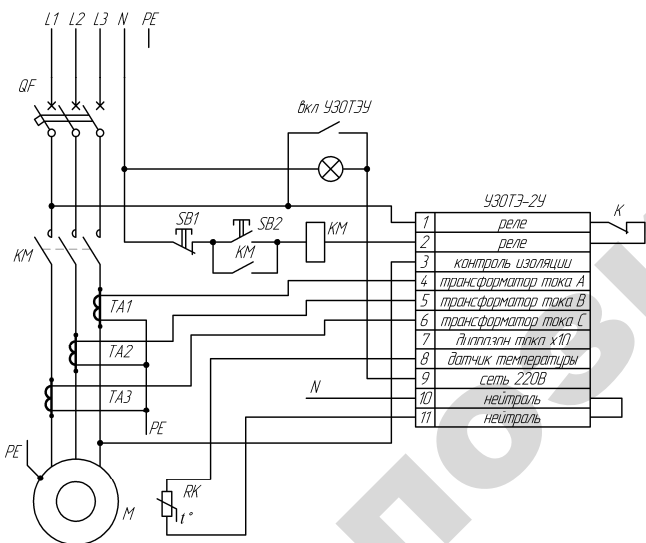


Рисунок 6.30 – Схема подключения устройства защиты электродвигателей УЗОТЭ-2У

В России выпускаются другие электронные комплексные устройства защиты, не вошедшие в таблицу 6.2. Например, комбинированное устройство защиты асинхронных электродвигателей на ток до 300 А типа ФУКЗ-АФМ.

• Устройство защиты ФУКЗ-АФМ предназначено для защиты трехфазных электродвигателей от следующих аварийных режимов и состояний [116]:

- неполнофазного режима работы и асимметрии фазных напряжений;
- от перегрузок по току;
- от опасного тока утечки в процессе работы (однофазные контролируемые замыкания на землю обмоток);
- от перегрева статорной обмотки и подшипников (при наличии позисторов);
- от увлажнения изоляции обмоток (не разрешает включать электродвигатель с пониженным сопротивлением изоляции).

Перед включением электродвигателя также контролируются целостность цепей питания, асимметрия и уровень напряжений фаз сети, обратное чередование фаз. Также в периоды пауз производится подсушивание изоляции обмоток электроосмосом.

Устройство защиты ФУКЗ-АФМ – высокоточный и стабилизированный (по температуре) прибор комбинированной защиты электродвигателей повышенной надежности. Применение аналоговой схемотехники и фазового метода защиты обеспечивают адекватную реакцию прибора на любые фазные нарушения. Тепловая память настраивается на электродвигатели с любыми тепловыми характеристиками.

Устройство защиты ФУКЗ-АФМ с помощью светодиодных индикаторов селективно сигнализирует о состоянии электродвигателя, о начале аварийного режима и о причине аварийного отключения. Встроенные тесты и тумблер общей блокировки позволяют легко, без вмешательства в работу привода и без нарушения настройки, периодически контролировать исправность устройства защиты. Также можно по отдельности заблокировать работу защиты в случае некорректной работы по отдельным каналам или в случае производственной необходимости.

Устройство защиты ФУКЗ-АФМ состоит из электронного блока и комплекта согласованных (по чувствительности) датчиков тока. Соединение датчиков тока с электронным блоком выполняется экранированными витыми парами через входящий в поставку разъем.

• Защитная характеристика устройства защиты ФУКЗ-АФМ описывается выражением вида:

$$t_{\text{сраб}} = \frac{A}{k-1}, \quad (6.1)$$

где $t_{\text{сраб}}$ – время срабатывания защиты, с;

A – постоянная времени нагрева электродвигателя, с;

k – коэффициент перегрузки, о. е.; $k = I/I_n$.

Преимущество прибора состоит в точной настройке на любой режим работы электропривода, исключающей ложные срабатывания при сохранении стопроцентной защиты. Удобства монтажа и настройки заключаются в следующем: монтаж не требует вмешательства в рабочую схему электродвигателя; настройка на рабочий ток производится единственным переменным резистором. Прибор имеет высокую степень защиты от внешних условий (IP66) и по питанию (двухступенчатая защита варисторами и самовосстанавливающимися предохранителями).

Сравнение электронных комплексных защит электродвигателей по показателям представлено в таблице 6.4.

Таблица 6.4 – Сравнение электронных комплексных защит электродвигателей по показателям

Показатели контроля	СиЭЗ	РЗД-3М	АЗД	ЗРВ10	РЗД-1	РЗЭ-6	РЗЭ-7	БТЗ1-1У	УЗ-ЭД	УЗОТЭ-2У	ФУКЗ-АФМ
1. Предпусковой контроль сети								+			+
2. Предпусковой контроль $R_{из}$					+	+		+	+	+	+
3. Перегрузка	+	+	+	+	+	+	+	+	+	+	+
4. Неполнофазный режим	+	+	+	+	+	+	+	+	+	+	+
5. Заторможенный ротор	+	+	+	+	+	+	+	+	+	+	+

Окончание таблицы 6.4

Показатели контроля	СиЭЗ	РЗД-3М	АЗД	ЗРВ10	РЗД-1	РЗЭ-6	РЗЭ-7	БТЗ1-1У	УЗ-ЭД	УЗОТЭ-2У	ФУКЗ-АФМ
6. Асимметрия тока или напряжения	+	+	+	+	+	+	+	+	+	+	+
7. Тепловая память или тепловая модель				+							+
8. Контроль перегрева с термодетекторами	+					+				+	к
9. Контроль минимальной нагрузки			+			+					+
10. Контроль тока утечки на корпус											+
11. Измерение тока в 3 фазах	+	+		+				+		+	
12. Уставка выставляется по номинальному току				+							
13. Блокировка по технологическому параметру					+				+		+
14. Подсушка изоляции при паузах в работе								+			+
15. Допустимая температура ниже -25 °С	+	+	+		+			+	+	+	
16. Степень защиты корпуса не ниже IP54										+	+

Примечания:

1. Знак + означает, что параметр контролируется данной защитой.
2. Знак + – означает, что параметр контролируется данной защитой только в некоторых исполнениях устройств защиты или имеется возможность контроля.
3. Буква «к» означает, что контролируется температура корпуса электродвигателя.

Из таблицы 6.4 можно сделать следующие выводы:

1. Все современные электронные устройства защиты электродвигателя контролируют перегрузку, неполнофазный режим, состояние заторможенного ротора, асимметрию тока или напряжения электродвигателя.

2. Только 2 устройства защиты обеспечивают предпусковой контроль сети и предпусковой контроль сопротивления изоляции электродвигателя.

3. Только 2 устройства защиты имеют высокую степень защиты корпуса (не ниже IP54).

Следовательно, рассмотренные выше устройства защиты не в полной мере отвечают требованиям, предъявляемым к устройствам защиты электродвигателей сельскохозяйственного назначения.

6.4. Комплексные микропроцессорные устройства защиты асинхронных электродвигателей

Для построения устройств комплексной защиты электродвигателей актуально применение микропроцессоров.

Микропроцессоры позволяют значительно повысить качество защиты трехфазных асинхронных электродвигателей при полном использовании их способности выдерживать перегрузки. Одновременно сокращается количество типоразмеров реле защиты, отличающихся значениями номинального тока. Сигналы с микропроцессорных защит могут быть использованы в системах автоматического управления с применением цифровой техники. Благодаря совершенствованию технологии производства больших интегральных схем следует ожидать снижения стоимости и габаритных размеров этих устройств, более широкого их распространения.

Микропроцессорные защиты электродвигателей по сравнению с широко распространенными электротепловыми биметаллическими реле имеют следующие преимущества:

1) воспроизведение необходимой защитной (времятоковой) характеристики во всем диапазоне перегрузок с высокой стабильностью и точностью;

2) возможность изменения защитных характеристик в широких пределах, позволяющая учитывать характер нагрузки электродвигателя и особенности теплового режима;

3) обеспечение защиты электродвигателей, работающих в повторно-кратковременном режиме работы. Имеется возможность более полного моделирования процессов нагрева и охлаждения электродвигателя;

4) повышенный диапазон регулирования тока уставки;

5) значительное повышение функциональных возможностей [54].

Задача создания комплексного универсального устройства защиты электродвигателя оказалась достаточно сложной по следующим причинам [117].

1. Ток электродвигателя необходимо измерять как можно точнее, ведь известно, что продолжительная работа электродвигателя всего лишь при 5 % перегрузке сокращает срок службы изоляции в 10 раз.

2. В связи с несинусоидальностью кривой тока необходимо определять действующее значение тока. Измерение тока по пиковым значениям (длительным фронтам) или по средним значениям приводит к неточным результатам и ложным срабатываниям защиты.

3. Необходимо обеспечить измерение тока в широких пределах (от тока холостого хода до пускового тока и более). Учитывая универсальность устройств, т. е. их способность защищать электродвигатели нескольких габаритов, необходим большой диапазон измеряемых токов. Это предъявляет к трансформаторным датчикам тока требования, связанные с ненасыщением магнитопровода сердечника и обеспечением линейной выходной характеристики. При невыполнении этих требований точность измерения тока уменьшается до недопустимых значений.

4. Требуется обеспечить временные и токовые отстройки от пусковых токов, от токов стопорного режима с горячего и холодного состояний, от токов, соответствующих холостому ходу рабочей машины.

5. Защита должна быть «умной», т. е. время срабатывания защитного устройства должно зависеть от величины тока и начального состояния электродвигателя (горячий или холодный электродвигатель).

6. Необходимо отключать недогруженный электродвигатель при возникновении недопустимой асимметрии токов, так как это приводит к его вибрации (биению ротора).

7. Необходимо учитывать тепло, выделяемое при пусках электродвигателя, т. к. при частых пусках электродвигатель может пе-

регреться пусковыми токами, имея на валу нагрузку меньше номинальной нагрузки. Для этого микропроцессор решает уравнение теплового баланса электродвигателя. Уравнение теплового баланса решается микропроцессором непрерывно как в процессе работы электродвигателя, так и при его остановках. Анализ перегрузки производится с учетом «истории» работы электродвигателя. Это означает, например, что предварительно нагруженный электродвигатель после перегрузки будет отключен быстрее, чем предварительно холодный. Такой подход особенно необходим, когда нагрузка на валу электродвигателя переменная с периодическими перегрузками. Важным преимуществом такого подхода является то, что он позволяет ограничить количество пусков электродвигателя в единицу времени, не используя термодетекторы.

Моделирование процесса нагрева электродвигателя используется в том случае, если невозможно установить в нем термодетекторы или разработчики не желают их использовать. Однако следует иметь в виду, что термодетекторы, установленные в обмотках статора электродвигателя, контролируют их температуру более достоверно, чем самая «крутая» тепловая модель.

8. Включать в сеть электродвигатель можно только после проверки сопротивления изоляции обмотки, проверки наличия всех фаз сети, асимметрии напряжений и порядка чередования фаз.

9. Одновременный контроль токов и напряжений необходим для анализа вида аварии. Такой анализ дает возможность применить соответствующую логику принятия решений. Например, при потере фазы в сети повторный пуск разрешать только при появлении фазы, а при авариях, связанных с повреждениями внутри электродвигателя, например, при замыкании обмотки на корпус, — запрещать включение электродвигателя.

10. Для правильной работы устройств защиты принципиально важно как можно точнее задать значение номинального тока электродвигателя. От того, насколько правильно задан этот параметр, зависит эффективность и достоверность принятия решения по использованию защиты от перегрузок и других аварий. Для всех устройств защиты это является камнем преткновения. В некоторых из них он задается неточно, в других задать его вообще невозможно, в третьих номинальный ток не выстав-

ляется заранее, а вместо этого настраивается устройство защиты на ток работающего электродвигателя. Например, изготовители некоторых устройств предлагают потребителю создать на валу электродвигателя нагрузку и уставку выставить по рабочему току электродвигателя. Для электроприводов с переменной нагрузкой на валу такая настройка уставки тока неприемлема. Таким образом, невозможность точного задания номинального тока в устройстве защиты до включения электродвигателя в сеть означает, что эти устройства обеспечивают слишком неточную защиту.

11. Устройство защиты электродвигателя должны иметь не менее двух гальванически не связанных «сухих» контактов для построения схем дистанционного контроля и управления, а также интерфейсный выход, что дает возможность использования его в проектах автоматизированных систем управления технологическими процессами (АСУ ТП) и диспетчеризации.

12. Устройства защиты для условий сельского хозяйства Беларуси (умеренный климат) должны иметь допустимый диапазон рабочих температур окружающей среды от $-25\text{ }^{\circ}\text{C}$ до $+40\text{ }^{\circ}\text{C}$, допускать относительную влажность воздуха до 98 %, степень защиты корпуса должна быть не ниже IP56 для индивидуального монтажа в помещениях, под навесом, в тамбурах. Без выполнения указанных выше требований невозможно достичь требуемого уровня надежности и точности устройств защиты электродвигателей, работающих в сельском хозяйстве.

Далее приведены основные микропроцессорные комплексные универсальные устройства защиты асинхронных электродвигателей, имеющиеся на рынках Беларуси и соседних стран. Обратите внимание на реализацию в них указанных выше 12 пунктов.

• **Микропроцессорное реле 3RB12 фирмы «Siemens»** (Германия) защищает в следующих аварийных состояниях и режимах:

- перегрузка;
- асимметрия токов;
- перегрев обмотки;
- замыкание на землю [58].

Структурная схема реле 3RB12 приведена на рисунке 6.31. Показаны настройки, индикация и причины срабатывания реле.

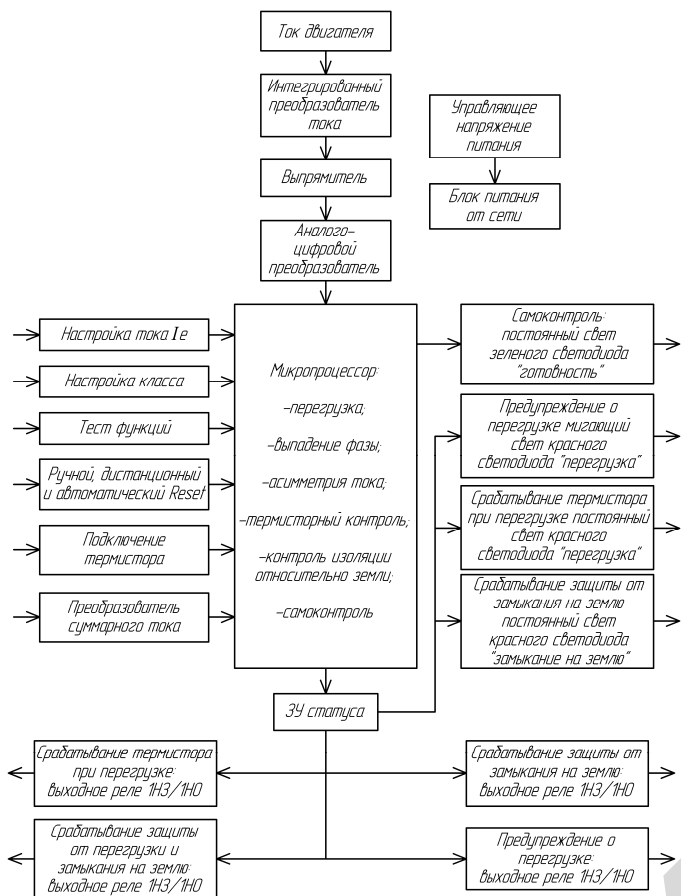


Рисунок 6.31 – Структурная схема микропроцессорного реле защиты асинхронного трехфазного электродвигателя типа 3RB12 фирмы «Siemens»

Переключателем, расположенным на лицевой панели прибора, можно настроить класс защитной характеристики с 5-го по 30. Тем самым защитную характеристику реле можно оптимально согласовать со временем пуска электродвигателя. Это дает возможность полностью использовать тепловые резервы электродвигателя при запуске без ущерба для его защиты.

Благодаря встроенным в обмотках электродвигателя позисторам реле 3RB12 становится аппаратом полной его защиты. Реле 3RB12 контроли-

рует потребляемый ток и температуру электродвигателя. Такое сочетание параметров контроля увеличивает надежность устройства, особенно при продолжительном времени пуска и в случае использования электродвигателя, основные потери в котором выделяются в роторе.

С помощью дифференциального трансформатора тока определяется и оценивается ток утечки (замыкания на землю). Светодиодная индикация и релейный выход «Замыкание на землю» указывают на причину отключения реле. При токе $1,15I_{уст}$ выдается предупреждение о перегрузке электродвигателя.

С помощью трехступенчатой функции тестирования могут быть протестированы измерительные устройства защиты, микропроцессор и выходное реле. Устройство имеет встроенный сброс, местный или дистанционный.

Контроль перегрузки по силе тока осуществляют преобразователи тока. Их выход подключен к выпрямителю и далее к аналого-цифровому преобразователю.

Недостатком реле являются отсутствие контроля сопротивления изоляции обмотки перед пуском электродвигателя и отсутствие контроля наличия трех фаз сети перед пуском.

При токе защищаемой цепи до 100 А реле защиты оборудованы встроенными проходными трансформаторами тока. При токах защищаемой цепи более 100 А используются внешние трансформаторы тока.

Уставка тока производится на лицевой панели аппарата по большой шкале. Контролируются три фазных тока.

Устанавливаются шесть классов защитных характеристик (5, 10, 15, 20, 25, 30). Микропроцессорное реле 3RB12 не имеет цифрового индикатора.

Степень защиты прибора – IP30.

● Микропроцессорное реле РДЦ-01 (Украина, ОАО «Электротехнический завод», г. Киев) защищает в следующих аварийных состояниях и режимах:

- неполнофазный режим;
- асимметрия токов;
- обратное чередование фаз;
- перегрузка;
- холостой ход;
- отклонение напряжения [118].

Микропроцессорное реле РДЦ-01 выпускается на номинальные токи защищаемой цепи от 1 до 100 А и от 5 до 500 А (с трансформаторами тока). Дискретность уставок по току 0,1 А, 1 А, 10 А. Измеряются три тока. Реле имеет цифровой индикатор.

Микропроцессорное реле РДЦ-01 имеет ряд отличительных характеристик:

- для полной защиты электродвигателя токи измеряются по всем трем фазам;
- реализована отстройка от значительных пусковых токов, что предохраняет электродвигатели от ложного отключения;
- время срабатывания токовой защиты имеет интегральную зависимость для корректной работы защиты при небольших длительных перегрузках и при значительных кратковременных перегрузках;
- для предотвращения биения ротора предусмотрено отключение электродвигателя при возникновении недопустимой асимметрии токов;
- реализована защита по цепям напряжения, которая включает защиту от повышения и понижения напряжения, от неправильного чередования фаз, асимметрии;
- имеется защита от недогрузки.

Реле РДЦ-01 имеет также ряд важных вспомогательных функций, которые облегчают работу технического персонала:

- мониторинг по току и по напряжению по каждой фазе, что исключает дополнительные расходы на измерительное оборудование (шкала точности прибора – 2 %). Мониторинг напряжения проводится как перед включением электродвигателя, так и в процессе его работы;
- индикацию частоты сети;
- количество настраиваемых автоматических повторных пусков в случае его аварийного отключения – (0–5) через 15 с. Причем в момент отключения реле РДЦ-01 запоминает все измеряемые параметры (ток, напряжение), что дает возможность оперативно устанавливать причины аварии и устранять их;
- счетчик моторесурса, что позволяет службе эксплуатации точнее планировать время проведения регламентных работ и планово-предупредительных ремонтов (ППР);
- память уставок энергонезависима и может сохранять значения в течение всего срока эксплуатации (не менее 8 лет).

Реле РДЦ-01 предназначено для комплексной защиты трехфазных асинхронных электродвигателей с индикацией причин аварий и автома-

тическим повторным пуском. Оно относится к статическим реле тока без оперативного питания, с цифровой индикацией значений контролируемых параметров и программируемой дискретностью уставок. Измерительные токовые цепи реле предусмотрены для прямого включения в сеть на номинальный ток до 5 А, или через внешние измерительные трансформаторы тока типа Т-0,66 (или подобные) на номинальный ток в диапазоне (5–500 А).

При перегрузке по току время срабатывания реле t_{cp} (с) зависит от кратности тока перегрузки k и пропорционально условному числу Q :

$$t_{cp} = \frac{Q}{(k^2 - 1,1025)}, \quad (6.2)$$

где Q – условное число, зависящее от времени пуска электродвигателя.

Время срабатывания реле при перегрузке по току в диапазоне (1,1025–10) I_n рассчитываются микроконтроллером по формуле (6.2). Начальное значение этого диапазона до значения $2 I_n$ может определяться уставкой.

Значения числа Q определяется временем пуска электродвигателя (таблица 6.5).

Таблица 6.5 – Значения числа Q

Время пуска электродвигателя, с	Значение числа Q при условиях	
	прямого пуска электродвигателя с короткозамкнутым ротором	пуск электродвигателей погружных насосов
1	30	30-75
2	75	
3	120	
4	180	
5	255	
6	270	
7	280	
8	290	
9	295	
10	300	

Общий вид реле защиты электродвигателей РДЦ-01 изображен на рисунке 6.32.



Рисунок 6.32 – Общий вид реле защиты электродвигателей РДЦ-01

Схемы подключения устройства защиты электродвигателей РДЦ-01 представлены на рисунке 6.33.

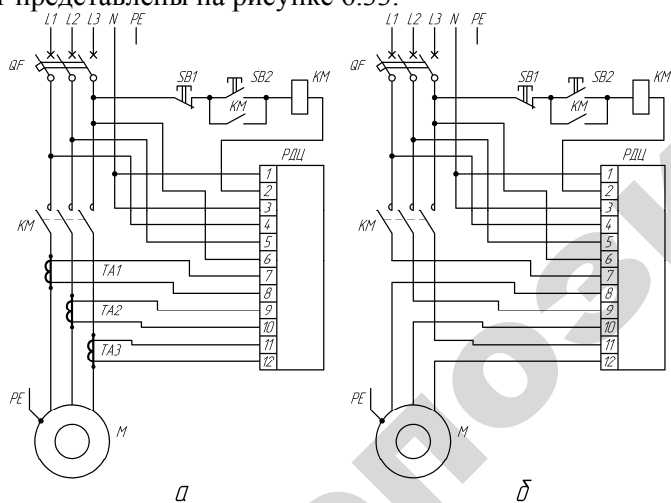


Рисунок 6.33 – Схема подключения устройства защиты электродвигателей РДЦ-01 при токе более 5 А (а) и при токе до 5 А (б)

Климатическое исполнение устройства и безопасность его обслуживания допускают работу устройства защиты в жестких условиях эксплуатации. Степень защиты реле – IP30. Условия эксплуатации: для исполнения У3, УХЛ2 – от -40°C до $+55^{\circ}\text{C}$; для исполнения Т3 – от -10°C до $+55^{\circ}\text{C}$.

В 2007 году на рынке появились реле РДЦ-02...РДЦ-06 – новый модельный ряд микропроцессорных устройств защиты с цифровой настройкой и индикацией для трехфазных асинхронных двигателей мощностью до 600 кВт, номинальным линейным напряжением питания 0,4 кВ (в том числе для глубинных насосов). Устройства могут обеспечить защиту АД от последствий перегрузок, асимметрии токов, коротких замыканий, а также работы с недогрузкой и неправильным чередованием фаз.

• Универсальные блоки защиты асинхронных электродвигателей УБЗ-301 (Россия, НПП «Новатек-Электро», Санкт-Петербург) защищают в следующих аварийных состояниях и режимах [119]:

при некачественном сетевом напряжении (недопустимые скачки напряжения, обрыв фазы, нарушение чередования фаз, асимметрия напряжений);

при механических перегрузках (защита от перегрузки с зависимой выдержкой времени);

при несимметричных перегрузках по фазным (линейным) токам, связанных с повреждениями внутри электродвигателя (защита от перекосов фазных токов с последующим запретом АПВ);

при асимметрии фазных токов без перегрузки, связанных с нарушением изоляции внутри электродвигателя или подводящего кабеля;

при исчезновении момента сопротивления на валу электродвигателя (защита по минимальному рабочему току, например при возникновении «сухого» хода насосов);

при недопустимо низком уровне изоляции на корпус – проверка перед включением (с блокировкой пуска при плохой изоляции);

при замыкании обмотки статора на корпус во время работы (защита по току утечки).

Универсальные блоки защиты асинхронных электродвигателей УБЗ-301 выпускаются трех модификаций на токи: 5–50 А; 10–100 А; 63–630 А. Они осуществляют полную и эффективную защиту

электродвигателя отключением его от сети или блокированием его пуска в аварийных ситуациях и режимах.

Общий вид устройства защиты УБЗ-301 с датчиками тока приведен на рисунке 6.34.



Рисунок 6.34 – Общий вид устройства защиты УБЗ-301 с датчиками тока

Кратность времени срабатывания K_t определяется по графику рисунка 6.35 в зависимости от кратности тока перегрузки K_i .

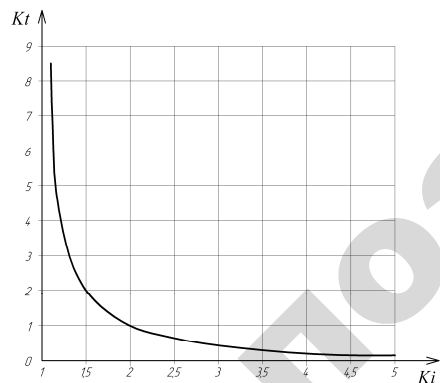


Рисунок 6.35 – Зависимость коэффициента кратности времени срабатывания от кратности тока перегрузки устройства защиты УБЗ-301

Время t срабатывания защиты при перегрузке определяется по уравнению

$$t = K_t T_2, \quad (6.3)$$

где K_t – кратность времени срабатывания, о. е.;

T_2 – время срабатывания защиты (с) при двукратной перегрузке по току (время T_2 выставляется потенциометром № 3).

Для стандартного рекомендуемого значения T_2 (среднее положение потенциометра № 3 составляет 60 с при двукратной перегрузке) в таблице 6.6 приведена времятоковая характеристика.

Таблица 6.6 – Времятоковая характеристика устройства защиты УБЗ-301 при значении $T_2 = 60$ с

I/I_n , о. е.	1,1	1,2	1,4	1,7	2,0	2,7	3	4	5	10	15
t , с	365	247	148	88,6	60	36,4	24,6	13,5	8,5	2,1	0,9

Характеристика таблицы 6.6 построена для условно холодного электродвигателя.

В процессе работы блока защиты микропроцессор решает уравнение теплового баланса электродвигателя. Предполагается, что до включения электродвигатель был холодным; при работе электродвигателя выделяется тепло, пропорциональное квадрату тока; после отключения электродвигателя происходит его остывание. Температура электродвигателя изменяется по экспоненте.

Подбирая разные значения времени автоматического повторного включения $T_{вкл}$ от 0 до 600 с (уставка потенциометра № 7), можно добиться ограничения количества пусков в единицу времени.

После отключения нагрузки по тепловой перегрузке она будет автоматически снова включена:

если время $T_{вкл} = 0$, то по тепловому гистерезису, т. е., электродвигатель (ЭД) должен остыть на 30 % от накопленного тепла;

если $T_{\text{вкл}}$ не равно 0 – через время $T_{\text{вкл}}$.

Такой подход позволяет учитывать предыдущее состояние ЭД и наиболее достоверно принимать решение о наличии тепловой перегрузки. Этот метод позволяет также учесть нагрев ЭД при пусках и ограничить (по желанию заказчика) их число в единицу времени. Имеется возможность смещения времятоковой характеристики по оси токов и по оси времени.

Блок УБЗ-301 имеет семь независимых регулировок. Для удобства пользования шлицы регулировочных потенциометров выведены на лицевую панель блока. Расположение регулировочных потенциометров изображено на рисунке 6.36.

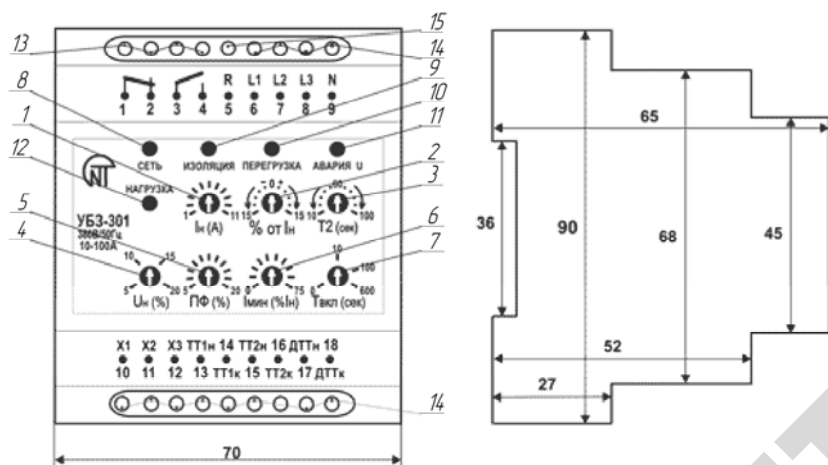


Рисунок 6.36 – Габаритные размеры и вид на переднюю панель универсального блока защиты УБЗ-301:

- 1 – потенциометр грубой установки тока; 2 – потенциометр точной подгонки тока;
- 3 – потенциометр установки времени срабатывания защиты при двухкратной перегрузке;
- 4 – потенциометр регулировки уставки на отклонение напряжения сети;
- 5 – потенциометр регулировки уставки на перекос линейных напряжений и действующих значений фазных токов; 6 – потенциометр регулировки уставки тока холостого хода;
- 7 – потенциометр регулировки времени автоматического повторного включения;
- 8 – зеленый светодиод «Сеть»; 9 – красный светодиод «Изоляция»; 10 – красный светодиод «Перегрузка»; 11 – красный светодиод «Авария U» (авария по сетевому напряжению);
- 12 – зеленый светодиод «Нагрузка»; 13 – клеммы выходного реле; 14 – клеммы для подключения трехфазного напряжения; 15 – клемма контроля изоляции обмотки электродвигателя

Шкала потенциометра № 1 имеет одиннадцать делений. Каждое деление соответствует конкретному стандартному значению шкалы токов. Каждое положение характеризуется конкретным количеством миганий зеленого светодиода «Сеть». Для выставления номинального тока необходимо установить ручку потенциометра в соответствующее положение. Необходимо учитывать, что между положениями имеются «мертвые» зоны, в которых светодиод «Сеть» горит без миганий, а номинальный ток считается неопределенным. Для точного задания тока следует потенциометром № 2 добавить или уменьшить ток в % от выставленного.

Выставление токов необходимо производить с учетом схемы соединения обмоток электродвигателя («звезда – треугольник»). Это связано с тем, что измерение токов производится тороидальными датчиками тока, надетыми на провода питания нагрузки. При соединении нагрузки в «звезду» эти токи соответствуют фазным токам нагрузки. При соединении в «треугольник» фазные токи нагрузки будут в 1,73 раза меньше протекающих в проводах питания. Диапазон номинальных токов устройства защиты составляет 5–50, 10–100, 63–630 А.

Уставка тока производится потенциометром № 1 (грубо), а с помощью потенциометра № 2 осуществляется более точная установка тока.

Уставка времени срабатывания (10–100 с) при двухкратной перегрузке осуществляется потенциометром № 3.

Уставка допустимого отклонения по напряжению (± 5 –20 %) от номинального значения осуществляется потенциометром № 4.

Уставка по перекосу фаз (5–20 %) осуществляется потенциометром № 5.

Уставка тока холостого хода (0–75 %) от номинального тока осуществляется потенциометром № 6.

Порог контроля сопротивления изоляции составляет 500 кОм.

Устройство защиты имеет фиксированную уставку срабатывания по дифференциальному току утечки 1,5 А.

Диапазон рабочих температур – от -35 °С до $+55$ °С.

Степень защиты блока защиты – IP40.

Блок защиты УБЗ-301 является микропроцессорным цифровым устройством с высокой степенью надежности. Оперативного питания не требуется – контролируемое напряжение является одновременно напряжением питания. Блок защиты УБЗ-301 осуществляет отдельный независимый контроль по сетевому напряжению и фазным токам. Это позволяет различать вид возникшей аварии: при

авариях сетевого напряжения блок осуществляет автоматическое повторное включение (АПВ) нагрузки после восстановления параметров напряжения; если авария возникла из-за повреждений внутри электродвигателя (перекас фазных токов при симметричном сетевом напряжении, наличие токов утечки и т. д.) происходит блокировка повторного пуска электродвигателя.

Блок защиты УБЗ-301 комплектуется тремя тороидальными датчиками тока, два из которых – датчики тока ($TA1$, $TA2$), через которые продеваются силовые провода питания электродвигателя. Третий датчик отличается увеличенным диаметром – дифференциальный датчик тока ($ДТТ$), через который продеваются три силовых провода. Через клеммы 6, 7, 8, 9 блок включается параллельно контролируемой сети. На выходе блока – замыкающий и размыкающий контакты (клеммы 1, 2, 3, 4). Выходные клеммы 3 и 4 включаются в разрыв цепи питания катушки электромагнитного пускателя (в схему управления). Клемма 5 предназначена для контроля уровня изоляции в отключенном состоянии электродвигателя.

Работа блока защиты УБЗ-301 происходит следующим образом.

1. После подачи напряжения на блок, перед включением выходного реле проверяются:

уровень изоляции обмотки статора на корпус. При сопротивлении изоляции ниже (500 ± 5) кОм электродвигатель не включается, загорается постоянным свечением красный светодиод «Изоляция»;

качество сетевого напряжения: наличие трех фаз; симметричность напряжения; величина действующего линейного напряжения. При отсутствии фазы, недопустимых отклонениях напряжения и асимметрии электродвигатель не включается, красный светодиод «Авария U » мигает;

2. Если все параметры в норме, нагрузка включается через время $T_{вкл}$. Загорается зеленый светодиод «Нагрузка».

3. После включения нагрузки блок осуществляет контроль по напряжению и токам. Решение на отключение нагрузки принимается по следующим факторам:

превышение действующего значения напряжения на 50 В выше выставленной уставки (потенциометр № 4). При этом мигает красный светодиод «Авария U », автоматическое повторное включение (АПВ) разрешается;

превышение действующего значения тока над номинальным (или рабочим током, установленным с помощью потенциометров № 1 и № 2); если перегрузка возникает по току, но тепловой перегрузки нет, то красный светодиод «Перегрузка» мигает, электродвигатель не отключается. Если токовая перегрузка привела к тепловой перегрузке, то электродвигатель отключается, красный светодиод «Перегрузка» загорается постоянным свечением, горит в течение времени, равном $0,9$ от времени $T_{вкл}$, АПВ разрешается;

если перекас по токам (устанавливается потенциометром № 5) превышает в 2 раза перекас по сетевому напряжению, то нагрузка отключается, все красные светодиоды загораются постоянным свечением, блок блокируется, АПВ запрещается. Для разблокирования необходимо снять напряжение с блока. Предполагается, что такой вид аварии связан с повреждением внутри электродвигателя;

если перекас по токам (устанавливается потенциометром № 5) превышает перекас по напряжению меньше, чем в 2 раза, то электродвигатель отключается, загорается постоянным свечением красный светодиод «Авария U », АПВ разрешено;

если перекас по токам (устанавливается потенциометром № 5) меньше, чем перекас по напряжению, то электродвигатель отключается, мигает красный светодиод «Авария U », АПВ разрешено;

если среднее значение тока меньше $I_{мин}$ (устанавливается потенциометром № 5), то нагрузка отключается, все красные светодиоды одновременно мигают, блок блокируется, АПВ запрещено. Для разблокирования блока требуется снять с него напряжение.

Если после включения электродвигателя блок тут же отключил электродвигатель и заблокировался по причине перекаса токов, то одной из причин этого может быть неправильная полярность подключения датчиков тока $TA1$ или $TA2$. В этом случае рекомендуется изменить подключение одного из датчиков тока, поменяв местами проводники на клеммах 13–16. Если при повторной попытке включения электродвигателя указанный выше эффект повторяется, то это значит, что датчики тока были подключены верно, причина перекаса – неисправность электродвигателя или подводящего кабеля.

Схема подключения блока защиты УБЗ-301 приведена на рисунке 6.37.

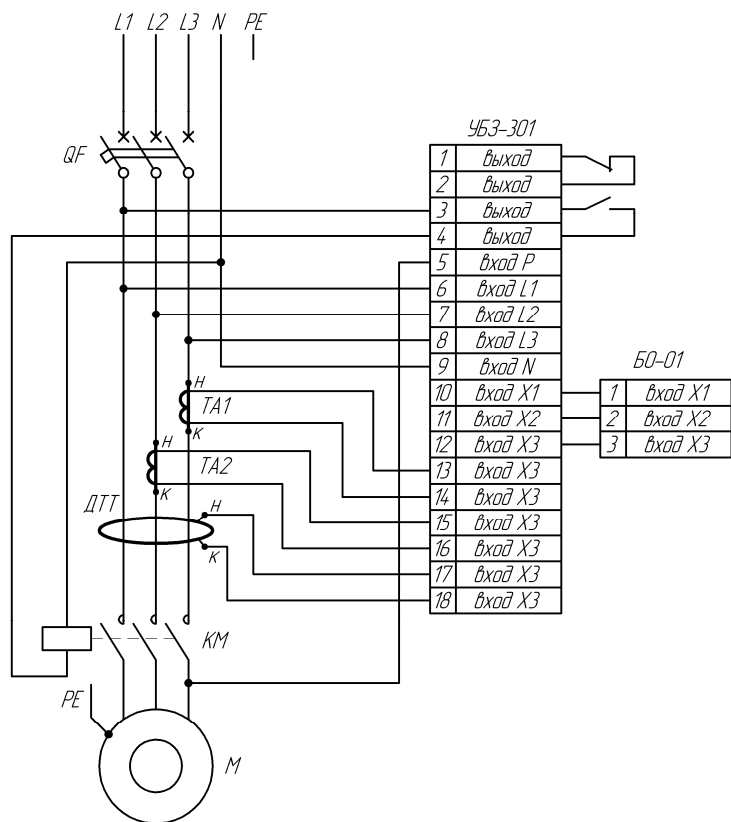


Рисунок 6.37 – Схема подключения блока защиты УБЗ-301:
 МП – магнитный пускатель; ДТТ – дифференциальный трансформатор тока;
 ТА1, ТА2 – датчики тока; БО-01 – блок обмена и передачи информации

Примечания к схеме:

при необходимости в цепь питания катушки электромагнитного пускателя КМ могут быть включены кнопки «Пуск» и «Стоп»;
 на рисунке 6.37 показано включение КМ на напряжение 220 В.

При питании катушки КМ на напряжение 380 В схема включения аналогична, только питание на катушку КМ подается от двух фаз через контакты 3-4;

при отсутствии блока обмена БО-01 клеммы 10, 11, 12 остаются не задействованными. Через блок обмена БО-01 устройство защи-

ты позволяет осуществлять обмен и передачу информации на ПЭВМ по протоколу RS-485 (БО-01 поставляется под заказ).

Универсальный блок защиты асинхронных электродвигателей УБЗ-302 (Россия, НПП «Новатек-Электро», Санкт-Петербург) предназначен для постоянного контроля параметров работы трехфазного электрооборудования (в первую очередь трехфазных асинхронных электродвигателей). Он позволяет производить постоянный контроль сетевого напряжения, действующих значений фазных (линейных) токов, потребляемой мощности, напряжений и токов прямой и обратной последовательности, сопротивления изоляции на корпус, дифференциальных токов утечки на землю (токов нулевой последовательности), температурных режимов работы.

Блок предназначен для широкого применения в инженерных системах зданий и сооружений (отопление, вентиляция, водоснабжение, кондиционирование), АСУ ТП и системах промышленной автоматизации, контроля, учета и диспетчеризации.

Он имеет полный набор защит, реализованных в универсальном блоке защит УБЗ-301. Дополнительно обеспечивает защиту от затяжного пуска и блокировки ротора электродвигателя, осуществляет контроль нагрева обмоток электродвигателя с помощью температурных датчиков.

Общий вид блока защиты УБЗ-302 изображен на рисунке 6.38.



Рисунок 6.38 – Общий вид универсального блока защиты УБЗ-302

Блок защиты УБЗ-302 имеет встроенные трансформаторы тока, поэтому проводники питания электродвигателя пропускаются через специальные отверстия в корпусе устройства.

Наличие второго выходного реле управления обеспечивает возможность организации следующих дополнительных режимов работы:

переключения «звезда – треугольник»;

включение с «отложенным пуском» (например, каскадное включение электродвигателей);

реле дистанционной сигнализации.

Блок защиты УБЗ-302 имеет цифровые индикаторы, набор уставок производится с помощью 4 кнопок. Это упрощает настройку параметров блока защиты.

Универсальный блок защиты двухскоростных асинхронных электродвигателей УБЗ-302-01 (Россия, НПП «Новатек-Электро», Санкт-Петербург) предназначен для защиты двухскоростных (двухобмоточных) электродвигателей, постоянного контроля параметров сетевого напряжения, действующих значений фазных (линейных) токов, проверки значения сопротивления изоляции электродвигателей.

Общий вид блока защиты УБЗ-302-01 изображен на рисунке 6.39.



Рисунок 6.39 – Общий вид универсального блока защиты УБЗ-302-01

Блок защиты УБЗ-302-01 обеспечивает защиту асинхронных двухскоростных электродвигателей, имеющих номинальные токи от 5 до 50 А с помощью встроенных трансформаторов тока.

Блок защиты УБЗ-302-01 имеет полный набор защит, реализованных в блоке УБЗ-302. Набор тех или иных параметров защиты определяет пользователь путем программирования прибора. По каждому типу защиты возможен запрет или разрешение автоматического повторного включения (АПВ) нагрузки.

• **Микропроцессорные реле защиты электродвигателей серии РЗ-01** (Беларусь, ООО «Энситех», г. Минск) предназначены для защиты электродвигателей, управляемых электромагнитными пускателями (контакторами) от работы в аварийных состояниях и режимах работы [120].

• В основе функционирования реле защиты электродвигателей РЗ-01 (далее – реле) положен принцип постоянного отслеживания режима работы электродвигателя по значениям потребляемых токов, вычисления тепловых импульсов при быстрых изменениях тока, вычисления температуры обмотки и некоторых других параметров в режиме реального времени и отключения нагрузки при превышении измеренными и вычисленными значениями заданных уставок.

Информация о значениях потребляемых электродвигателем токов поступает на входы реле от трансформаторов тока, установленных в проводах питания защищаемого электродвигателя. Кроме того, для определения состояния электродвигателя (включен или отключен) в логическую часть реле через оптоэлектронную гальваническую развязку вводится напряжение с обмотки электромагнитного пускателя, а для своевременной реакции на пропадание сетевого питания – напряжение питающей сети. Полученная с входов оперативная информация обрабатывается микроконтроллером № 1 с периодичностью 10 мс и по окончании этого периода передается для анализа и принятия решения в микроконтроллер № 2, который для принятия решения об отключении электродвигателя в соответствии с запрограммированным алгоритмом использует уставки, введенные пользователем с клавиатуры и сохраняемые в энергонезависимой памяти. Включение и выключение электромагнитного пускателя микроконтроллер № 2 производит через электрон-

ный ключ и электромагнитное реле. Отдельной функцией данного микроконтроллера является вывод данных о состоянии двигателя на светодиодные индикаторы, реле сигнализации и жидкокристаллический индикатор.

При включении реле автоматически проводит установку всех устройств и программы в исходное состояние, проводит проверку значений уставок на соответствие контрольной сумме и производит самотестирование. Самотестирование включает контроль исправности системы питания и измерительного тракта реле. При наличии неисправности реле блокирует возможный пуск электродвигателя и выдает код неисправности на индикатор. В процессе работы реле самотестирование повторяется периодически каждые 12,5 мс.

При пуске электродвигателя (нажатии кнопки «ПУСК» на кнопочной станции) через замкнутую исполнительную цепь включается электромагнитный пускатель электродвигателя. Реле получает информацию о пуске и начинает контроль режимов работы. При превышении допустимых значений реле срабатывает.

При срабатывании любого вида защиты реле выполняет следующие процедуры:

- размыкается цепь управления электромагнитного пускателя;
- включается индикация «Защита сработала»;
- включается реле дистанционной сигнализации срабатывания защиты;
- включается индикация вида сработавшей защиты;
- снимается запрет на просмотр и изменение уставок;
- в оперативную память переписываются последние расчетные и измеренные значения параметров. При срабатывании защиты по однофазному замыканию на землю включается реле дистанционной сигнализации о срабатывании этого вида защиты.

При санкционированном отключении электродвигателя (нажатие кнопки «Стоп») выполняются следующие процедуры:

- снимается запрет на просмотр и изменение уставок;
- при переходе в режим просмотра и изменения уставок включается индикация «Блокировка».
- При отключении питающей сети все последние расчетные и измеренные значения параметров переписываются в энергонезави-

симумую память; работоспособность реле поддерживается не менее 0,5 с после отключения сети.

Реле регистрирует пуски электродвигателя в счетчике пусков. Регистрируются как завершенные (удачные) пуски, так и незавершенные, закончившиеся срабатыванием защиты.

После заполнения счетчика (999 пусков) очередной пуск обнуляет счетчик.

Алгоритм функционирования реле в режимах перегрузки следующий. При пуске электродвигателя реле контролирует продолжительность процесса пуска и кратность тока перегрузки. Под пуском понимается процесс, продолжающийся от момента включения цепи управления электромагнитным пускателем до снижения значения тока электродвигателя после пусковой перегрузки к величине $1,05I_{ном}$. При превышении заданной уставками продолжительности или кратности пуска реле отключает электродвигатель. Если в течение 0,25 с после попытки пуска электродвигателя реальный пуск не начался (отсутствует пусковой ток, что возможно, например, при несрабатывании электромагнитного пускателя), реле также отключает его.

Тепловая защита функционирует следующим образом. В течение всего времени работы электродвигателя реле контролирует потребляемый им ток и рассчитывает условную температуру, базирясь на введенной уставке. Уставка ($t_{6,доп}$) характеризует инерционность нагрева электродвигателя. При перерывах в работе электродвигателя реле рассчитывает охлаждение электродвигателя исходя из уставки, характеризующей инерционность охлаждения электродвигателя ($T_{охл}$). Условие срабатывания тепловой защиты – превышение условной температуры 140 °С.

При достижении расчетной температуры значения установленного пользователем уровня температуры предупредительной сигнализации $\theta_{сигн}$ срабатывает соответствующая индикация на лицевой панели реле, замыкаются контакты для коммутации внешних цепей предупредительной сигнализации.

Защита от максимального тока функционирует следующим образом. После завершения пуска в течение всего времени работы

электродвигателя реле выявляет максимальное (по фазам) значение тока потребления. При наличии перегрузок выше $2I_{\text{ном}}$ отслеживает этот режим в реальном времени (не реже, чем через 10 мс) и вычисляет нарастающий с начала перегрузки тепловой импульс – величину, пропорциональную квадрату величины перегрузки и времени, сравнивая их значения с максимально допустимыми значениями. При превышении тепловым импульсом значения, рассчитанного по уставкам $I_{\text{макс доп}}$ и $t_{\text{макс доп}}$, реле срабатывает.

В случае превышения током величины уставки $I_{\text{макс доп}}$, реле сработает без выдержки времени (по отсечке).

Защита от асимметрии нагрузки (обрыва фазы) функционирует следующим образом. Каждые 250 мс реле вычисляет коэффициент асимметрии (отношение разности максимального и минимального значений тока по фазам к максимальному значению) и при его превышении величины 0,25 начинает вычислять фактор асимметрии – величину, интегрирующую коэффициент асимметрии по времени. При достижении фактором асимметрии критической величины защита срабатывает. Максимальное быстроедействие защиты по асимметрии реализуется при коэффициенте асимметрии равном 1, то есть при обрыве фазы. Максимальную выдержку времени реле обеспечивает при коэффициенте асимметрии равном 0,25. При меньших величинах коэффициента асимметрии реле не срабатывает.

Защита от холостого хода обеспечивается отключением электродвигателя при снижении потребляемого им тока ниже значения уставки $I_{\text{хх доп}}$ (потеря электродвигателем нагрузки), если это снижение продолжалось дольше установленного времени $t_{\text{хх доп}}$. Пользователь имеет возможность отключить эту функцию, задав уставку $I_{\text{хх доп}} = 0$.

Защита от тока однофазного замыкания на землю обеспечивает сигнализацию о превышении тока однофазного замыкания на землю (тока нулевой последовательности) и отключение электродвигателя, если это превышение продолжалось дольше установленного времени $t_0 \text{ доп}$. Пользователь может отключить функцию от-

ключения электродвигателя (оставив функцию сигнализации), задав уставку $I_0 \text{ доп} = 0$.

Микропроцессорные реле защиты РЗ-01 электродвигателя выпускаются нескольких типоразмеров. На рисунке 6.40 изображён внешний вид реле РЗ-01-06.



Рисунок 6.40 – Общий вид реле защиты РЗ-01-06, установленного на панели

Реле защиты РЗ-01-06 защищает в следующих аварийных состояниях и режимах работы:

- токовые перегрузки при пуске и рабочем режиме;
- кратковременные и длительные тепловые перегрузки (по тепловой модели);
- асимметрия токов и неполнофазный режим работы;
- потеря нагрузки.

Встроенный ЖК-дисплей позволяет отображать текущие и аварийные значения токов, напряжений и других параметров. В энергонезависимой памяти РЗ-01-06 сохраняются параметры 32 последних аварийных событий. Наличие в реле защиты интерфейса RS 485 позволяет использовать РЗ-01-06 как устройство нижнего уров-

ня для построения системы АСУТП. Реле РЗ-01-06 функционирует совместно с внешними трансформаторами тока при номинальных токах электродвигателя более 5 А. Номинальный входной ток реле составляет 2–5 А, диапазон входных токов 0,1–75 А, допустимый ток перегрузки – 300 А в течение 1 с.

Схема электрических подключений реле защиты РЗ-01-06 приведена на рисунке 6.41.

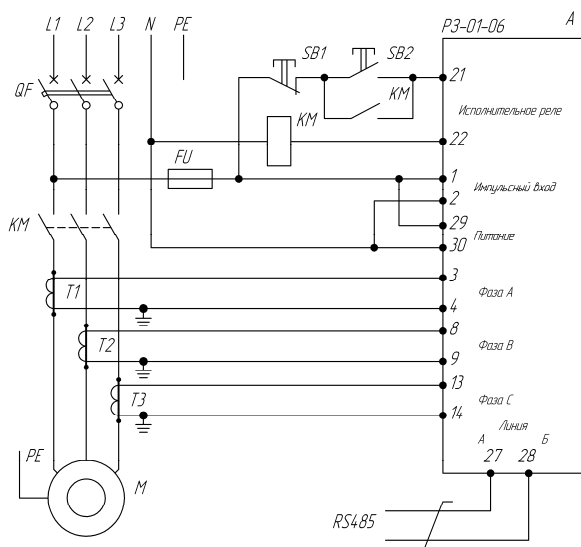


Рисунок 6.41 – Схема электрических подключений реле защиты РЗ-01-06

Реле предназначено для эксплуатации в районах с умеренным и холодным климатом в закрытых помещениях, при температурах – от -20°C до $+55^{\circ}\text{C}$. Степень защиты реле – IP64.

● Реле защиты РЗ-04-05 (ООО «Энситех», г. Минск) является современным электротехническим изделием и представляет собой комбинированный многофункциональный прибор, объединяющий функции управления, защиты, отображения параметров электропривода.

Реле защиты РЗ-04-05 (далее – реле) рекомендуется использовать для автоматического управления и защиты трехфазных асинхронных электродвигателей мощностью от 1 до 110 кВт.

Реле защиты имеет внешний вид, изображенный на рисунке 6.42.



Рисунок 6.42 – Внешний вид реле защиты РЗ-04-05

Функции защиты реле РЗ-04-05 следующие:

- 1) междуфазные и однофазные короткие замыкания и защита от превышения тока при пуске электродвигателя;
- 2) превышение допустимого времени пуска;
- 3) заклинивание ротора;
- 4) перегрузка электродвигателя;
- 5) потеря нагрузки;
- 6) асимметрии токов;
- 7) обрыв фазы;
- 8) превышение числа пусков;
- 9) максимальное и минимальное напряжения;
- 10) отключение электродвигателя при пониженном сопротивлении изоляции;
- 11) защита от превышения или снижения заданного уровня на аналоговом входе;
- 12) защита от обрыва линий аналогового входа;
- 13) блокировка повторного включения.

Реле обеспечивает «Ручной», «Дистанционный» и «Автоматический» режимы управления.

Реле обеспечивает также отсчет реального времени. В нем имеется счетчик наработки электродвигателя. Реле позволяет в реаль-

ном времени контролировать текущие параметры подключенного электродвигателя. Текущие данные включают в себя токи по трем фазам, напряжение фазы А, небаланс токов, значение активной мощности, срабатывание защит, блокировки, время наработки электродвигателя, запас пусков в течение часа, время до разрешения очередного пуска в случае превышения числа пусков в час, значение величины по аналоговому входу, текущее время и дату.

При аварийном отключении электродвигателя реле сохраняет аварийные данные на момент срабатывания защит. В архиве сохраняются данные 4-х последних срабатываний.

Реле обеспечивает передачу по интерфейсу данных из архивов в компьютер, может быть включено в информационно-управляющую систему.

После подачи напряжения питания реле проводит самодиагностику, в процессе которой происходит контроль правильности уставок и сохранности информации в памяти. При обнаружении ошибки светодиод «Авария» непрерывно светится красным цветом. Ввод и просмотр уставок осуществляется с помощью кнопок реле или с помощью персонального компьютера. После изменения уставок реле проверяет принадлежность их допустимому диапазону значений.

Номинальный ток реле – 5 А. Измерительный диапазон токов – от 0,2 до 50 А. Погрешность измерения токов – $\pm 2\%$ в диапазоне токов 0,5–12,5 А и $\pm 5\%$ в остальном диапазоне. Реле применяется с внешними трансформаторами тока. Выбор трансформаторов тока проводится по значению номинального тока электродвигателя. Первичный ток выбранного трансформатора должен составлять 100–200 % от номинального тока защищаемого электродвигателя. Вторичный ток трансформатора, подаваемый на реле при номинальной нагрузке электродвигателя, должен находиться в диапазоне 1–5 А.

Реле предназначено для эксплуатации в районах с умеренным и холодным климатом в закрытых помещениях при температурах от $-20\text{ }^{\circ}\text{C}$ до $+55\text{ }^{\circ}\text{C}$. Степень защиты оболочки реле – IP20 по ГОСТ 14254-80. Климатическое исполнение реле УХЛ1 3.1 по ГОСТ 15150-69.

Разработано несколько модификаций реле РЗ-04, отличающихся различными функциями защиты.

Схема подключения реле РЗ-04-05 изображена на рисунке 6.43.

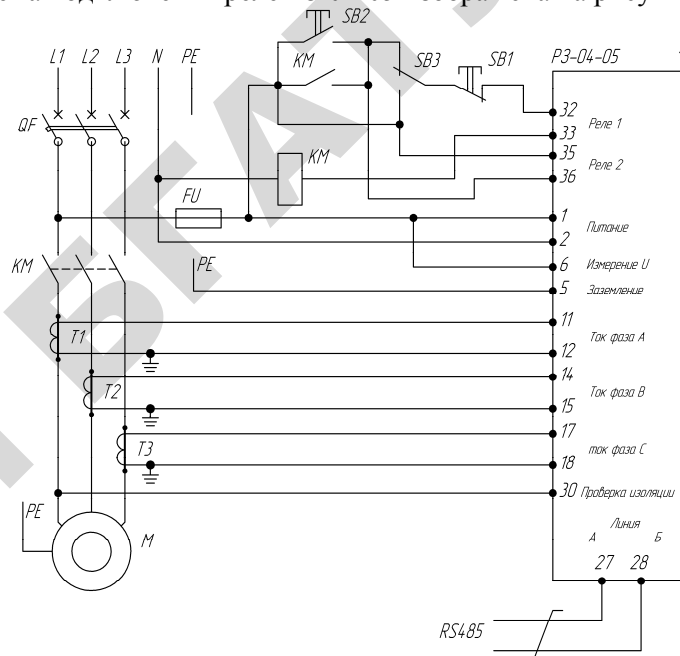


Рисунок 6.43 – Схема электрических подключений реле защиты РЗ-04-05

• **Устройство защиты электродвигателя УЗДР-8** (Россия, ООО «Крейтек», Санкт-Петербург) является малогабаритным сигнально-командным устройством, предназначенным для защиты электродвигателей [121].

Устройство защиты электродвигателя УЗДР-8 (далее – прибор) выдает команду на отключение при возникновении следующих нештатных ситуаций:

- неверный порядок следования фаз;
- обрыв фазы;
- выход напряжения за установленные пределы;
- перекос напряжения на фазах;
- перекос по току потребления фаз;
- выход тока потребления за установленные пределы;
- перегрев обмотки статора электродвигателя или защищаемого объекта.

Прибор формирует предварительную команду на запрет включения нагрузки (блокировка пуска) в следующих случаях:

- неверный порядок следования фаз;
- повышенная утечка изоляции обмотки статора электродвигателя или кабеля, соединяющего электромагнитный пускатель с электродвигателем или нагрузкой;
- обрыв фазы;
- выход напряжения за установленные пределы;
- перекос напряжения на фазах;
- перегрев обмотки статора электродвигателя или защищаемого объекта.

Внешний вид устройства защиты УЗДР-8 изображен на рисунке 6.44.



Рисунок 6.44 – Внешний вид устройства защиты УЗДР-8 и блока датчиков тока

Диапазон рабочих токов с трансформаторами тока ASM-100 составляет 5–100 А. Время подготовки устройства к работе после включения составляет не более 5 с, а после срабатывания защиты – не более 20 с. Температура аварийного отключения электродвигателя регулируется от 10 °С до 125 °С.

Точность показаний прибора – не ниже 5 % . Допустимая температура окружающей среды – от –25 °С до +50 °С непрерывно светится, масса прибора – не более 0,12 кг.

Конструктивно прибор выполнен в ударопрочном пластмассовом корпусе, состоящем из основания и крышки. На крышке прибора находится лицевая панель с шестиразрядным семисегментным индикатором и четырьмя кнопками управления. Внутри корпуса находится микропроцессорная система, контролирующая параметры питающей сети и состояние электродвигателя.

Устройство защиты электродвигателя разделено на два модуля: датчиков тока и электронный. Модуль датчиков содержит в своем составе три трансформатора тока и схему, передающую информацию в электронный модуль. Кроме этого сигнала к электронному модулю подключаются провода питающей сети, термодетектора, блока контроля сопротивления изоляции и блока исполнительного устройства. На лицевой панели устройства защиты электродвигателя расположены кнопки управления и индикаторная панель, отображающая режимы работы и причины аварийных состояний системы.

После включения устройства защиты электродвигателя оно проверяет напряжения фаз сети, порядок их чередования и ток утечки в электродвигателе. Если эти параметры соответствуют норме, то электродвигатель начинает нормально работать. В противном случае универсальное устройство защиты запрещает включение электродвигателя и индицирует причину аварии на табло. В дальнейшем, в процессе работы, измеряется напряжение сети, ток, протекающий по каждой фазе, и температура обмотки. Если значения указанных величин выходят за пределы, установленные пользователем, или произойдет обрыв фазы, то устройство защиты электродвигателя отключает его, индицируя на табло причину аварии.

Предельно допустимые сопротивление изоляции (300 кОм) и температура превышения обмотки (80–90 °С) записаны в память устройства и могут быть изменены производителем по требованию заказчика. Прибор УЗДР-8, рассчитанный на работу с электродвигателями мощностью до 60 кВт (5–100 А), комплектуется трансформаторами тока типа ASM-100.

• ООО «СибЭлектроЗащита» (Россия, г. Красноярск) является изготовителем и поставщиком **реле контроля и защиты РКЗМ-R** [122].

Реле поставляется взамен ранее разработанных реле типа РКЗ, РКЗМ-I, РКЗМ-II. Оно аналогично им по функциональным и техническим характеристикам, но обладают следующими техническими преимуществами:

- усовершенствованной конструкцией датчиков тока с увеличенной перегрузочной способностью по току;
- наличием встроенного индикатора причины аварийного отключения на панели реле, что позволяет в экстренных ситуациях оперативно определять причину аварии, не пользуясь пультом;
- повышенной устойчивостью к перенапряжениям сети;
- при подаче питающего напряжения на реле перед включением электродвигателя производится оценка сопротивления изоляции и включение происходит только в том случае, если сопротивление изоляции в норме. Если сопротивление изоляции не в норме ($<500 \text{ кОм} \pm 10 \%$), то через 10 с на контакт аварийной сигнализации поступает непрерывный сигнал, извещающий о невозможности включения электродвигателя. На время оценки сопротивления изоляции индикатор «РАБОТА» мигает с периодом 0,1 с.

Реле изготавливается в исполнении УХЛ категории 3 по ГОСТ 15150-69. Общий вид устройства защиты РКЗМ-250-R с датчиками тока изображен на рисунке 6.45.



Рисунок 6.45 – Общий вид устройства защиты РКЗМ-250-R с датчиками тока

Реле осуществляет контроль токов в трех фазах обслуживаемой электроустановки и при выявлении аварийных режимов отключает ее.

Отключение, с одновременным отображением типа аварии соответствующим ему индикатором, происходит в следующих аварийных ситуациях:

- при перегрузке по току;
- при недогрузке по току;
- при обрыве любой фазы;
- при недопустимом перекосе фаз по току.

Реле изготавливаются пяти номиналов, на токи 25, 50, 250, 500 и 900 А.

Реле оборудовано электронным ключом для управления внешним устройством аварийной сигнализации. Реле предназначено для работы совместно с пультом управления ПУ-02 (входит в комплект поставки по требованию заказчика).

Реле изготавливается в исполнении УХЛ категории 3 по ГОСТ 15150 и предназначено для работы при температуре окружающей среды от $-40 \text{ }^\circ\text{C}$ до $+40 \text{ }^\circ\text{C}$ при относительной влажности до 98 % при $25 \text{ }^\circ\text{C}$.

Пределы контролируемых токов в каждой из трех фаз электроустановки: РКЗМ-25-R – от 2 до 25 А, шаг 0,1 А; РКЗМ-50-R – от 5 до 50 А, шаг 0,2 А; РКЗМ-250-R – от 20 до 250 А, шаг 1 А; РКЗМ-500-R – от 40 до 500 А, шаг 2 А; РКЗМ-900-R – от 80 до 900 А, шаг 4 А.

Время задержки срабатывания при отключении и пуске регулируется в пределах от 3 до 250 с.

Время задержки срабатывания при обрыве фазы фиксировано и составляет (3 ± 1) с.

Реле регистрирует и сохраняет в памяти значения контролируемых токов и режимных уставок на момент отключения, а также сохраняет информацию о причине аварии.

Реле регистрирует и сохраняет в памяти неограниченное время информацию о количестве и причинах аварийных отключений. Максимальное число регистрируемых аварийных отключений – 255.

Реле имеет режим автоматического отключения электроустановки через заданный интервал времени, регулируемый в пределах от 1 до 255 минут.

• **Микропроцессорный блок защиты БЗ-031М** (Россия, «Электротрейд», г. Липецк) [123] предназначен для отключения

трехфазных асинхронных электродвигателей от питающей сети в следующих аварийных состояниях:

- недопустимой перегрузке по току;
- потере нагрузки («сухой» ход – для погружных насосов, холостой ход – для любых других механизмов);
- перекосе фаз по току;
- обрыве или пропадании любой из фаз;
- блокировке электродвигателя между пусками;
- контроле количества срабатываний по обрывам фаз и перегрузкам.

Диапазон рабочего тока: 0–200 А; 100–900 А.

Блок защиты БЗ-031М имеет металлический корпус. Преимущества металлического корпуса заключаются в повышенной защищенности, обеспечении необходимой механической прочности, естественной защиты от внешних электромагнитных, электрических и климатических помех. Корпус имеет специальный контакт заземления. Степень защиты корпуса – IP54.

Блоки защиты БЗ-031М укомплектованы выносными датчиками тока с гальванической развязкой. Преимуществом датчиков является наличие всего двух диапазонов: 0–200 А и 100–900 А.

Общий вид блока защиты электродвигателей изображен на рисунке 6.46.



Рисунок 6.46 – Общий вид блока защиты электродвигателей

На лицевой панели корпуса БЗ расположен двухстрочный ЖКИ (оперативное отображение аварийного отключения на русском языке) и клавиатура управления блоком.

Фильтр питания выдерживает броски напряжения до 470 В.

В блоках защиты предусмотрена возможность сопряжения с дистанционным индикатором (по предварительному согласованию) и подача звукового сигнала при срабатывании.

Блоки защиты БЗ-031М изготавливаются в климатическом исполнении УХЛ и используются для установки в шкафах управления. Они предназначены для эксплуатации в следующих условиях:

- окружающая среда – взрывобезопасная и не содержащая агрессивных газов и паров в концентрациях, разрушающих металлы и изоляцию;
- температура воздуха от 0 °С до +80 °С или от –20 °С до +80 °С (в зависимости от модификации). Степень защиты корпуса блока защиты – IP54.

• **Комплектное микропроцессорное устройство защиты СиЭЗ-1М** выпускается НПО «Бинар», г. Витебск [111]. Оно предназначено для защиты трехфазных электродвигателей с номинальным (рабочим) током от 80 до 650 А (ориентировочной мощностью от 45 до 315 кВт) при следующих аварийных режимах:

- обрыв любой из фаз;
- недопустимая асимметрия фазных токов;
- увеличение тока электродвигателя сверх номинального рабочего значения из-за электрических или технологических перегрузок;
- заклинивание ротора электродвигателя;
- понижение сопротивления изоляции обмоток;
- перегрев обмоток электродвигателя или подшипников.

Устройства защиты СиЭЗ-1М в зависимости от номинального (рабочего) тока защищаемого электродвигателя выпускаются в следующих исполнениях:

СиЭЗ-1М-80-220 – на номинальный ток электродвигателя 80–220 А;

СиЭЗ-1М-180-370 – на ток 180–370 А;

СиЭЗ-1М-330-520 – на ток 330–520 А;

СиЭЗ-1М-480-650 – на ток 480–650 А.

Устройство имеет выход для подключения внешних устройств индикации режима «АВАРИЯ». Пороги срабатывания (временные и токовые уставки) следующие:

при увеличении тока электродвигателя в 1,3 раза от номинального (рабочего) значения система производит его отключение за 90 с; в 1,5 раза – за 30 с; в 2 раза – за 20 с; в 2,5 раза – за 16 с; в 3,5 раза – за 12 с; в 4 раза – за 8 с; в 5 раз – за 4 с. При обрыве любого фазного проводника электродвигатель отключается за время не более 3 с.

Внешний вид устройства защиты СиЭЗ-1М изображен на рисунке 6.47, а датчиков тока – на рисунке 6.48.



Рисунок 6.47 – Внешний вид устройства защиты СиЭЗ-1М



Рисунок 6.48 – Датчики тока устройства защиты СиЭЗ-1М

Настройка системы защиты производится на номинальный (рабочий) ток электродвигателя с последующим контролем за его изменением по всем трем фазам одновременно с помощью выносных датчиков тока. Режимы работы и перегрузок отслеживаются с помощью светодиодных индикаторов.

Устройство защиты СиЭЗ-1М способно работать при температуре от $-20\text{ }^{\circ}\text{C}$ до $+50\text{ }^{\circ}\text{C}$.

Принципиальная электрическая схема включения устройства защиты СиЭЗ-1М в электрическую сеть изображена на рисунке 6.49.

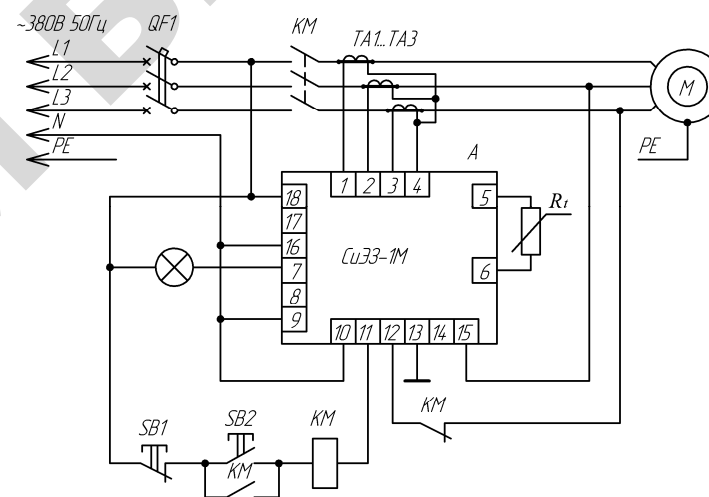


Рисунок 6.49 – Принципиальная электрическая схема включения устройства защиты СиЭЗ-1М в электрическую сеть

НПО «Бинар» выпускает микропроцессорное устройство защиты СиЭЗ-2М. Оно имеет выносные датчики тока, встроенную клавиатуру и ЖК-индикатор, который показывает значения токов фаз и причину аварии (при ее возникновении). Предусмотрена возможность программирования параметров защиты. Устройство обеспечивает запоминание даты, времени и причины отключения электродвигателя.

Устройство защиты СиЭЗ-2М предназначено для защиты трехфазных асинхронных электродвигателей с короткозамкнутым или фазным роторами мощностью от 3 до 45 кВт (исполнение СИЭЗ-

2М-5-100) и мощностью от 35 до 110 кВт (исполнение СИЭЗ-2М-50-230) в следующих случаях:

- технологических перегрузках, включая заторможенный ротор;
- предпусковой контроль наличия фаз электросети;
- обрыв фазы;
- недопустимая асимметрия фазных токов;
- низкое сопротивление изоляции электродвигателя;
- защита по минимальному рабочему току;
- перегрев обмотки электродвигателя или подшипников;
- ограничение количества повторных пусков и временных интервалов между пусками.

Настройка устройства осуществляется при помощи программы установки параметров. Настройка позволяет установить номинальный ток электродвигателя, включать (отключать) контроль защит, производить настройку временных и количественных параметров защит, просматривать журнал событий, стирать журнал событий, установить часы-календарь.

Устройство защиты сохраняет последние аварийные значения тока в каждой фазе; регистрирует и сохраняет даты, время, причины каждого рабочего или аварийного включения (отключения) электродвигателя в архиве данных (до 10000 событий); обеспечивает возможность просмотра архива, его стирание. Устройство защиты работоспособно в диапазоне температур от $-10\text{ }^{\circ}\text{C}$ до $+50\text{ }^{\circ}\text{C}$. Габаритные размеры – не более $140 \times 90 \times 70$ мм, масса – не более 0,4 кг.



Рисунок 6.50 – Внешний вид устройства защиты СИЭЗ-2М

Среди устройств защиты электродвигателей наиболее известны устройства, описанные выше. Принцип токовой защиты везде одинаков. Все устройства содержат датчики тока определенной конструкции, электронный или микропроцессорный блок, контролирующий токовый режим, и исполнительный орган в виде электронного ключа или реле, выдающего сигнал на отключение контактора. Будучи аналогичными по принципу действия, устройства существенно отличаются по совокупности схемотехнических и конструктивных решений.

Одни устройства содержат определенное количество элементов, имеющих механический контакт (или разъемных соединений). В сравнении с этими другие устройства защиты содержат минимум элементов с механическими контактами (или разъемных соединений). Надежность реле при этом повышается.

Сравнение микропроцессорных комплексных защит электродвигателей по показателям приведено в таблице 6.7.

Таблица 6.7 – Сравнение микропроцессорных комплексных защит электродвигателей по показателям

Показатели устройств защиты	ЗРВ12	РДЦ-01	УБЗ-301	РЗ-01-06	РЗ-04-05	БЗ-031М	РКЗМ-Р	УЗ/ДР-8	СИЭЗ-1М	СИЭЗ-2М
1. Предпусковой контроль сети		+	+					+		+
2. Предпусковой контроль $R_{из}$			+		+		+	+	+	+
3. Перегрузка	+	+	+	+	+	+	+	+	+	+
4. Неполнофазный режим	+	+	+	+	+	+	+	+	+	+
5. Заторможенный ротор	+	+	+	+	+	+	+	+	+	+
6. Асимметрия по току или напряжению	+	+	+	+	+	+	+	+	+	+
7. Контроль перегрева по тепловой модели			+	+	+					

Окончание таблицы 6.7

Показатели устройств защиты	ЗРВ12	РДЦ-01	УБЗ-301	РЗ-01-06	РЗ-04-05	БЗ-031М	РКЗМ-Р	УЗДР-8	СиЭЗ-1М	СиЭЗ-2М
8. Контроль перегрева с термодетекторами	+							+	+	+
9. Контроль минимальной нагрузки		+	+	+	+	+	+	+		+
10. Контроль тока утечки на корпус при работе АД	+		+							
11. Измерение тока в 3 фазах	+	+		+	+		+	+	+	+
12. Цифровой индикатор		+		+	+	+		+		+
13. Пульт связи			+			+	+			
14. Интерфейс			+	+	+			+		
15. Мониторинг сети и событий		+	+	+	+	+	+	+		+
16. Допустимая температура равна или ниже минус 25 °С		+	+					+		
17. Степень защиты корпуса не ниже IP54				+		+				

В большинстве устройств защиты электродвигателей используются регуляторы уставок на потенциометрах. Общеизвестны недостатки потенциометров – нестабильность во времени и в диапазоне температур, чувствительность к ударам и вибрациям, что может приводить к неконтролируемому изменению уставок в процессе эксплуатации. Лучшие показатели будут иметь устройства защиты, в которых использован способ электронной цифровой записи уставок, в связи с чем они в принципе не подвержены колебаниям, что обеспечивает максимальную точность и стабильность работы реле защиты. Изменить уставки может только специально обученный персонал. Высокая стабильность работы и защита от несанкционированного доступа – важнейшие преимущества хороших устройств защиты.

Существенным недостатком устройств защиты электродвигателей является довольно несовершенные способы настройки уставок. Например, уставка осуществляется по субъективным ощущениям оператора («слабая засветка индикатора», «повернуть рукоятку на 10–20 градусов»). Настройка производится по фактическому (рабочему) току электродвигателя. Такая настройка не может быть точной.

В лучших устройствах защиты применен новый способ настройки уставок режимов – в двоичном коде или в цифрах с использованием светодиодного или жидкокристаллического индикатора. Это в сочетании с цифровой обработкой обеспечивает максимальную точность измерений (до 1,5 %). Высокая точность измерений – важное преимущество цифровых устройств защиты электродвигателя.

Некоторые устройства защиты оснащаются датчиками тока единственного типоразмера, перекрывая широкий диапазон токов. Возникает сомнение по поводу точной работы датчиков тока. Насыщение магнитопровода трансформаторных датчиков тока при значительном увеличении тока приводит к увеличению их погрешности.

Устройства защиты электродвигателя должны иметь простую схему подключения и простую настройку, не требующую для этого вольтметра и «тонкой» отвертки. В этом случае не требуется обслуживающий персонал высокой квалификации.

Существенным недостатком устройств защиты электродвигателей является отсутствие блока проверки сопротивления изоляции обмотки, проверки наличия всех фаз сети, асимметрии напряжений и порядка чередования фаз перед пуском электродвигателя.

Не менее важным является непрерывный контроль сопротивления изоляции обмоток статора во время работы электродвигателя, т. к. диэлектрические свойства изоляции, измеренные до включения электродвигателя, могут внезапно измениться под действием электрического напряжения и температуры.

Наличие микропроцессора делает устройства защиты электродвигателя многофункциональными приборами и обеспечивает такие полезные функции, как сохранение в памяти параметров аварийного отключения, наличие счетчиков аварийных отключений, автоматический сброс защиты через заданное время и некоторые другие, отсутствующие в устройствах с аналоговой схмотехникой.

Микропроцессорные устройства защиты электродвигателей в настоящее время являются наиболее надежными, точными, чувст-

вительными и многофункциональными устройствами токовой защиты в сравнении с известными устройствами защиты, построенными на аналоговой элементной базе электронных компонентов.

6.5. Защита автоматической ненаблюдаемой установки в аварийных состояниях

Понятие «автоматической ненаблюдаемой установки» введено Р. М. Славиным [19]. Предполагается, что такая установка работает в автоматическом режиме, без наблюдения оператора, «под замком». Примером может быть автоматическая насосная станция. Обозначим через *С* систему электроснабжения, через *У* – ненаблюдаемую автоматическую установку (рисунок 6.51).

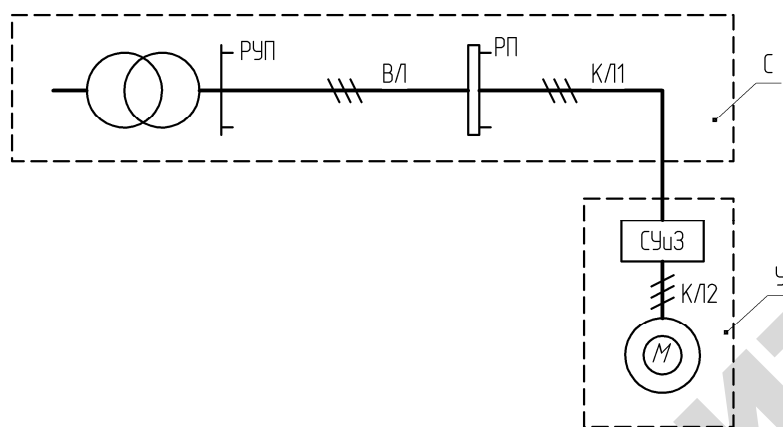


Рисунок 6.51 – Структурная схема электроснабжения автоматической ненаблюдаемой установки:

С – внешняя система электроснабжения; *У* – установка; *М* – электродвигатель;
СУиЗ – система управления и защиты электродвигателя; *РУП* – распределительное устройство подстанции; *РП* – распределительный пункт;
ВЛ – воздушная линия; *КЛ1*, *КЛ2* – кабельные линии

Традиционно роль защиты электроустановки состоит в ее автоматическом отключении при возникновении аварийного состояния. Для первоначального уровня электрификации производства этой роли достаточно. Обслуживающий персонал на этом уровне электрификации способен

восстановить ход технологического процесса после автоматического отключения (включить установку).

При автоматизации производства обслуживающий персонал или отсутствует при выполнении технологического процесса, или не способен изменить ход сложного и быстротечного процесса. Факт срабатывания защиты должен рассматриваться как сложная авария. Очевидно, что неправильные действия защиты должны быть исключены.

В системе *С + У* возможны нарушения. Под последними понимаем события в системе *С* или *У*, при которых должно происходить срабатывание защиты и отключение электродвигателя *М*. Внешние (по отношению к *У*) нарушения происходят в системе *С*, а внутренние – непосредственно в установке *У*. При правильном устройстве системы управления и защиты (*СУиЗ*) все внешние нарушения не связаны с состоянием или режимом работы установки *У*. Они устраняются персоналом, обслуживающим подстанцию, воздушную линию, распределительный пункт. Внешними нарушениями являются:

- 1 – непланируемые отключения питающего напряжения;
- 2 – неполнофазные режимы работы сети;
- 3 – снижение напряжения в сети ниже нормы;
- 4 – асимметрия фаз сети;
- 5 – изменение чередования фаз сети и т. д.

От таких нарушений установку *У* надо защищать. Однако защита от внешних нарушений должна выполняться без запоминания. После устранения внешнего нарушения установка сама и своевременно должна возобновить работу без вмешательства персонала. В противном случае она останется в отключенном состоянии и будет «ждать» прихода персонала. Эта особенность отличает автоматическую установку от неавтоматической.

В случае внутренних нарушений в электроустановке *У* защита должна отключить электроустановку с запоминанием. Только после прихода обслуживающего персонала может быть снято запоминание. После устранения неисправности установка может быть включена в работу.

Пусть в промежутке t_1-t_3 (рисунок 6.52) во внешней системе электроснабжения произошло не планируемое отключение установки, например, насоса.

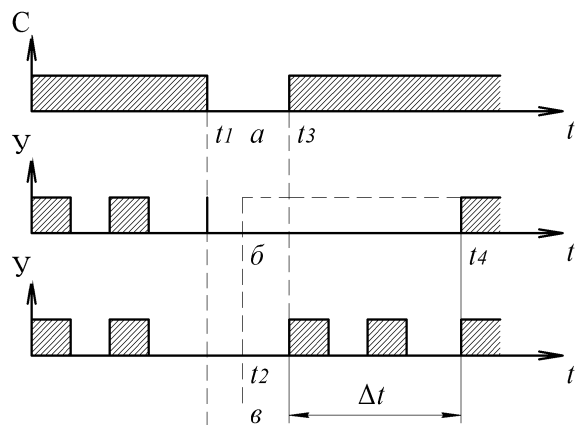


Рисунок 6.52 – Временные диаграммы работы системы электроснабжения (а), системы управления и защиты с запоминанием внешнего нарушения (б), системы управления и защиты без запоминания внешнего нарушения (в):

t_1, t_3 – начало и конец перерыва электроснабжения или потери фазы в сети;

t_2 – требуемый по технологии момент включения установки; t_4 – действительный момент включения установки обслуживающим персоналом; ΔT – дополнительное время бездействия установки, система управления и защиты которой работает с запоминанием внешнего аварийного нарушения

Если уровень воды в башне снизился до минимального уровня и поступила команда в момент t_2 на включение насоса, то он не включится (нет напряжения в сети). В момент времени t_3 электроснабжение восстанавливается. Если защита выполнена без запоминания, то установка включится в момент t_3 , сразу же после включения электроснабжения. Следовательно, простой установки сокращается на время $\Delta T = t_4 - t_3$. Продолжительность этого промежутка зависит от конкретных условий хозяйства и может вызвать прямой технологический ущерб. Например, персонал может обнаружить нарушение электроснабжения в системе водоснабжения только тогда, когда прекратится подача воды. Требуется время, чтобы дойти до установки, включить ее и дожидаться, когда в системе водоснабжения восстановится давление. В результате потребители останутся без воды некоторое время, а это влечет определенные неудобства или прямой материальный ущерб. Если же защита выполнена без запоминания, перерыва в водоснабжении мо-

жет не случиться (если запаса воды в баке хватает на промежуток времени $t_3 - t_2$).

В лаборатории автоматической защиты электрооборудования в БГАТУ разработаны устройства для защиты автоматической ненаблюдаемой установки. В первом устройстве (рисунок 6.53) использованы два независимых блока: БКН (блок контроля напряжения) и БКТ (блок контроля тока). Блок контроля напряжения работает таким образом, что при наличии всех фаз в сети, при допустимой асимметрии напряжений и допустимом отклонении напряжений и прямом чередовании фаз сети выходное реле $KV1$ этого блока включено. Контакт реле $KV1.1$ замыкается в цепи электромагнитного пускателя KM .

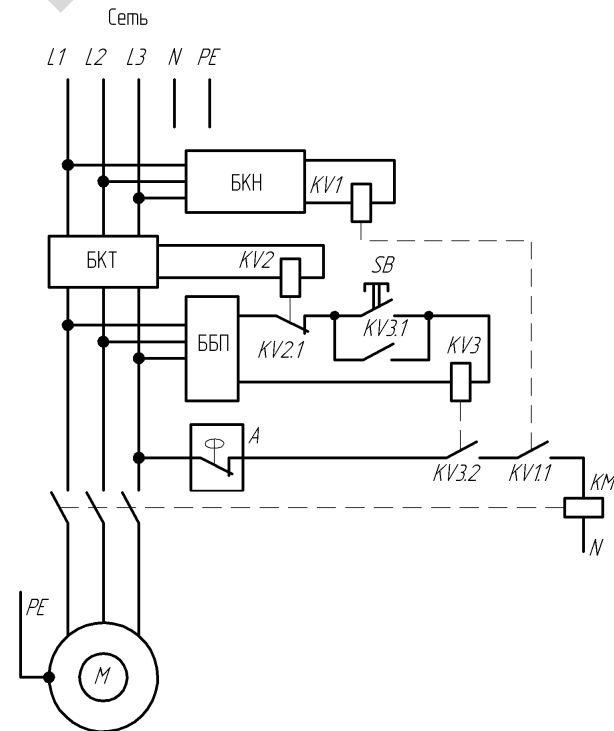


Рисунок 6.53 – Принципиальная электрическая схема первого варианта устройства защиты ненаблюдаемой установки с тремя промежуточными реле:

A – устройство автоматического управления установкой; БКТ – блок контроля тока; ББП – блок бесперебойного питания; БКН – блок контроля напряжения

Блок контроля тока работает таким образом, что при наличии тока всех фаз, при отсутствии перегрузки по току выходное реле *KV2* этого блока отключено.

Устройство защиты содержит также блок бесперебойного питания (ББП), который обеспечивает на выходе постоянное по величине напряжение даже при потере одной или двух фаз в сети.

Включение устройства в работу производится кнопкой *SB*. При этом включается в работу реле *KV3* и становится в режим питания через собственный контакт *KV3.1*. Контакт реле *KV3.2* замыкается в цепи электромагнитного пускателя *KM*, и он включается, электродвигатель запускается.

При аварийном режиме напряжений в сети (неполнофазный режим, асимметрия выше нормы, обратное чередование фаз) реле *KV1* отключается, вызывая отключение электродвигателя от сети. На неполнофазный режим реагирует также блок контроля тока БКТ, но только с некоторой задержкой времени, большей, чем время срабатывания реле *KV1*. Поэтому к моменту срабатывания реле *KV2* электродвигатель будет отключен от сети. Токи электродвигателя не будут протекать через БКТ и реле *KV2* не включится. Как только режим аварийных напряжений исчезает, реле *KV1* и электродвигатель включатся в сеть. Таким образом, устройство не запоминает факта срабатывания блока БКН.

При перегрузке или стопорном режиме электродвигателя на выходе блока БКТ появляется напряжение, достаточное для срабатывания реле *KV2*. Вслед за этим отключаются реле *KV3*, электромагнитный пускатель и электродвигатель. Теперь электродвигатель можно запустить только после нажатия на кнопку *SB*. Так обеспечивается запоминание факта срабатывания защиты по току.

Во втором устройстве вместо реле *KV3* используется логическая схема [124]. Устройство содержит блок питания БП. Выходное реле *KV* совместно с транзистором *VT* образуют исполнительный орган ИО (рисунок 6.54).

Логическая схема ЛС содержит повторители *D1.4*, *D2.2*, элементы 2И-НЕ (*D2.1* и *D1.1*), триггер Т на элементах *D1.2* и *D1.3*, блок А предварительной установки триггера Т в нуль.

При однофазном режиме сети на выходе блока БКН содержится логический 0. На выходе инвертора *D1.4*, *R-S*-триггера и логического элемента *D2.2* присутствует уровень логической 1. Реле *KV*

включено. При работающем двигателе на выходе блока БКТ содержится логический 0.

При аварийном режиме сети, например при отсутствии одной фазы, на выходе блока контроля напряжения БКН и блока контроля тока БКТ появляются сигналы логической 1, отчего на выходе *D1.4* – логический 0, на выходе *D1.1* – логическая 1, на выходе триггера *D1.3* – логическая 1, на выходе *D2.2* – логический 0 и исполнительный орган отключается. Это вызовет отключение электродвигателя от сети.

При появлении трехфазного напряжения на выходе блока контроля напряжения БКН появляется логический 0 и устройство автоматически переходит в исходное состояние, т. е. электродвигатель и исполнительный орган включаются.

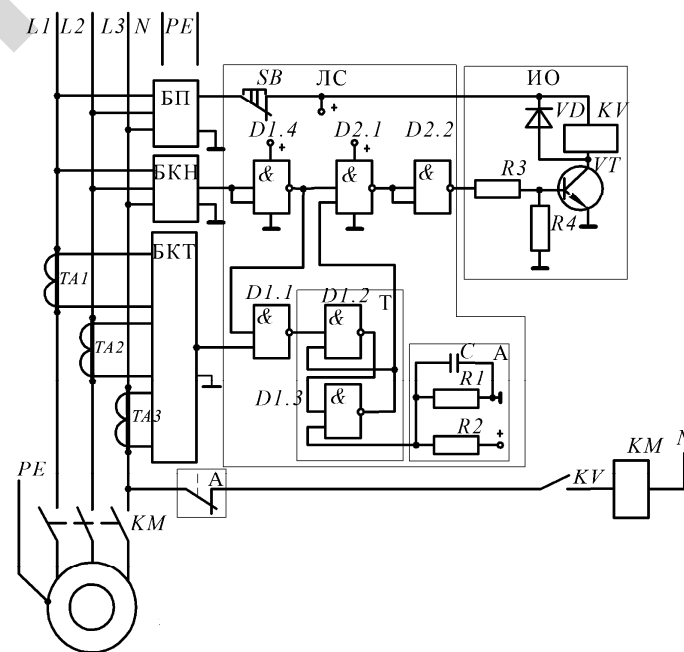


Рисунок 6.54 – Принципиальная электрическая схема второго варианта устройства защиты автоматической ненаблюдаемой установки с логической схемой по авторскому свидетельству № 1413689 СССР

При наличии трехфазного напряжения в сети на выходе БКН держится логический 0. Если исчезнет ток в одной из фаз по причине потери контакта в клеммной коробке, в самом электромагнитном пускателе и т. д., или появится перегрузка по току, то на выходе блока БКТ появится сигнал логической 1. На выходе инвертора *DI.4* присутствует сигнал логической 1, следовательно, на выходе логического элемента *DI.1* будет логический 0. Триггер *R-S* переключится, на его выходе и на выходе логического элемента *D2.2* возникает уровень логического 0. Исполнительный орган (ИО), реле *KV* и электродвигатель отключатся. Этот аварийный режим запоминается. Включить электродвигатель можно только после исправления неисправности и после перевода *R-S*-триггера в исходное состояние с помощью блока *A* предварительной установки, отключив и снова включив питание устройства при помощи кнопки *SB*.

6.6. Комплексные устройства защиты погружных электродвигателей

Большинство предприятий для водоснабжения используют погружные насосы, которые вместе с электродвигателями устанавливаются в скважинах.

Средний срок службы погружных электродвигателей составляет от 1,3–1,5 лет [125] до 2,4 года [1], а погружные насосные установки рассчитаны на 8–10 лет службы.

Основными причинами отказов погружных электродвигателей в сельскохозяйственном водоснабжении являются их аварийные режимы и низкая эксплуатационная надежность защиты. Средняя аварийность погружных электродвигателей составляет около 41–68 % и превосходит аварийность не погружных электродвигателей более чем в четыре раза. Кроме того, выход из строя погружного электродвигателя приводит к большим затратам при ремонте, связанным с подъемом труб и насосного агрегата и последующим монтажом их в скважине. Поэтому проблема повышения эксплуатационной надежности погружных электродвигателей путем совершенствования их защит, диагностики и управления является актуальной.

Автором работы [125] разработаны технические требования к универсальной станции управления и защиты (УСУЗ) погружных электродвигателей:

- 1) необходимость универсальности управления от любых датчиков (электродных, поплавковых, реле давления);
- 2) защита насосного агрегата от «сухого» хода;
- 3) защита электродвигателя от аварийных режимов благодаря применению комплексной защиты;
- 4) контроль сопротивления изоляции погружного электродвигателя.

Разработанная станция управления УСУЗ [125] отличалась от других станций управления наличием блока фазочувствительной защиты ФУЗ-М и блока диагностики технического состояния погружного электродвигателя.

Станция управления УСУЗ использовалась для защиты и управления погружных электродвигателей наряду со станцией КАСКАД, но имела преимущества по надежности работы в аварийных режимах и в обеспечении диагностики электродвигателя. Обе станции управления применяются и в настоящее время, но они морально устарели. Современные станции управления и защиты – микропроцессорные.

Рассмотрим современную станцию управления и защиты СУЗ-2 «РОДНИК» (далее – станция). Она изготавливается ОАО «Завод Промбурвод», г. Минск. Станция предназначена для контроля, управления и защиты погружных электронасосных агрегатов с трехфазным асинхронным электродвигателем мощностью от 1 до 65 кВт [126].

Станция состоит из щита, внутри которого размещена монтажная панель со смонтированной на ней пускозащитной аппаратурой и блоком управления.

Станция управления и защиты имеет две модификации:

СУЗ-2 «РОДНИК» с блоком управления МКР 03М, который позволяет управлять станцией в автоматическом режиме и с помощью местного ручного управления;

СУЗ-2 «РОДНИК-ДС» с блоком управления МКР 03М-ДС, позволяющим, помимо автоматического и местного ручного управления, снимать данные о ее работе с удаленного пульта управления. Управление станцией осуществляется по отдельному каналу связи, подключаемому непосредственно к блоку управления.

Основные технические характеристики станции СУЗ-2 «РОДНИК» приведены в таблице 6.8.

Таблица 6.8 – Основные технические характеристики станции СУЗ-2 «РОДНИК»

Наименование показателя	Значение	
Номинальное напряжение питающей сети, В	400	
Допустимое отклонение питающей сети, %	±15	
Частота тока питающего напряжения, Гц	50±1	
Число фаз	3	
Вид системы заземления	TN-C	
Номинальное напряжение электропитания микроконтроллера, В	~230	
Номинальное напряжение цепей питания датчиков, В	12	
Номинальный рабочий ток пускорегулирующей аппаратуры, А:		
	до 2,2 кВт	16
	от 3 до 11 кВт	40
	от 12 до 32 кВт	80
	45 кВт	125
	65 кВт	160
Сопротивление изоляции главных цепей, не менее, МОм	10	
Габаритные размеры, не более, мм		
	при установленной мощности управляемого электронасосного агрегата	
	$P = \text{до } 32 \text{ кВт}$	400×400×200
	$P = 45 \text{ кВт}$	600×400×200
	$P = 65 \text{ кВт}$	800×600×300
Масса, не более, кг		
	при установленной мощности управляемого электронасосного агрегата	
	до 11 кВт	6
	от 12 до 32 кВт	15
	45 кВт	20
	65 кВт	30

Принцип работы станции основан на обработке блоком управления сигналов, поступающих от внешних управляющих датчиков (датчики «сухого» хода; верхнего и нижнего уровней, электроконтактного манометра, реле давления), и подачи команд на исполнительные устройства для выполнения функций защиты и управления работой электронасосных агрегатов.

Станция (рисунок 6.55) состоит из щита 1 и съемной монтажной панели 2, на которой крепятся DIN-рейка 11, перфорированный кабельный канал 12, клеммная колодка 10 для подключения датчиков.

На DIN-рейку устанавливаются трехфазный 3 и однофазный 5 автоматические выключатели, блок управления 4, электромагнитный пускатель 6, клеммная колодка 8 для подключения нулевой шины.

Между всеми аппаратами, установленными на DIN-рейку, ставятся торцевые фиксаторы 9. В перфорированном кабельном канале располагаются трансформаторы тока 7, силовые и соединительные провода.

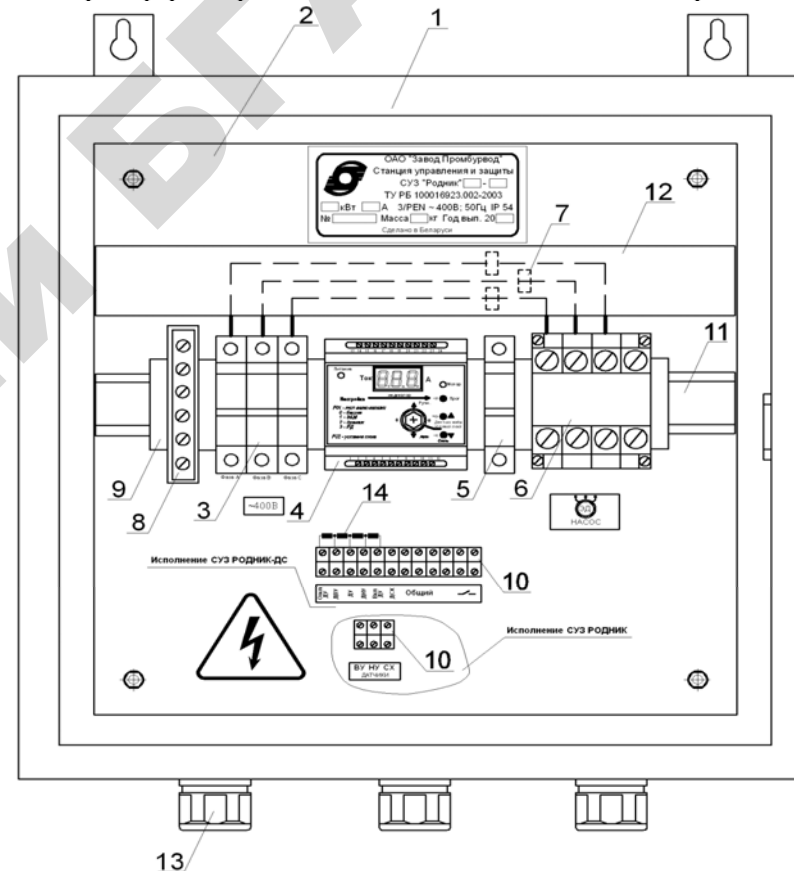


Рисунок 6.55 – Конструкция станции управления и защиты СУЗ-2 «РОДНИК»: 1 – щит; 2 – съемная монтажная панель; 3 – трехфазный магнитный пускатель; 4 – блок управления; 5 – однофазный магнитный пускатель; 6 – электромагнитный пускатель; 7 – трансформатор тока; 8 – клеммная колодка нулевой шины; 9 – фиксатор торцевой на DIN-рейку; 10 – клеммная колодка для подключения датчиков; 11 – DIN-рейка; 12 – кабельный канал перфорированный; 13 – кабельный ввод – сальник PG; 14 – полупроводниковый диод

В нижней стенке шкафа имеются отверстия под сальники 13, через которые подключаются внешние силовые электрические цепи, датчики и подается питание на электродвигатель.

Функции защиты обеспечивают отключение электродвигателя:

при токах выше максимального тока защиты – срабатывание за время, обратно пропорциональное перегрузке;

при пусковых токах, превышающих номинальный ток электродвигателя больше чем в 6 раз – время отключения настраивается в промежутке 0,5–25 с;

при перегрузках и снижении тока нагрузки ниже допуска (время отключения настраивается в промежутке 0,5–25 с); с повторным самозапуском по истечении выбранного времени или без самозапуска;

при возникновении токов короткого замыкания – срабатывание без выдержки времени, без повторного самозапуска;

при недопустимых отклонениях питающего напряжения и неполнофазных режимах – за время, не превышающее 5 с, с автоматическим селективным самозапуском после восстановления питания;

при пробое изоляции обмотки электродвигателя или утечке тока свыше половины номинального тока – за время не более 1 с, без повторного самозапуска;

при отсутствии воды в скважине или понижении уровня воды в скважине ниже контролируемого уровня («сухой» ход) – за время не более 1 с.

Функции управления обеспечивают:

ручное управление электронасосом с места установки станции;

дистанционное управление, с контролем состояния, индикацией токов фаз и состояния датчиков с удаленного пульта или компьютера;

опробование электронасоса из насосного приямка;

автоматическое управление электронасосом:

- в режиме водоподъема или дренажа в соответствии с уровнем воды в скважине или в водонапорной башне;

- в режиме водоподъема в соответствии с давлением столба воды в водонапорной башне;

- в группе по схеме многоуровневого водоподъема или дренажа, с автоматическим распределением моторесурса;

- по таймеру и одному из датчиков уровня (давления);

- в группе по схеме основной-резервный, с ручным или автоматическим распределением моторесурса.

Функции контроля датчиков и индикации аварийных состояний:

контроль поплавковых датчиков уровня, электродных датчиков типа «сухого» хода, верхнего уровня, нижнего уровня, датчика давления типа ЭКМ, реле давления РД, термореле и других контактов внешней автоматики;

световая сигнализация причины аварийного отключения на трехразрядном световом индикаторе блока управления и дистанционном пульте управления;

отображение потребляемого тока фаз на цифровом индикаторе;

светодиодная индикация режимов работы и аварийных ситуаций.

Работа блока управления заключается в обработке поступающих сигналов от внешних управляющих датчиков и подачи команд на исполнительные устройства.

Основу блока управления составляет однокристалльный микроконтроллер. Питание блока осуществляется от одной из фазы и составляет ~230 В.

На лицевой крышке блока управления (рисунок 6.56) установлен трехпозиционный переключатель, кнопки управления «▲», «▼», «Прог», трехразрядный светодиодный индикатор и светодиоды состояния «Питание», «Мотор». На нижней и верхней сторонах корпуса блока управления установлены клеммные зажимы для подключения внешних силовых электрических цепей и датчиков.

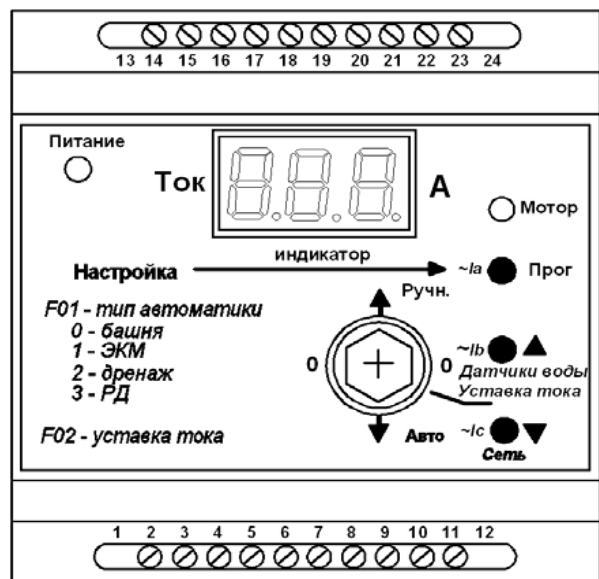


Рисунок 6.56 – Вид на переднюю панель станцию управления и защиты СУ3-2 «РОДНИК»

Настройка параметров блока управления производится с использованием трех кнопок, тумблера и трехразрядного светодиодного индикатора.

Кнопки на лицевой панели блока управления имеют следующее назначение:

в нейтральном положении тумблера при нажатии кнопки «Прог» – осуществляется переход в режим программирования и обратно;

в нейтральном положении тумблера при нажатии кнопки «▲» – отображается состояние датчиков уровня;

в нейтральном положении тумблера при нажатии кнопки «▼» – отображается состояние напряжения питания.

Во время работы насоса на трехразрядном световом индикаторе блока управления отображается значение тока при нажатии кнопки «Прог» – ток фазы «А»; кнопки «▲» – ток фазы «В»; кнопки «▼» – ток фазы «С».

В режиме программирования кнопки и тумблер имеют следующее назначение.

Тумблер переключает режимы программирования:

нейтральное положение – выбор номера параметра;

верхнее положение – ввод значения параметра.

Кнопка «Прог» в нейтральном положении тумблера переводит систему в режим программирования и обратно.

Кнопка «Прог» при верхнем положении тумблера (режиме ввода параметра) – заносит выбранное значение в память.

Кнопки «▲» и «▼» изменяют значение параметра или его номер. В режиме ввода параметра удерживание кнопок приводит к ускоренному изменению численного значения.

Параметры настройки станции

Все параметры настройки сведены в четыре группы:

- базовые;
- дополнительные;
- расширенные;
- сетевые.

При использовании базового режима управления (параметр «F01» со значениями «0...3») можно будет настроить только два параметра «F01» и «F02».

При использовании дополнительного режима управления (параметр «F01» со значениями «4...7») можно будет настроить параметры от «F01» до «F09».

При использовании расширенного режима управления (параметр «F01» со значениями «8...14») доступны все параметры, кроме сетевых «F20...F22».

При использовании сетевого режима управления (параметр «F01» со значениями «15...25») появляется возможность настроить сетевые параметры «F20...F22». В этом случае параметры «F20...F22» настраиваются для каждой из станций, состоящих в группе.

В параметре «F20» указывается уровень сигнала.

Если для двух станций дистанция составляет свыше 500 метров, то устанавливается значение «0» (слабый).

Если в группе имеется свыше четырех станций, то значение так же устанавливается «0» независимо от дистанции.

В остальных случаях устанавливается «1».

В параметре «F21» указывается число станций в группе.

Параметры настройки станции приведены в таблице 6.9.

Таблица 6.9 – Параметры настройки станции

Параметры	Значения
F01 = 4...7 – Дополнительные режимы управления (доступны от F01 до F09)	4 – водоподъем 5 – ЭКМ 6 – дренаж 7 – реле давления
F01 = 8...13 – Расширенные режимы управления (доступны от F01 до F19)	8 – водоподъем 9 – ЭКМ 10 – дренаж 11 – реле давления 12 – резервирование по ЭКМ (или кнопкам управления) 13 – резервирование по реле давления
F01 = 14 – Режим калибровки	14 – тарировка индикатора токов фаз (в ручном режиме)
F01 = 15...25 – Сетевые режимы управления Режимы, обусловленные линией связи. Только для станции РОДНИК-ДС. (все настройки доступны)	15 – резервирование по ЭКМ (работает один из группы), со взаимоконтролем по линии связи и ручным переключением приоритетов 16 – резервирование по ЭКМ с наращиванием мощности, с взаимоконтролем по линии связи и ручным переключением приоритетов 17 – резервирование с кнопчным вызовом (запоминание вызова, работает один из группы), со взаимоконтролем по линии связи и ручным переключением приоритетов 18 – резервирование по реле давления со взаимоконтролем по линии связи и ручным переключением приоритетов 19 – автоматическое резервирование по ЭКМ (работает один из группы) 20 – автоматическое резервирование по ЭКМ с наращиванием мощности 21 – автоматическое резервирование с кнопчным вызовом (запоминание вызова, работает один из группы) 22 – автоматическое резервирование по реле давления (работает один из группы) 23 – многоуровневый водоподъем группой насосов 24 – многоуровневый дренаж (КНС) 25 – телеуправление от пульта

Продолжение таблицы 6.9

Параметры	Значения																								
F02 – Ток тепловой защиты	Пределы зависят от выбранного диапазона																								
F03 – Селективность самозапуска	от 0 до 240 с (4 минуты)																								
F04 – Время наполнения (самоотключения)	от 0 до 240 минут (4 часа) (0 отключает функцию)																								
F05 – Время слива (самозапуска)	от 0 до 240 минут (4 часа) (0 отключает функцию)																								
F06 – Время запрета включения насоса после отключения (остывание до старта)	от 3 до 240 с (4 минуты)																								
F07 – Время запрета отключения насоса после включения (защита от "гидроудара")	от 3 до 240 с (4 минуты)																								
F08 – Ток отключения при холостом ходе	от 0 до тока F02 (0 отключает функцию)																								
F09 – Время отключения при холостом ходе	от 0,5 до 25 с																								
F10 – Время квитирования перегрузки	от 0 до 240 минут (4 часа) (0 отключает функцию)																								
F11 – Время квитирования сухого хода (с момента восстановления уровня воды)	от 0 до 240 минут (4 часа) (0 отключает функцию)																								
F12 – Задержка исполнения команды на включение (с момента подачи команды)	от 0 до 240 с (0 ... 4 минуты)																								
F13 – Задержка исполнения команды на отключение	от 0 до 240 с (0 ... 4 минуты)																								
F14 – Время пуска (класс защиты)	от 0,5 до 25 с																								
F15 – Номер диапазона токов датчика.	<table border="0"> <tr> <td>1</td><td>–</td><td>2,2...10А</td><td>от 1 до 3кВт</td> </tr> <tr> <td>2</td><td>–</td><td>6,5...30А</td><td>от 2,2 до 11кВт</td> </tr> <tr> <td>3</td><td>–</td><td>20...90А</td><td>до 32кВт</td> </tr> <tr> <td>4</td><td>–</td><td>30...120А</td><td>до 45кВт</td> </tr> <tr> <td>5</td><td>–</td><td>40...180А</td><td>до 65кВт</td> </tr> <tr> <td>6</td><td>–</td><td>60...300А</td><td>до 120 кВт</td> </tr> </table>	1	–	2,2...10А	от 1 до 3кВт	2	–	6,5...30А	от 2,2 до 11кВт	3	–	20...90А	до 32кВт	4	–	30...120А	до 45кВт	5	–	40...180А	до 65кВт	6	–	60...300А	до 120 кВт
1	–	2,2...10А	от 1 до 3кВт																						
2	–	6,5...30А	от 2,2 до 11кВт																						
3	–	20...90А	до 32кВт																						
4	–	30...120А	до 45кВт																						
5	–	40...180А	до 65кВт																						
6	–	60...300А	до 120 кВт																						
F16 – Версия программы																									

Окончание таблицы 6.9

Параметры	Значения
F17 – Запомнить настройки пользователя	(в памяти создается копия настроек)
F18 – Загрузить настройки пользователя	(настройки восстанавливаются из памяти)
F19 – Загрузить заводские настройки	(начальные заводские настройки)
F20 – Уровень сигнала в линии	0 – слабый, 1 – сильный
F21 – Число станций в группе	от 1 до 8
F22 – Сетевой адрес станции	от 0 до 7


Схема программирования «Быстрого старта»

Режим «Быстрого старта» необходим для быстрого ввода станции в эксплуатацию. Программирование станции «Быстрого старта» проводится в следующей последовательности:

- а) перевести тумблер блока управления в нейтральное положение «0»;
- б) включить трехфазный и однофазный автоматические выключатели;
- в) на световом индикаторе загорится «OFF»;
- г) нажать кнопку «Прог».
- д) на световом индикаторе загорится обозначение параметра «F01»;
- е) перевести тумблер блока управления в верхнее положение;
- ж) на цифровом индикаторе появится значение типа автоматики (число). С помощью кнопок «▲», «▼» выбрать необходимое значение от 0 до 3 базового режима управления;
- з) запомнить это значение нажатием кнопки «Прог»;
- и) перевести тумблер на панели блока управления в нейтральное положение «0»;
- к) на световом индикаторе загорится значение параметра «F01»;
- л) далее следует на выбор установить защиту по току автоматически или вручную.

Порядок установки защиты по току автоматически:

- нажать кнопку «Прог» – система переходит в рабочий режим;
- на световом индикаторе загорится «OFF»;

- нажать и удерживая кнопку «▲», перевести тумблер на панели блока управления в верхнее положение;
- электродвигатель начнет работать;
- на световом индикаторе загорится значок ;
- через 1–2 секунды отпустить кнопку «▲»;
- на световом индикаторе отобразится значение рабочего тока (в Амперах);
- перевести тумблер на панели блока управления в нижнее положение «Авто»;
- электродвигатель остановится;
- настройка завершена.

Порядок установки защиты по току вручную:

- кнопками «▲», «▼» выбрать параметр «F02»;
- перевести тумблер на панели блока управления в положение вверх;
- кнопками «▲», «▼» установить значение тока (ток отображается в Амперах);
- запомнить это значение нажатием кнопки «Прог»;
- перевести тумблер на панели блока управления в нейтральное положение «0»;
- на световом индикаторе загорится значение параметра «F02»;
- перевести тумблер на панели блока управления в нижнее положение «Авто»;
- электродвигатель начнет работать;
- настройка завершена.

После установки защиты по току можно настроить любой необходимый параметр, определенный изначальным выбором режима управления в параметре «F01».

Сохранение настроек

Запрограммированные настройки можно сохранить во внутренней памяти блока управления для возможности их последующего использования без поэтапного программирования.

Сохранение настроек производится в следующей последовательности:

- а) перевести тумблер блока управления в нейтральное положение «0»;
- б) на световом индикаторе загорится «OFF», если электродвигатель работал, то он остановится;
- в) нажать кнопку «Прог»;
- г) на световом индикаторе загорится обозначение параметра «F01», с помощью кнопок «▲», «▼» выбрать параметр «F17»;
- д) перевести тумблер блока в верхнее положение;
- е) на световом индикаторе загорится «F17»;
- ж) перевести тумблер блока управления в нейтральное положение «0», настройки сохранятся в памяти микроконтроллера;
- з) на световом индикаторе загорится «OFF»;
- и) перевести тумблер блока в нижнее положение «Авто»;
- к) электродвигатель возобновит работу.

Загрузка сохраненных настроек

Загрузка сохраненных настроек проводится в случае, если пользователем ранее было проведено сохранение настроек.



Извлечение и ввод ранее сохраненных пользовательских настроек и ввод станции в рабочий режим осуществляется в следующей последовательности:

- а) перевести тумблер блока управления в нейтральное положение «0»;
- б) на световом индикаторе загорится «OFF», если электродвигатель работал, то он остановится;
- в) нажимаем кнопку «Прог»;
- г) на световом индикаторе загорится обозначение параметра «F01», с помощью кнопок «▲», «▼» выбираем параметр «F18»;
- д) перевести тумблер блока управления в верхнее положение;
- е) на световом индикаторе загорится «F18»;
- ж) перевести тумблер блока управления в нейтральное положение «0», настройки будут восстановлены из памяти микроконтроллера;
- з) на световом индикаторе загорается «OFF»;
- и) перевести тумблер блока управления в нижнее положение «Авто»;
- к) электродвигатель возобновит работу.

Индикация аварийных ситуаций и ошибок

Символы индикатора, отображающие нарушение режимов работы управляемого электронасосного агрегата, неполадки питающей сети, состояния датчиков, приведены в таблице 6.10.

Таблица 6.10 – Символы индикатора и их значение

Символы индикатора	Значение символов
U_{-}	Напряжение понижено
U_{-}	Напряжение опасно понижено
U_{+}	Напряжение повышено
U_{+}	Напряжение опасно повышено
U_{-}	Перекас фаз
U_{-}	Нет фазы
I_{-}	Ток ниже допуска
I_{+}	Ток выше допуска
мигающее число	Ток аварии
$L_{-}J$	«Сухой» ход
	Пробой изоляции
OFF	Штатная остановка
OFF мигающий	Режим опробования
W0...W8	Режим контроля линии связи и приоритетов включения. Для выхода нажать «▼»
	Отображение состояния датчиков уровня воды (в напорной башне)

Вариант включения и работы станции с использованием электродных датчиков нижнего и верхнего уровней

Для включения СУЗ в работу необходимо:

выполнить монтаж станции;

подключить электродные датчики верхнего (ДВУ), нижнего (ДНУ) уровней и датчик «сухого» хода (ДСХ) к клеммной колодке 10 в соответствии со схемой, представленной на рисунке 6.57;

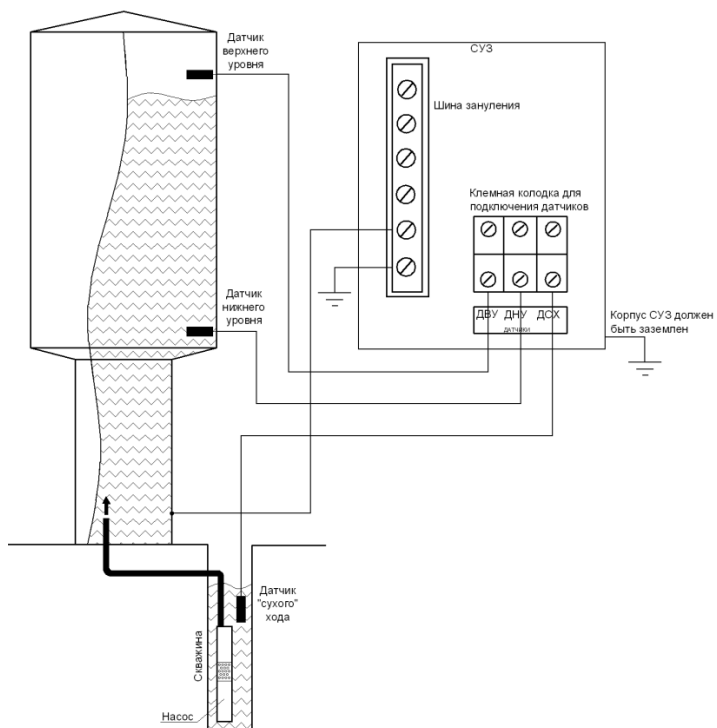


Рисунок 6.57 – Вариант включения станции с использованием электродных датчиков нижнего и верхнего уровней

включить автоматические выключатели QF1 и QF2;
запрограммировать параметр «F01» на значение «0», установить защиту по току, при необходимости произвести настройку остальных параметров;

установить тумблер на панели блока управления в положение «Авто»;

работа станции будет осуществляться в автоматическом режиме.

При отсутствии воды в баке водонапорной башни контакты датчиков уровней – ДВУ и ДНУ не омываются водой, что вызовет включение электродвигателя. При достижении уровнем воды контакта ДВУ, электродвигатель отключится. В дальнейшем циклы включения/отключения электродвигателя в зависимости от уровня воды в баке водонапорной башни будут автоматически повторяться.

При обмерзании датчика верхнего уровня можно использовать таймер наполнения для исключения переливов башни. Для этого следует выбрать в параметре «F01» значение «4», а время наполнения башни записать в параметр «F04» (в минутах).

Аналогично можно осуществлять работу по одному датчику верхнего уровня и времени, необходимому для опустошения башни.

Вариант включения и работы станции с использованием электроконтактного манометра

Для включения станции в работу необходимо:

выполнить монтаж станции в соответствии с п. 2.3;

подключить ЭКМ и датчик «сухого» хода (ДСХ) к клеммной колодке 10 в соответствии со схемой, представленной на рисунке 6.58;

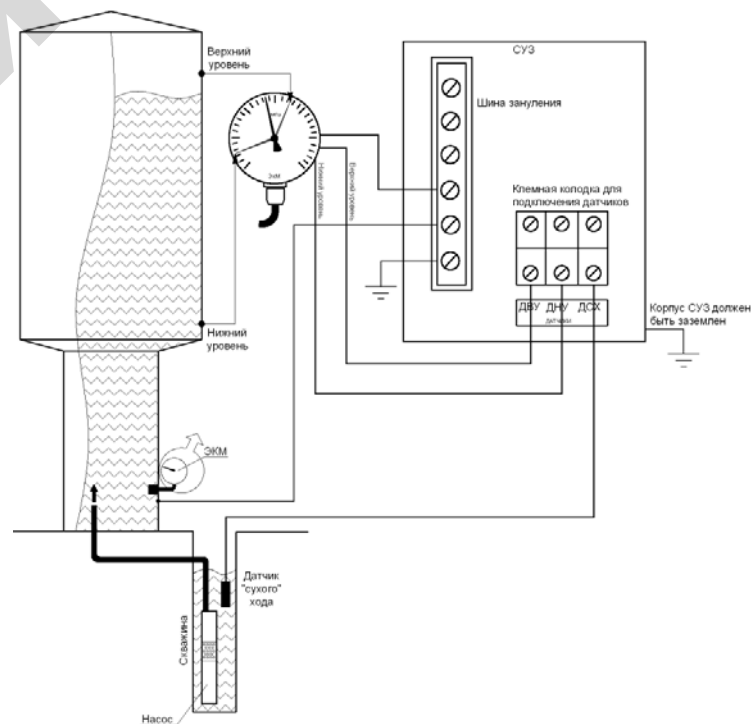


Рисунок 6.58 – Вариант включения работа станции с использованием электроконтактного манометра

установить нижний контакт электроконтактного манометра таким образом, чтобы при разборе воды в баке водонапорной башни ниже контролируемого уровня происходило его замыкание;

установить верхний контакт электроконтактного манометра таким образом, чтобы при наполненном баке водонапорной башни происходило его замыкание;

включить автоматические выключатели QF1 и QF2;

запрограммировать параметр «F01» на значение «1», установить защиту по току, при необходимости произвести настройку остальных параметров;

установить тумблер на панели блока управления в положение «Авто».

Работа станции будет осуществляться в автоматическом режиме.

При отсутствии воды в баке водонапорной башни замыкается нижний контакт электроконтактного манометра, что вызывает включение электродвигателя. При наполнении бака водонапорной башни замыкается верхний контакт электроконтактного манометра, что вызывает отключение электродвигателя. В дальнейшем циклы включения/отключения электродвигателя в соответствии с уровнем воды в баке водонапорной башни будут автоматически повторяться. После каждого переключения состояния пускателя устанавливается двадцатисекундный интервал нечувствительности датчиков, что позволяет избежать ложных отключений из-за резких колебаний стрелки манометра (подавление гидроудара).

Если есть необходимость в изменении времени нечувствительности датчиков, то изначально следует выбрать параметр «F01» со значением «5» (для того чтобы появилась возможность настроить время в параметрах «F06» и «F07»), используя методику программирования, указанную выше.

Вариант включения и работы станции с использованием реле давления

Для включения станции в работу необходимо:
выполнить монтаж станции;

подключить реле давления к клеммной колодке 10 в соответствии со схемой, представленной на рисунке 6.59;

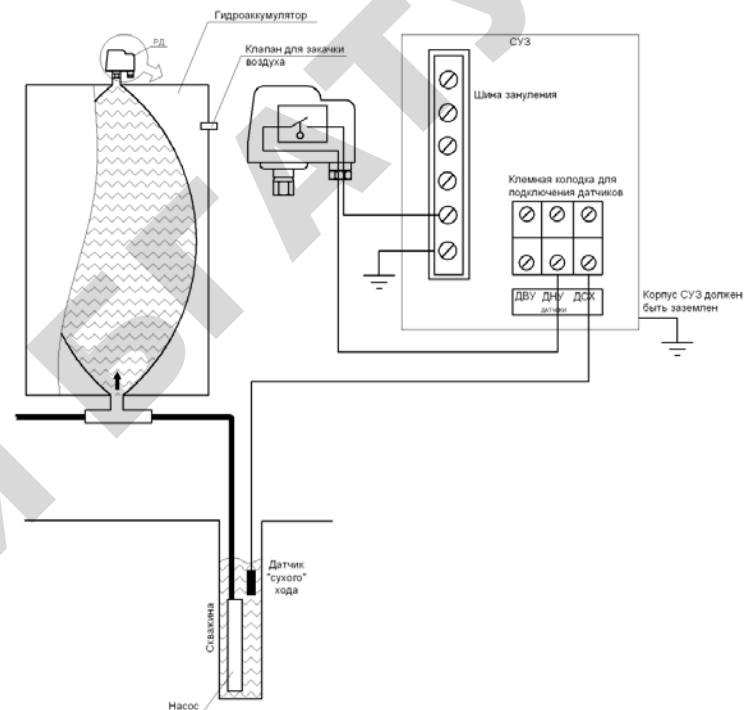


Рисунок 6.59 – Вариант включения работы станции с использованием реле давления

подключить датчик «сухого» хода (ДСХ) к клеммной колодке 10 в соответствии со схемой, представленной на рисунке 6.59;

включить автоматические выключатели QF1 и QF2;

запрограммировать параметр «F01» на значение «3», установить защиту по току, при необходимости произвести настройку остальных параметров;

установить тумблер на панели блока управления в положение «Авто».

Работа станции будет осуществляться в автоматическом режиме. Как правило, реле давления используется в системах с гидроаккумуляторами и выполняет только механическую функцию, отключая и включая электронасос в момент заполнения и опустошения гидроаккумулятора.

Являются необходимыми регулирование давления внутри гидроаккумулятора с помощью ниппеля и настройка реле давления с помощью регулировочного винта, расположенного на его корпусе.

6.6. Контрольные вопросы

1. Как Вы понимаете комплексность защиты?
2. Как Вы понимаете универсальность защиты?
3. Как Вы понимаете модульность защиты?
4. Опишите комплексную защиту электродвигателя первого уровня.
5. Опишите комплексную защиту электродвигателя второго уровня.
6. Опишите комплексную защиту электродвигателя третьего уровня.
7. Какой параметр контроля электродвигателя обеспечивает наилучшую комплексную защиту?
8. Какие комплексные электронные защиты выпускаются в Беларуси?
9. Опишите комплексную электронную защиту СиЭЗ.
10. Какие датчики имеет защита РЭЗЭ-6?
11. Опишите датчики тока защиты РЭЗЭ-6.
12. Какие комплексные микропроцессорные защиты выпускаются в Беларуси?
13. Какие датчики имеет защита УБЗ-301?
14. Какие датчики имеет защита УЗОТЭ-2У?
15. Опишите датчики тока защиты СиЭЗ-1М.
16. Какие преимущества обеспечивают микропроцессорные защиты электродвигателей?
17. В чем состоит особенность защиты электродвигателей автоматически ненаблюдаемой установки в аварийных режимах?
18. Объясните временные диаграммы рисунка 6.52.

17. Объясните работу устройства, представленного на рисунке 6.53.
18. Объясните конструкцию станции управления и защиты СУЗ-2 «РОДНИК».
19. От каких аварийных режимов защищается электродвигатель в станции управления и защиты СУЗ-2 «РОДНИК»?
20. Как рекомендуется строить защиту трехфазного асинхронного электродвигателя от работы в неполнофазных режимах?

Глава 7. ТЕХНИКО-ЭКОНОМИЧЕСКОЕ ОБОСНОВАНИЕ ВЫБОРА ЗАЩИТЫ АСИНХРОННОГО ТРЕХФАЗНОГО ЭЛЕКТРОДВИГАТЕЛЯ

7.1. Выбор устройств защиты асинхронного трехфазного электродвигателя по критерию эффективности

Задача выбора устройства защиты трехфазного асинхронного электродвигателя, используемого на конкретной рабочей машине, является сложной в связи с разнообразием параметров контроля и характеристик. Критерии выбора могут быть различными. Рекомендуем пользоваться двумя критериями выбора:

1) по эффективности устройства защиты электродвигателя на рабочей машине;

2) по экономическому критерию, учитывающему стоимость устройства защиты, стоимость электродвигателя и аварийность электродвигателя на рабочей машине.

Для определения эффективности защиты асинхронных двигателей в Латвийской сельскохозяйственной академии впервые определили вероятность срабатывания q_{ik} некоторых k -ых устройств защиты в аварийных i -ых режимах и вероятность отказа P_{ij} электродвигателя i -го механизма по j -ой причине [1].

Эффективность работы \mathcal{E}_{kj} k -го устройства защиты при защите электродвигателя j -го механизма машины определяется по формуле:

$$\mathcal{E}_{kj} = \sum P_{ij} \cdot q_{ik}, \quad (7.1)$$

где P_{ij} – вероятность отказа электродвигателя i -го механизма по j -ой причине;

q_{ik} – вероятность срабатывания k -го устройства защиты в аварийных i -ых режимах.

Наиболее эффективным устройствам защиты на данной рабочей машине будет то устройство, которое имеет наибольшую эффективность

$$\mathcal{E}_{kj} \Rightarrow \max. \quad (7.2)$$

В таблице 7.1 приведены значения среднего срока службы и средней аварийности электродвигателей на рабочих машинах, а

также вероятность отказа электродвигателей на рабочих машинах P_{ij} из-за аварийных режимов и состояний.

Таблица 7.1– Распределение основных причин отказов электродвигателей на рабочих машинах

Рабочая машина	Средний срок службы t_c , год	Средняя аварийность, γ_c , год ⁻¹	Вероятность отказа P_{ij} из-за аварийных режимов и состояний				
			Неполнофазный режим	Неподвижный ротор	Перегрузка	Ув-лажнение обмотки	Нарушение охлаждения
Транспортеры по уборке навоза в животноводческих помещениях, типа ТСН	2,8	0,36	0,23	0,71	0	0,06	0
Транспортеры в кормоцехе	2,8	0,36	0,23	0,6	0,11	0	0,06
Насосы жидкого навоза	2,5	0,4	0,34	0,26	0,14	0,26	0
Вентиляторы в животноводческих помещениях	2,9	0,34	0,4	0,21	0,09	0,3	0
Вентиляторы на электрокалориферах	7	0,14	0,69	0,17	0	0	0,14
Центробежные насосы в молочной и т. п.	4,3	0,23	0,42	0,31	0,09	0,18	0
Вентиляторы установок активного вентилирования на открытом воздухе	3,3	0,3	0,4	0,17	0,20	0,23	0
Вакуум-насосы	3,7	0,27	0,37	0,41	0,06	0,16	0
Дробилки кормов	3,8	0,26	0,11	0,24	0,1	0,38	0,17
Пресс-грануляторы	4,5	0,22	0,2	0,21	0,38	0	0,21
Нории в помещениях	3,3	0,30	0,26	0,54	0,10	0	0,1
Нории на открытом воздухе	3,3	0,30	0,26	0,54	0,10	0,10	0
Дозаторы кормов	5,3	0,19	0,32	0,58	0	0	0,10
Станки в механических мастерских	9,1	0,11	0,10	0,10	0,8	0	0

В таблице 7.2 приведены значения вероятности срабатывания q_{ik} некоторых устройств защиты при основных аварийных режимах.

Таблица 7.2 – Вероятность срабатывания q_{ik} некоторых устройств защиты при основных аварийных режимах

Устройство защиты	Вероятность срабатывания q_{ik} при основных аварийных режимах				
	Неполнофазный режим	Заклинивание	Перегрузка технологическая	Увлажнение обмотки	Нарушение охлаждения
Тепловые реле РТЛ	0,6	0,45	0,75	0	0
Устройство встроенной температурной защиты УВТЗ-1М	0,76	0,67	0,91	0	0,91
То же, УВТЗ-5М	0,85	0,67	0,91, 0,95 по [86]	0	0,91
Фазочувствительное устройство защиты ФУЗ-М	0,95	0,95	0,76	0	0
Система электронной бесконтактной защиты СиЭЗ-4А, СиЭЗ-8-25, СиЭЗ-20-80	0,95	0,95	0,66	0	0
Реле защиты РЗД-3М, АЗД	0,95	0,95	0,76	0	0
Реле защиты РЗД-1, УЗ-ЭД	0,95	0,95	0,76	0,9	0
Реле защиты УЗОТЭ-2У	0,95	0,95	0,86	0,9	0,8
Реле электронной защиты РЭЗЭ-6	0,95	0,95	0,90	0,9	0,85
Микропроцессорное СиЭЗ-1М с позисторами	0,95	0,95	0,91	0,9	0,91
Универсальный блок защиты микропроцессорный УБЗ-301	0,95	0,95	0,86	0,9	0
Реле цифровое РДЦ-01	0,95	0,95	0,86	0	0
Реле защиты РЗ-04-05	0,95	0,95	0,86	0,9	0
Реле защиты РЗ-01-06	0,95	0,95	0,86	0	0

Известны другие методики выбора устройств защиты. Например, в [86] рассматривается методика выбора устройства защиты с учетом вероятности Q возникновения отказов в самом устройстве

защиты и с учетом быстродействия b устройства защиты, учитывающего интенсивность износа изоляции обмотки электродвигателя. Автор работы [86] вводит понятие предельной доли предотвращения аварий p (от 0 до 1) и добротности D устройства защиты. Под добротностью понимается отношение:

$$D = \frac{1}{(1-p)Qb} \quad (7.3)$$

Выбор устройства защиты электродвигателей производят по оптимальной добротности. Оптимальная добротность устройства защиты зависит от интенсивности λ возникновения аварийных ситуаций на рабочей машине, размера полного удельного ущерба Y объекта, на котором используется электродвигатель, и удельных эксплуатационных затрат C :

$$D_{\text{опт}} = \sqrt{\frac{\lambda \cdot Y}{C}} \quad (7.4)$$

Методика выбора устройства защиты по оптимальной добротности с учетом вероятности возникновения отказов в самом устройстве защиты не получила широкого применения из-за отсутствия статистических исходных данных о величинах, входящих в формулы (7.3) и (7.4).

7.2 Выбор устройств защиты асинхронного трехфазного электродвигателя по экономическому критерию

Применение комплексных и универсальных устройств защиты электродвигателей ограничивается экономическими факторами. Более простое устройство защиты стоит дешевле, но обладает меньшей эффективностью. Более эффективные устройства защиты, как правило, стоят дороже.

Выбор по экономическому критерию состоит в том, чтобы найти такое устройство защиты, дополнительные затраты на которое компенсируются достигаемым снижением затрат на капитальный ремонт защищаемого электродвигателя и от технологического ущерба.

Для выбора оптимального решения необходимо проводить технико-экономический расчет, учитывая затраты на приобретение устройства, его монтаж и эксплуатацию, а также ущерб от отказа электродвигателя.

Стоимость устройства защиты электродвигателя связана со стоимостью электродвигателя, зависит от технологического ущерба при аварии электродвигателя и от интенсивности отказов электродвигателя на рабочей машине, определяется [2] по формуле:

$$K_{\text{защ}} \leq K_{\text{эл.дв}} \frac{(\lambda_1 - \lambda_2)(1 + y^*)}{E}, \quad (7.5)$$

где $K_{\text{защ}}$, $K_{\text{эл.дв}}$ – стоимость устройства защиты, стоимость электродвигателя, руб.;

λ_1 , λ_2 – интенсивность отказов при использовании нового и старого устройств защиты;

y^* – относительный технологический ущерб. Для ответственных электроприводов $y^* > 0,5$, для неответственных электроприводов – $y^* < 0,5$;

E – нормативный коэффициент окупаемости капитальных затрат.

Относительный технологический ущерб определяется по формуле:

$$y^* = Y/Kp, \quad (7.6)$$

где Y – стоимостная оценка технологического ущерба при отказе, руб.;

Kp – стоимость капитального ремонта электродвигателя, руб.

Разность интенсивностей отказов $\lambda_1 - \lambda_2$ сравниваемых устройств защиты определяется [1] из выражения:

$$\lambda_1 - \lambda_2 = \gamma_c (\mathcal{E}_{kj1} - \mathcal{E}_{kj2}), \quad (7.7)$$

где γ_c – среднестатистическая интенсивность отказа или средняя аварийность электродвигателя в год на рассматриваемой рабочей машине, год⁻¹ (таблица 7.1);

\mathcal{E}_{kj1} , \mathcal{E}_{kj2} – эффективность работы нового и базового устройств защиты.

В качестве базового устройства защиты обычно принимают реле электротепловое РТЛ и его значение $\mathcal{E}_{kj,2}$.

Стоимость электродвигателей серии АИР мощностью до 11 кВт изложена в таблице 7.3.

Таблица 7.3 – Стоимость электродвигателей серии АИР мощностью 0,37–11 кВт (в ценах 2009 года)

Номинальная мощность, кВт	Тип	Частота вращения электромагнитного поля, мин ⁻¹	Цена $K_{\text{эл.дв}}$, руб. с НДС	
			на лапах	фланцевые
0,37	АИР 63А2	3000	149 270	161 210
	АИР 63 В4	1500	149 270	161 210
	АИР 71А6	1000	168 740	182 240
0,55	АИР 63 В2	3000	149 270	161 210
	АИР 71А4	1500	168 740	182 240
	АИР 71В6	1000	177 000	191 160
0,75	АИР 71А2	3000	168 740	182 240
	АИР 71В4	1500	177 000	191 160
	АИР 80А6	1000	202 960	219 200
1,1	АИР 71В2	3000	177 000	191 160
	АИР 80А4	1500	200 600	216 650
	АИР 80В6	1000	217 120	234 490
1,5	АИР 80А2	3000	192 340	203 880
	АИР 80В4	1500	206 500	218 890
	АИР 90L6	1000	248 390	263 290
2,2	АИР 80В2	3000	206 600	218 890
	АИР 90L4	1500	248 390	263 290
	АИР 100L6	1000	378 780	401 510
3,0	АИР 90L2	3000	248 390	263 290
	АИР 100S4	1500	343 970	364 610
	АИР112МА6	1000	554 600	587 830
4,0	АИР 100S2	3000	342 200	362 730
	АИР 100L4	1500	365 800	367 750
	АИР112МВ6	1000	554 600	587 830
5,5	АИР 100L2	3000	369 930	398 130
	АИР 112М4	1500	554 600	587 880
	АИР 132S6	1000	726 700	769 240
7,5	АИР 112М2	3000	578 900	612 890
	АИР 132S4	1500	696 200	737 470
	АИР 132М6	1000	802 400	850 540
11	АИР 132М2	3000	745 200	800 510
	АИР 132М4	1500	910 380	950 310
	АИР 160S6	1000	1 298 000	1 375 880

Таким образом, экономически выгодно применять такое устройство защиты, фактическая стоимость которого не превышает допустимую стоимость по условию (7.5).

Найденная по (7.5) стоимость устройства защиты сравнивается с реальной стоимостью устройств защиты (таблица 7.4), которая должна быть ниже ее.

Таблица 7.4 – Стоимость некоторых устройств защиты

Устройство защиты	Стоимость $C_{\text{защ}}$, руб.
УВТЗ-1М	45 400
УВТЗ-5М	107 250
СиЭЗ-4А	228 000
СиЭЗ-1М	285 500
РЭЗЭ-6	240 990
УБЗ-301	327 990
РДЦ-01	202 140
РЗ-03-05	994 000

Примечание. Стоимость устройств защиты определена по прайс-листам, представленным на сайтах Интернета 10.01.2009.

Из формул (7.5) и (7.7) видно, что стоимость устройств защиты зависит прямо пропорционально от стоимости электродвигателя, аварийности электродвигателя на рассматриваемой рабочей машине, разности между эффективностью работы нового и базового устройств защиты.

Устройств защиты со стоимостью ниже вычисленной по (7.5) может быть несколько. Тогда пользуются дополнительным критерием «снижение цены реального устройства по сравнению с расчетом» для каждого из выбираемых защит по формуле:

$$\Delta K = K_{\text{защ}} - C_{\text{защ}} \quad (7.8)$$

Выбирается устройство защиты с наибольшей выгодой, т. е. с наибольшим значением ΔK .

• Поставим задачу определения стоимости универсального комплексного устройства защиты электродвигателя, рассчитанного для многих электродвигателей (соответственно, для многих рабочих машин). В этом случае требуется определить средневзвешенную стои-

мость электродвигателя в сельском хозяйстве и выявить наибольшую и наименьшую аварийности электродвигателя на рабочих машинах.

Стоимость асинхронного электродвигателя существенно зависит от его мощности. Кроме того, стоимость электродвигателя одной и той же мощности зависит от числа полюсов, от монтажного исполнения, от серии, от назначения. Средневзвешенная стоимость электродвигателя в сельском хозяйстве определена в работе [126]. Стоимости электродвигателей взяты по данным официального дилера заводов-изготовителей электродвигателей, ООО «Промэлектрокомлект», г. Минск, на 1 января 2009 г. Для асинхронных электродвигателей серии АИР средневзвешенная стоимость электродвигателя составляет 518 738 руб., а для асинхронных электродвигателей серии АИМ – 1 067 992 руб.

Аварийность электродвигателей в сельском хозяйстве колеблется от $0,40 \text{ год}^{-1}$ (насосы жидкого навоза) до $0,14 \text{ год}^{-1}$ (электрокалориферы) [1, с.13].

Из всех устройств защиты в сельском хозяйстве наиболее широко используется электротепловое токовое реле. Оно рекомендуется в качестве базового варианта при расчете эффективности внедрения комплексного устройства защиты. Для настроенного в лаборатории электротеплового токового реле эффективность работы на электродвигателе насоса составляет 0,58, электрокалорифера – 0,69 [1].

Предположим, эффективность нового комплексного универсального устройства защиты составляет величину $\mathcal{E}_{kj} = 0,93$. В [1] показано, что такую величину эффективности имеет комплексное универсальное устройство защиты ФУЗ-И. Оно защищает электродвигатель при перегрузке, в стопорном и неполнофазном режимах, при снижении сопротивления изоляции и перегреве корпуса электродвигателя.

Аварии электродвигателей приводят к прямому и технологическому ущербу. Прямой ущерб определяется стоимостью ремонта электродвигателя и расходами на его замену. Если учитывать только прямой ущерб, то необходимо принять технологический ущерб $y^* = 0$.

Технологический ущерб вызван нарушением технологического процесса, простоем оборудования и рабочих, недоотпуском продукции. В этом случае технологический ущерб $y^* > 0$. Для ответственных приводов рабочих машин можно применять $y^* = 0,5$ [2].

Предполагаемые средневзвешенные стоимости устройств комплексной универсальной защиты асинхронных электродвигателей вычислены по формуле (7.5) для наименее и наиболее аварийных электродвигателей рабочей машины (таблица 7.1) и представлены в таблице 7.5.

Таблица 7.5 – Предполагаемые наибольшие стоимости устройств комплексной универсальной защиты асинхронных электродвигателей

Электродвигатель серии	Стоимость устройств защиты (руб.) при различных технологических ущербах y^* и различной аварийности электродвигателей γ_c (1/год)			
	$y^* = 0$		$y^* = 0,5$	
	$\gamma_c = 0,14$ (электрокалорифера)	$\gamma_c = 0,40$ (насоса)	$\gamma_c = 0,14$ (электрокалорифера)	$\gamma_c = 0,41$ (насоса)
АИР	139 540	580 986	207 495	871 480
АИМ	287 290	1 196 151	427 197	1 794 226

При нулевом технологическом ущербе средневзвешенная стоимость устройства защиты асинхронного электродвигателя серии АИР для сельского хозяйства должна составлять от 139 540 до 580 986 руб., а при относительном технологическом ущербе $y^* = 0,5$ (неответственные электроустановки) от 207 495 до 871 480 руб., где меньшие цифры соответствуют низкой аварийности электродвигателя электрокалорифера, а большие цифры – высокой аварийности электродвигателя насоса. Обращаем Ваше внимание, что для новой серии электродвигателей АИМ цена устройств защиты может быть большей в 2 и более раз.

Упрощенно экономическую эффективность \mathcal{E}_p (в рублях) от внедрения нового устройства защиты, характеризующегося эффективностью защиты \mathcal{E}_n и стоимостью защиты K_n , можно определить по формуле, приведенной в [1]:

$$\mathcal{E}_p = Y\gamma_c(\mathcal{E}_n - \mathcal{E}_6) - E(K_n - K_6), \quad (7.9)$$

где \mathcal{E}_n , \mathcal{E}_6 и K_n , K_6 – эффективность и стоимость нового и базового устройств защиты.

Чтобы определить ущерб от отказа электродвигателя на конкретной рабочей машине в сельскохозяйственном производстве, следует пользоваться рекомендациями, изложенными в [127].

7.3. Побочные эффекты от использования устройств защиты электродвигателей

Кроме основного эффекта, связанного с защитой электродвигателей и обеспечением их сохранности, т. е. с **ресурсосбережением**, устройства защиты, при определенных условиях, обеспечивают два побочных эффекта:

1 – энергосбережение; 2 – электробезопасность.

• **Энергосбережение** обеспечивают устройства защиты, контролирующие минимальную нагрузку на валу (ток, потребляемую мощность) электродвигателя, или его холостой ход. При возникновении режима холостого хода устройство защиты не позволяет работать электродвигателю и отключает его от сети. Тем самым устройство защиты обеспечивает экономию электроэнергии, которая тратилась бы впустую при холостом ходе рабочей машины и электродвигателя.

Следует отметить, что контроль холостого хода электродвигателя по току усложняется для малых по мощности электродвигателей или тихоходных тем, что эти электродвигатели имеют малое изменение тока (см. параграф 3.1). Гораздо эффективнее контролировать в этом случае потребляемую мощность или коэффициент мощности.

Задача контроля усложняется, если требуется определять ток электродвигателя при холостом ходе рабочей машины. Этот ток больше тока холостого хода электродвигателя, поскольку вызван нагрузкой холостого хода рабочей машины. Его величина может изменяться во времени. Поэтому наиболее точно его можно определить путем измерения с помощью амперметра (токовых клещей) в производственных условиях. После этого устройство защиты требуется настроить на ток отключения как можно точнее, чтобы избежать ложных отключений.

Кроме уставки тока отключения холостого хода, требуется задать уставку времени, обеспечивающую задержку времени на отключение при появлении холостого хода рабочей машины. Эту уставку времени можно определить расчетом. Экономия электроэнергии при ограничении холостых ходов имеет место в том случае, если потери энергии за время холостого хода больше, чем потери энергии при дополнительном пуске электродвигателя. Тогда уставка времени холостого хода должна составлять приблизительно в секундах:

$$t_{x.x} \geq \frac{J_{\text{прив}} \frac{\omega_0^2}{2} \left(1 + \frac{R_1^{1*}}{R_2^{1*}}\right)}{(P_{1xx} + 0,15Q_{1xx})} \left(\frac{Z-1}{Z}\right) 10^{-3}, \quad (7.10)$$

где $J_{\text{прив}}$ – приведенный к валу электродвигателя момент инерции вращающихся частей рабочей машины, кг·м²;

ω_0 – синхронная скорость электродвигателя, рад/с;

P_{1xx} – потребляемая активная мощность в режиме холостого хода рабочей машины, Вт;

Q_{xx} – потребляемая реактивная мощность в режиме холостого хода рабочей машины, ВАр;

R_1^{1*}, R_2^{1*} – приведенное сопротивление обмотки статора и ротора электродвигателя, о.е.;

Z – число включений электродвигателя в час.

В [128] указано, что установка ограничителей холостого хода на станках, имеющих межоперационное время (время холостого хода) 10 с и более, всегда приводит к экономии электроэнергии. Следовательно, время 10 с соответствует минимальной уставке времени отстройки в режиме холостого хода рабочей машины.

• **Электробезопасность** обеспечивают устройства защиты, контролирующие замыкание обмотки на корпус при работающем электродвигателе. Контроль осуществляет дифференциальный трансформатор тока (ДТТ), охватывающий три фазных провода. По принципу действия такой трансформатор аналогичен дифференциальному трансформатору тока устройства защитного отключения (УЗО). При появлении тока утечки на корпус определенной вели-

чины на вторичной обмотке ДТТ появляется напряжение, под воздействием которого устройство защиты отключает электродвигатель от сети.

В [1] отмечается, что когда возникает однофазное короткое замыкание и перегорает соответствующий предохранитель, появляется неполнофазный режим, при котором электродвигатель продолжает вращаться, если механическая нагрузка на валу небольшая, индуцируя в пораженной фазе ЭДС. В заземляющем корпусе проводнике потечет ток, и на корпусе появится напряжение прикосновения, величина которого зависит от мощности электродвигателя. Например, при мощности электродвигателя 0,37 кВт напряжение прикосновения составляет 4,25 В, а при мощности электродвигателя 5,5 кВт – 37 В. Допустимое напряжение прикосновения для крупного рогатого скота составляет 3,2 В, а для дойных коров – 2 В. Следовательно, указанные напряжения прикосновения опасны для животных и людей из-за возможности поражения их электрическим током. Очевидно, что для обеспечения электробезопасности в животноводческих помещениях нельзя допускать работу трехфазных электродвигателей в однофазном режиме. Широко применяемая тепловая защита на базе биметаллического токового теплового реле неспособна защитить людей и животных в этом случае, как и температурные защиты УВТЗ (за исключением устройства УВТЗ-5, снабженного узлом контроля неполнофазного режима).

Применение комплексных электронных или микропроцессорных защит, контролирующих замыкание обмотки на корпус, является эффективным средством повышения электробезопасности установки.

7.4. Перспективы развития устройств защиты асинхронных трехфазных электродвигателей

Устройства защиты электродвигателей в сельском хозяйстве применяются недостаточно. В основном применяются электротепловые биметаллические токовые реле. Связано это с комплектными поставками электромагнитных пускателей с электротепловыми реле. Заводы-изготовители электромагнитных пускателей комплектуют их электротепловыми реле с наибольшим номинальным током в данном габарите электромагнитного пускателя. Такое электротепловое реле соответствует по току одному электродвигателю, а

электромагнитный пускатель – десятку электродвигателей. Для нормальной эксплуатации в хозяйстве требуется иметь не один десяток электротепловых реле на разные токи. В этом мы видим противоречие, устранить которое можно поставкой в комплекте с электромагнитным пускателем вместо электротеплового реле одного устройства комплексной универсальной защиты. Эта защита должна иметь рабочий диапазон токов, соответствующий электромагнитному пускателю. Электромагнитные пускатели имеют номинальные токи 3 А (нулевая величина), 10 А (1 величина), 25 А (2 величина), 40 А (3 величина), 63 А (4 величина), 80 А (5 величина), 125 А (6 величина), 200 А (7 величина). Следовательно, устройства комплексной универсальной защиты должны иметь семь типоразмеров на токи 0–3 А, 3–10 А, 10–25 А, 25–40 А, 40–63 А, 63–80 А, 80–125 А, 125–200 А (можно объединять два предела токов в один). Устройства комплексной универсальной защиты должны иметь габарит электротепловых реле и удобно стыковаться с электромагнитными пускателями. При этих условиях комплексные универсальные защиты найдут более широкое применение. Таким образом, *первое направление совершенствования устройств защиты электродвигателей – комплектные поставки их совместно с электромагнитными пускателями.*

Важную роль в распространении современных устройств защиты в сельском хозяйстве играют проектировщики. Они должны закладывать в проекты новые прогрессивные технические решения, в том числе и по защите и управлению электродвигателем. С поставкой новой техники в сельское хозяйство будут поставляться и новые устройства защиты электродвигателей.

Техника развивается в сторону экономичности и удобства управления. Это направление справедливо и в отношении устройств защиты электродвигателей. Новые устройства защиты должны иметь меньшую массу, размеры, потреблять меньше электроэнергии. Этого возможно достигнуть, если использовать малые сигналы для их управления. Наиболее целесообразно использование в этих целях микропроцессорной техники. Компактность конструкции достигается интеграцией в одном корпусе преобразователей тока и электронных приборов обработки данных.

Таким образом, *второе направление совершенствования устройств защиты электродвигателей – использование микропроцес-*

сорной техники. Однако в устройствах защиты микропроцессорная техника должна использоваться разумно. Предполагаем, что микропроцессорные защиты должны быть двух уровней:

- 1) для работы с отдельными электродвигателями;
- 2) для совместной работы с программируемыми контроллерами в системе АСУ ТП.

Устройства защиты электродвигателя первого уровня не имеют интерфейса. Они имеют цифровой индикатор или выполняются без него (это удешевляет устройство). Информация о работе, аварии, о наладке отображается с помощью цифрового или светодиодного индикаторов. Степень защиты корпуса – не менее IP65, допустимая температура – не менее минус 25 °С. Устройство осуществляет полную защиту электродвигателя: при перегрузке; при потере нагрузки на валу; от работы в неполнофазном режиме; при асимметрии тока; при замыкании на землю; при перегреве обмотки. Кроме этого, осуществляются блокировка пуска электродвигателя при неполнофазной сети и при сопротивлении изоляции менее 500 кОм.

Устройства защиты электродвигателя второго уровня имеют интерфейс связи с контроллерами и по двухпроводной шинной связи пересылают в вышестоящую систему автоматизации и управления множество данных о работе электродвигателя, например: тока электродвигателя; число часов работы; число пуска электродвигателя; число отключений и т. д. Эти устройства, как правило, не содержат цифровых индикаторов, поскольку размещаются в шкафу управления и вся информация передается на контроллер управления. Устройства защиты второго уровня дороже первого, поскольку выполняют все функции защиты первого уровня и дополнительные функции. Их можно назвать *интеллектуальными устройствами защиты и управления электродвигателем.* Примером могут служить коммуникационное устройство защиты и управления SIMO-CODE-DP 3UF5 фирмы SIEMENS, использующее шину связи PROFIBUS-DP [58], и реле защиты электродвигателей РЗ-03-07 ООО «Энергосберегающие системы и технологии», использующее интерфейс RS485 и RS232 [119].

Третье направление совершенствования устройств защиты электродвигателя состоит в объединении функций защиты и управления электроприводом рабочей машины. Например, обеспечение пуска с переключением схемы обмотки электродвигателя

со «звезды» на «треугольник», или обеспечение последовательности пуска двух электродвигателей, или управление электроприводом по команде датчиков давления и т. п. Наиболее качественное решение в этом направлении реализуется с помощью коммуникационных устройств защиты и управления типа SIMOCODE-DP 3UF5 [58] .

Четвертое направление совершенствования устройств защиты электродвигателя состоит в объединении функций защиты, диагностирования изоляции и предотвращения увлажнения обмотки во время технологических пауз. Это направление особенно актуально для сельского хозяйства, многие электродвигатели которого работают во влажных средах.

Пятое направление совершенствования устройств защиты электродвигателя состоит в разработке быстродействующей температурной защиты, не требующей монтажа проводов связи термодетекторов с аппаратом защиты.

Удобства управления в устройствах защиты реализуются путем простой и точной настройки уставки номинального тока до включения электродвигателя в сеть.

Устройства защиты должны иметь минимум настроек, а процесс настройки должен быть удобным.

7.5. Контрольные вопросы

1. Какие критерии выбора устройств защиты асинхронного электродвигателя Вы знаете?
2. В чем состоит суть выбора устройств защиты асинхронного электродвигателя по критерию эффективности?
3. В чем состоит суть выбора устройств защиты асинхронного электродвигателя по экономическому критерию?
4. В чем состоит энергосбережение, которое обеспечивает защита электродвигателя?
5. Каким образом обеспечивается электробезопасность с помощью устройств защиты электродвигателя?
6. Объясните основные направления совершенствования защиты асинхронного трехфазного электродвигателя.

7. Может ли быть вероятность срабатывания устройства защиты электродвигателя на рабочей машине больше 1,0?

8. Известны вероятности отказа электродвигателя на данной рабочей машине по следующим причинам: p_1 – при неполнофазном режиме; p_2 – при заклинивании; p_3 – при перегрузке; p_4 – при увлажнении обмотки; p_5 – при нарушении охлаждения. Чему равна суммарная вероятность отказа электродвигателя?

9. Какие показатели влияют на стоимость устройств защиты?

10. Расскажите методику определения требуемой стоимости устройств защиты.

11. Как определяется интенсивность отказов устройств защиты?

СПИСОК ИСПОЛЬЗОВАННОЙ ЛИТЕРАТУРЫ

1. *Грундулис, А. О.* Защита электродвигателей в сельском хозяйстве / А. О. Грундулис. – 2-е изд. – Москва : Агропромиздат, 1988. – 111 с.
2. *Пястолов, А. А.* Эксплуатация электрооборудования: учебное пособие для ВУЗов / А. А. Пястолов, Г. П. Ерошенко. – Москва: Агропромиздат, 1990. – 287 с.
3. *Курбатова, Г. С.* Электродвигатели для сельского хозяйства / Г. С. Курбатова. – Москва : Энергоатомиздат, 1983. – 64 с.
4. Исследование условий эксплуатации и обоснование выбора защиты электрифицированного оборудования кормоцехов / А. О. Грундулис, Р. С. Жук // Тр. ЛСХА, вып. 215. – Елгава, 1983. – С. 65–73.
5. Асинхронные электродвигатели серии 4А: справочник / А. Э. Кравчик [и др.]. – Москва : Энергоиздат, 1982. – 504 с.
6. Унифицированная серия асинхронных двигателей Интерэлектро / В. И. Радин [и др.]; под редакцией В. И. Радина. – Москва: Энергоиздат, 1990. – 416 с.
7. *Сырых, Н. Н.* Техническое обслуживание электрооборудования в сельском хозяйстве / Н. Н. Сырых, В. С. Чекрыгин, С. А. Калмыков. – Москва : Агропромиздат, 1980. – 224 с.
8. *Счастливы, Г. Г.* Погружные асинхронные электродвигатели / Г. Г. Счастливы, В. Г. Семак, Г. М. Федоренко. – Москва: Энергоатомиздат, 1983. – 168 с.
9. *Сырых, Н. Н.* Эксплуатация сельских электроустановок / Н. Н. Сырых. – Москва : Агропромиздат, 1986. – 255 с.
10. Эксплуатационные воздействия и надежность оборудования животноводческих ферм и комплексов / В. И. Русан, В. А. Киреев, Э. В. Барановский // сб. науч. тр. Всес. н.-и и технол. ин-та монтажа, эксплуат. и ремонта машин и оборуд. животновод. и птицевод. ферм. – 1978. – № 2. – С. 104–110.
11. *Гейлер, Л. Б.* Справочник электрика промышленных предприятий / Л. Б. Гейлер. – Минск : Государственное издательство БССР, 1963. – 588 с.
12. Проектирование комплексной электрификации / Л. Г. Прицеп [и др.]; под ред. Л. Г. Прищепа. – Москва : Колос, 1983. – 271 с.
13. Основные направления повышения надежности электродвигателей в сельском хозяйстве / Тр. Всес. ин-та заоч. образования. – Москва, 1977. – № 135. – С. 3–10.

14. О надежности электродвигателей сельскохозяйственных комплексов / В. М. Зубков [и др.] // Применение электрической энергии в сельском хозяйстве : сб. науч. тр. – Москва, 1983. – С. 47–50.

15. Влияние режимов работы на эксплуатационную надежность электропривода / И. И. Мартыненко, Н. А. Корчемный, В. П. Машевский // Механиз. и электрифик. соц. с. х. – 1980. – № 12. – С. 29–32.

16. Protozeone complete del motore elettrico / Н. Unterweger // Tech. automar, 1983. – № 9. – P. 35–39.

17. Low cost protection saves expensive motor down time / С. P. Yelland // Vector, 1980. – June. – P. 46–47.

18. Влияние некоторых эксплуатационных факторов на надежность скважинных электронасосов / В. И. Мудряк, С. А. Аносов, Ю. А. Казаков // Производство и эксплуатация деталей машин: сб. науч. тр. – Кишинев: Штиинца, 1977. – С. 9–10.

19. Славин, Р. М. Режимы работы и защиты электроустановок в животноводческих фермах / Р. М. Славин. – Москва : Машиностроение, 1965. – 388 с.

20. Производство электротехнической продукции : технический каталог. – г. Лида : СООО «Евроавтоматика Ф и Ф», 2004. – 40 с.

21. *Андреев, В. А.* Релейная защита и автоматика систем электропитания : учебное пособие / В. А. Андреев. – 3-е изд. – Москва : Высшая школа, 1991. – 496 с.

22. Устройство для защиты трехфазного асинхронного электродвигателя от неполнофазного режима питания и обратного чередования фаз питающей сети : пат. 13617 Респ. Беларусь, МПК (2009) Н 02Н 7/08 / В. В. Гурин, Е. В. Лавцевич, П. А. Равинский; заявитель и патентообладатель : Бел. гос. аграрн. техн. ун-т. – № а 20071188; заявл. 2007.10.01; опубл. 2010.10.30 // Афіцыйны бюл. / Нац. цэнтр інтэлектуал. уласнасці. – 2010. – № 5. – С. 138.

23. А. с. 1319146 СССР, МКИ 4 Н 02 Н 7/08. Устройство для защиты трехфазного асинхронного электродвигателя от работы на двух фазах / В. В. Гурин, А. А. Галейша; Белорус. ин-т механиз. с. х. – № 3885194/24-07; заявлено 18.04.85; опубликовано 23.06.87 // Открытия. Изобрет. – 1987. – № 23. – 3 с.

24. А. с. 877786 СССР, М. Кл³ 4 Н 02 Н 7/09, Н 02 Н 3/24. Устройство для защиты трехфазного асинхронного электродвигателя от работы на двух фазах / В. В. Гурин, П. Т. Шипуль и М. А. Прищепов; Белорус. ин-т

механиз. с. х. – № 2884732/24-07; заявл. 20.02.80; опубл. 30.10.81 // Открытия. Изобрет. – 1981. – № 40. – 5 с.

25. А. с. 904077 СССР, МКИ 4 Н 02 Н 7/08. Устройство для защиты трехфазного электродвигателя от обрыва фазы / П. Т. Шипуль, Л. А. Калинин, В. В. Гурин и М. А. Прицепов; Белорус. ин-т механиз. с. х. – № 2884744/24-07; заявл. 21.02.80; опубл. 07.02.82 // Открытия. Изобрет. – 1982. – № 5. – 4 с.

26. А. с. 1275630 СССР, МКИ 4 Н 02 Н 7/08. Устройство для защиты трехфазного асинхронного электродвигателя от аномального режима / Н. И. Бохан, В. В. Гурин, В. И. Фещенко; Белорус. ин-т механиз. с. х. – № 3807380/24-07; заявл. 31.10.84; опубл. 07.12.86 // Открытия. Изобрет. – 1986. – № 45. – 3 с.

27. А. с. 1432652 СССР, МКИ 4 Н 02 Н 7/08. Устройство для защиты трехфазного асинхронного электродвигателя от работы на двух фазах и режима заторможенного ротора / В. В. Гурин, А. А. Гелейша; Белорус. ин-т механиз. с. х. – № 3989068/24-07; заявл. 16.12.85; опубл. 23.10.88 // Открытия. Изобрет. – 1988. – № 39. – 3 с.

28. А. с. 1394320 СССР, МКИ 4 Н 02 Н 7/08. Устройство для защиты трехфазного асинхронного электродвигателя от аварийного режима / А. А. Гелейша, В. В. Гурин; Белорус. ин-т механиз. с. х. – № 4005780/24-07; заявл. 16.12.85; опубл. 07.05.88 // Открытия. Изобрет. – 1988. – № 17. – 3 с.

29. А. с. 1320861 СССР, МКИ 4 Н 02 Н 7/08. Устройство для защиты трехфазного асинхронного электродвигателя от работы на двух фазах и режима заторможенного ротора / А. А. Гелейша, В. В. Гурин; Белорус. ин-т механиз. с. х. – № 3986556/24-07; заявл. 11.12.85; опубл. 30.06.87 // Открытия. Изобрет. – 1987. – № 24. – 3 с.

30. А. с. 1390692 СССР, МКИ 4 Н 02 Н 7/08. Устройство для защиты трехфазного асинхронного электродвигателя от работы на двух фазах и режима заторможенного ротора / В. В. Гурин, А. А. Гелейша; Белорус. ин-т механиз. с. х. – № 4134440/24-07; заявл. 15.10.86; опубл. 23.04.88 // Открытия. Изобрет. – 1988. – № 15. – 3 с.

31. А. с. 1410176 СССР, МКИ 4 Н 02 Н 7/08. Устройство для защиты трехфазного асинхронного электродвигателя от работы на двух фазах и режима заторможенного ротора / Н. И. Бохан, В. В. Гурин, А. А. Гелейша; Белорус. ин-т механиз. с. х. – № 4149841/24-07; заявл. 19.11.86; опубл. 15.07.88 // Открытия. Изобрет. – 1988. – № 26. – 3 с.

32. А. с. 1390693 СССР, МКИ 4 Н 02 Н 7/08. Устройство для защиты трехфазного асинхронного электродвигателя от работы на двух фазах / В. В. Гурин, А. А. Гелейша; Белорус. ин-т механиз. с. х. – № 4135292/24-07; заявл. 20.10.86; опубл. 23.04.88 // Открытия. Изобрет. – 1988. – № 15. – 3 с.

33. А. с. 936179 СССР, МКИ 4 Н 02 Н 7/08, Н 02 Н 5/08. Устройство для температурной защиты асинхронного электродвигателя / В. В. Гурин, М. А. Прицепов; Белорус. ин-т механиз. с. х. – № 2919297/24-07; заявл. 05.05.80; опубл. 15.06.82 // Открытия. Изобрет. – 1982. – № 22. – 5 с.

34. А. с. 1274063 СССР, МКИ 4 Н 02 Н 7/085, 5/04 /. Устройство для тепловой защиты электродвигателя / В. В. Гурин, А. А. Гелейша; Белорус. ин-т механиз. с. х. – № 3850641/24-07; заявл. 04.02.85; опубл. 30.11.85 // Открытия. Изобрет. – 1986. – № 44. – 4 с.

35. Об использовании магнитного поля рассеяния асинхронных двигателей для реализации защиты от несимметричных режимов / А. А. Пястолов, В. В. Бурлов, А. В. Частовский // Электрификация сельскохозяйственного производства : сб. науч. тр. – Новосибирск, 1983. – С. 45–51.

36. Защита асинхронного двигателя при электрических и механических повреждениях. Electrical motor protection guards against current and mechanical faults / Dayment Doug // Process Eng., 1978, Feb. – P. 34–36.

37. *Тищенко, А. К.* Обоснование принципа построения и разработка устройств, исключающих несимметричный режим работы установок микроклимата : автореферат дис. ... канд. техн. наук : 05.20.02 / А. К. Тищенко. Харьков – 1992. – 21 с.

38. Работа асинхронного электродвигателя по схеме неполной звезды с нулем / О. Б. Кисель, Ю. Е. Шпилько, Г. П. Лысачев // Механиз. и электрифик. соц. с. х. – 1974. – № 12. – С. 27–28.

39. А. с. 1598028 СССР, МКИ Н 02 Н 7/08. Устройство для включения и защиты трехфазного асинхронного электродвигателя от исчезновения напряжения в одной из фаз питания / А. И. Игнайкин, В. А. Москалев; Вологодск. политехн. ин-т. – № 4307785/24-07; заявл. 21.09.87; опубл. 07.10.90 // Открытия. Изобрет. – 1990. – № 37. – 3 с.

40. А. с. 1034121 СССР, МКИ Н 02 J 9/06. Устройство автоматического резервирования источника питания трехфазного асинхронного двигателя / А. Л. Сияков, Н. И. Бохан, С. Н. Фурсенко,

В. Ф. Поворотный; Белорус. ин-т механиз. с. х. – № 3391095/24-07; заявл. 04.02.82; опубл. 26.01.83 // Открытия. Изобрет. – 1983. – № 29. – 3 с.

41. Защита технологического оборудования от работы в аварийных режимах / А. П. Живило, В. А. Зерников, Я. Б. Шпектор // Механиз. и электрифик. соц. с. х. – 1983. – № 3. – С. 54–55.

42. Защитные устройства для двухскоростных двигателей. Cost effective protection for two-speed motors / C. Rickson // “Elec. Times”. – 1975. – № 4342. – Р. 9.

43. О параметрах трехфазного асинхронного электродвигателя, используемых для защиты его от перегрузки / В. В. Гурин, Е. В. Лавцевич, П. А. Равинский // Агропанорама. – 2008. – № 3. – С. 28–32.

44. *Сыромятников, И. А.* Режимы работы асинхронных и синхронных электродвигателей / И. А. Сыромятников; под ред. А. М. Мамиконянца. – 4-е изд., – Москва : Энергоатомиздат, 1984. – 240 с.

45. ГОСТ Р 51689–2000. Машины электрические вращающиеся. Двигатели асинхронные мощностью от 0,12 до 400 кВт включительно : государственный стандарт РФ. – Введен 01.01.2002. – Москва : Всероссийский институт стандартизации и сертификации в машиностроении Госстандарта России, 2002. – 15 с.

46. Защитные устройства асинхронных электродвигателей малой мощности / Кропачев И. Г. // Пром. энерг. – 1983. – № 10. – С. 27–32.

47. Проблемы защиты электродвигателей в сельском хозяйстве / А. П. Казимир, А. О. Грундулис // Электротехника. – 1980. – № 9. – С. 49–51.

48. Регулируемые асинхронные электродвигатели в сельскохозяйственном производстве / под редакцией Д. Н. Быстрицкого. – Москва : Энергия, 1975. – 400 с.

49. О перегрузочной характеристике асинхронного электродвигателя и защитной характеристике устройства защиты электродвигателя от перегрузки по току / В. В. Гурин, Е. В. Лавцевич // Агропанорама. – 2008. – № 6. – С. 28–32.

50. А. с. 1534608 СССР МКИ Н 02 Н 7/08. Устройство для защиты трехфазного электродвигателя от перегрузки и обрыва фазы / В. В. Гурин, А. А. Гелейша; Белорус. ин-т механизации с. х. Заявл. 27.07.87, № 4289882/24-07, опубликовано 07.01.90 // Открытия. Изобрет. – 1990. – № 1. – 4 с.

51. А. с. 1377955 СССР МКИ Н 02 Н 7/08. Устройство для защиты трехфазного электродвигателя от аварийного режима / В. В. Гурин, А. А. Гелейша; Белорус. ин-т механиз. с. х. Заявл. 05.05.85, № 3892259/24-07, опубликовано 29.02.88 // Открытия. Изобрет. – 1988. – № 8. – 6 с.

52. А. с. 1319147 СССР МКИ Н 02 Н 7/08. Устройство для защиты электродвигателя переменного тока от перегрузки / В. В. Гурин, Н. И. Бохан, А. А. Гелейша; Белорус. ин-т механиз. с. х. Заявл. 28.05.85, № 3899826/24-07, опубликовано 23.06.87 // Открытия. Изобрет. – 1987. – № 23. – 3 с.

53. А. с. 1403199 СССР МКИ Н 02 Н 7/08. Устройство для защиты электродвигателя переменного тока от перегрузки / В. В. Гурин, А. А. Гелейша; Белорус. ин-т механиз. с. х. Заявл. 11.07.85, № 3950501/24-07, опубликовано 15.06.88 // Открытия. Изобрет. – 1988. – № 22. – 4 с.

54. Зарубежные устройства защиты трехфазных асинхронных электродвигателей на базе микропроцессоров и микро ЭВМ / Н. М. Михайлов, С. К. Яковлев // Сб. трудов ВНИИР, Чебоксары. – 1987. – С. 53–58.

55. Применение микро ЭВМ для управления режимами работы асинхронного электродвигателя общего назначения / В. И. Радин и [др.] // Электротехника. – 1987. – № 4. – С. 17–19.

56. *Бараночников, М. Л.* Микромагнитоэлектроника : Серия «Учебник» / М. Л. Бараночников; Т. 1. – Москва : ДМК Пресс, 2001. – 544 с.

57. Изолированный усилитель ACPL-785J-000E с контролем тока короткого замыкания и перегрузки по току от Avago Technologies [Электронный ресурс] : / “Coogole”: Формат файла : Microsoft Word. – Режим доступа : http://www.terraelectronica.ru/news_postup.php?ID=1631. – Дата доступа : 4.06.2011.

58. Защита двигателя при эксплуатации : материалы для проектирования / Издано департаментом «Техника автоматизации и приводы» ООО Сименс. – Москва, 2005. – 25 с.

59. Электротехнический справочник : справочник / под общ. ред. П. Г. Грудинского [и др.]. Т. 1. – 5-е изд. – Москва : Энергия, 1974. – 776 с.

60. *Чунихин, А. А.* Электрические аппараты : учебник / А. А. Чунихин. – 3-е изд. – Москва : Энергоатомиздат, 1988. – 720 с.

61. Методические указания по применению защит электродвигателей, используемых в сельском хозяйстве: инструкция / А. М. Мусин [и др.]. – Москва : ВИЭСХ, 1989. – 39 с.
62. Тубис, Я. Б. Температурная защита асинхронных электродвигателей в сельскохозяйственном производстве / Я. Б. Тубис, Г. К. Белов. – Москва : Энергия, 1977. – 104 с.
63. Борисенко, А. И. Охлаждение промышленных электрических машин / А. И. Борисенко, О. Н. Костиков, А. И. Яковлев. – М.: Энергоатомиздат, 1983. – 296 с.
64. Быстродействующая температурная защита асинхронного электродвигателя / В. В. Гурин, Е. В. Лавцевич, П. А. Равинский // Агропанорама. – 2008. – № 2. – С. 28–32.
65. ГОСТ 27222–91 (СТ МЭК 279–69, СТ СЭВ 1107–78). Машины электрические вращающиеся. Измерение сопротивления обмоток переменного тока без отключения от сети. – Введен 01.01.92. – Москва : Издательство стандартов, 1991. – 20 с.
66. Коварский, Е. М. Испытание электрических машин / Е. М. Коварский, Ю. И. Янко. – Москва : Энергоатомиздат, 1990. – 320 с.
67. Бочковский, Р. В. Контактные датчики температуры / Р. В. Бочковский. – Москва : Энергия, 1979. – 237 с.
68. Сапун, Г. А. Защита асинхронных электродвигателей от перегрузки / Г. А. Сапун. – Минск : Наука и техника, 1965. – 204 с.
69. Моторпротекторы Sensata – защита электродвигателей / Е. Иванов // Новости электротехники. – 2007. – № 5 – С. 21–23.
70. Термисторное реле защиты РТ-М01-1-15 УХЛ2 [Электронный ресурс] : / “Cooogle” : Формат файлов : PDF/Adobe Acrobat. – Быстрый просмотр. – Режим доступа : www.meandr.ru/products/arch/rt-m01-15.pdf. – Дата доступа : 1.06.2011.
71. Реле электронное защиты электродвигателей РЭЗЭ-6 : руководство по эксплуатации РЭЗЭ-6.00.000.РЭ [Электронный ресурс] : / “Cooogle” : Формат файлов : PDF/Adobe Acrobat. – Быстрый просмотр. – Режим доступа : http://www.kipkr.ru/wd_docs/rez6.pdf. – дата доступа: 16.09.20010.
72. Устройство защитного отключения трехфазного электродвигателя ОВЕН УЗОТЭ-2У [Электронный ресурс] : / “Cooogle” : Формат файла: Microsoft Word. – Режим доступа: <http://www.owen.ru/catalog/32648131>. – дата доступа : 18.04.20010.
73. Реле контроля температуры. Типоряд С51х. [Электронный ресурс] : / “Cooogle” : Формат файлов : PDF/Adobe Acrobat. – Быстрый просмотр. – Режим доступа : http://www.ntknn.ru/project/ac_list/list_5/680_12.pdf. – Дата доступа : 19.04.2010.
74. ГОСТ 27917-88 (МЭК 34-II-2). Машины электрические вращающиеся. Встроенная температурная защита. Термодетекторы и вспомогательная аппаратура управления, используемые в системах температурной защиты. – Введен 01.01.1990. – Москва : Государственный комитет СССР по стандартам, 1989. – 38 с.
75. Измерение температуры: теория и практика / В. Гарсия // Современные технологии автоматизации. – 1999. – № 1. – С. 82–87.
76. Микросхемы-термодатчики К1019ЕМ1, К1019ЕМ1А / С. Бирюков // Радио. – 1996. – № 7. – С. 5–7.
77. Направления совершенствования температурной защиты асинхронных электродвигателей / В. В. Гурин, П. А. Равинский // Агропанорама. – 2009. – № 3. – С. 18–21.
78. Применение встроенной температурной защиты/ Р. З. Кунин // Механиз. и электрифик. соц. с. х. – 1980. – № 10. – С. 42–43.
79. О паразитных ЭДС в проводах подключения термодатчиков к температурной защите электродвигателей /В. Н. Данилов, С. В. Оськин // Повышение надежности работы электроустановок в сельском хозяйстве : сб. науч. тр. – Челябинск. –1986. – С. 19–24.
80. Защита электродвигателей от тепловых перегрузок // Науч.-техн. бюл. по механиз. и электрифик. животноводства. Центр. н.-и. и проект.-технол. ин-т механиз. и электрифик. животноводства Южн. зоны СССР. – 1977. – № 8. – С. 86–91.
81. А. с. 1096725 СССР МКИ Н 02 Н 5/04. Устройство для импульсной защиты электродвигателя от перегрева / Е. Б. Колесников, А. Б. Колесников. Новомоск. фил. Моск. Хим.-технол. ин-та. Заявл. 17.11.82, № 3511520/24 – 07, опубликовано 23.06.84 // Открытия. Изобрет. – 1984. – № 21. – 4 с.
82. Направления совершенствования тепловой защиты электродвигателей / И. П. Сыч // Механиз. и электрифик. с. х. – 1985. – № 12. – С. 3–8.
83. Температурная защита электродвигателей с компенсацией динамической погрешности / И. П. Сыч // Техника в с. х. – 1990, № 3. – С. 24–27.

84. К вопросу разработки позисторных защит электродвигателей / Н. Я. Портной, В. Г. Стройников // Известия вузов. Электромеханика. – 1986. – № 3. – С. 125–127.

85. А. с. 1408490 СССР МКИ Н 02 Н 5/04. Устройство для тепловой защиты трехфазного асинхронного электродвигателя / А. А. Гелейша, В. В. Гурин; Белорус. ин-т механиз. с. х. Заявл. 10.03.87, № 4207653/24-07, опубликовано 07.07.88 // Открытия. Изобрет. – 1988. – № 25. – 4 с.

86. Данилов, В. Н. Повышение эксплуатационной надежности электродвигателей, используемых в сельскохозяйственном производстве, электронными средствами защиты : автореферат дис. ... докт. техн. наук : 05.20.02 / В. Н. Данилов. – Челябинск, 1991. – 36 с.

87. Заявка 3012364 ФРГ МКИ Н 02 Р 5/00. Verfahren zur Regelung eines Elektromotors / Franz Hafenscher, Thomas Horauf, Rudolf Muller; Triumph-Adler Aktiengesellschaft fur Buro-und Informationstechnik. Заявл. 29.03.80, № 3012364.9.32, опублик. 01.10.81.

88. Результаты сравнительных испытаний тепловой и температурной защит электродвигателей / А. Х. Тлеухов // Науч.-техн. бюл. по электрифик. с. х. ВНИИ электрифик. с. х. – 1979. – № 2/38. – С. 14–17.

89. Крамаренко, А. П. Технические средства и методы повышения эксплуатационной надежности электродвигателей, эксплуатирующихся в сложных условиях сельскохозяйственного производства : автореферат дис. ... канд. техн. наук : 05.20.02 / А. П. Крамаренко. – Москва, 1987. – 16 с.

90. Овчаров, В. В. Диагностирование электрооборудования сельскохозяйственных предприятий по параметрам эксплуатационных режимов : автореферат дис. ... докт. техн. наук : 05.20.02 / В. В. Овчаров. – Челябинск, 1991. – 44 с.

91. Богаенко, И. Н. Температурная защита асинхронных электродвигателей / И. Н. Богаенко, Ю. В. Сердюк, М. А. Шатунов. – Киев : Техника, 1987. – 93 с.

92. Разработка защиты электродвигателей на основе моделирования тепловых процессов / О. И. Хомутов, В. В. Усов // Механиз. и электрифик. с. х. – 1983. – № 12. – С. 51–52.

93. Цифровое защитное устройство для группы электродвигателей. Digitale Schutzeinrichtung fur Motorgruppen : Пат. 276762 ГДР, МКИ Н 02 Н 7/085, Н 02 Н 6/00 / Thomas Liebach [и др.]; VEB Stark-

strom-Anlagenbau Leipzig-Halle.– №3214344. Заявл. 04. 11. 88; Опубл. 07.03.90.

94. Полезные советы с кафедры электротехники / Н. Мазуха // Птицеводство. – 2003. – № 6. – С. 36.

95. Устройство для автоматической сушки изоляции обмоток асинхронного электродвигателя во время технологических пауз : пат. 13258 Респ. Беларусь, МПК (2009) Н 02К 15/12, Н 02Н 5/00, Н 02Н 7/08. / В. В. Гурин, Е. В. Лавцевич, П. А. Равинский; заявитель и патентообладатель : Бел. гос. аграрн. техн. ун-т. – № а 20071189; заявл. 2007.10.01; опубл. 2010.06.30 // Афіцыйны бюл. / Нац. цэнтр інтэлектуал. уласнасці. – 2010. – № 3. – С. 139–140.

96. Устройство для защиты асинхронного трехфазного электродвигателя от включения в сеть при неполнофазном режиме сети, обратном чередовании фаз сети и недопустимом снижении сопротивления изоляции обмоток : пат. 13403 Респ. Беларусь, МПК (2009) Н 02 Н 7/08. / В. В. Гурин, Е. В. Лавцевич; заявитель и патентообладатель: Бел. гос. аграрн. техн. ун-т.; № а 20071339, заявл. 2007.11.05; опубл. 2010.08.30 // Афіцыйны бюл. / Нац. цэнтр інтэлектуал. уласнасці. – 2010. – № 4. – С. 150–151.

97. Устройство контроля сопротивления изоляции и турбинного вращения погружного электронасоса / В. А. Дайнеко, В. В. Гурин, Д. В. Батраков, И. Л. Русак // Агропанорама. – 2005. – № 1. – С. 12–15.

98. Электроосмотическая сушка изоляции электродвигателей / А. Е. Немировский, Н. К. Мороз // Техника в с. х. – 1984. – № 12. – С. 26.

99. Сушка изоляции электродвигателей насосных агрегатов / Л. Г. Прищеп, С. П. Изюмцев, А. В. Сергованцев // Техника в с. х. – 1991. – № 1. – С. 20–21.

100. Новые способы сушки электрооборудования / А. Е. Немировский // Техника в с. х. – 1989. – № 6. – С. 41–43.

101. Маслов, В. В. Влагостойкость электрической изоляции / В. В. Маслов – Москва : Энергия, 1973. – 208 с.

102. Зарядное устройство на базе регулятора мощности PR1500i / С. Муралев // Радио. – 2009. – № 3. – С. 40.

103. А. с. 1045324 СССР, МКИ Н 02 Н 7/08, Н 02 К 3/44. Устройство для защиты обмоток электродвигателя от конденсации влаги / И. И. Мартыненко [и др.]; УНИИМСХ, № 2487527/24 – 07, заявл. 20.05.77; опубликовано 30.09.83 // Открытия. Изобрет. – 1983. – № 36. – 5 с.

104. Устройство для защиты обмоток электродвигателя от конденсации влаги : пат. 13259 Респ. Беларусь, МПК (2009) Н 02Н 5/00, Н 02Н 7/08, Н 02К 15/12. / В. В. Гурин, Е. В. Лавцевич, П. А. Равинский; заявитель и патентообладатель : Бел. гос. аграрн. техн. ун-т; № а 20071342, заявл. 2007.11.05; опубл. 2010.06.30 // Афіцыйны бюл. / Нац. цэнтр інтэлектуал. уласнасці. – 2010. – № 3. – С. 138.

105. Сушка электродвигателей импульсами тока / В. Ванурин, А. Пахомов // Техника в с. х. – 1986. – № 6. – С. 28–29.

106. Устройство автоматической сушки обмоток электродвигателя / А. Пахомов // Радио. – 2002. – № 6. – С. 32–33.

107. Устройство для защиты асинхронного трехфазного электродвигателя от включения в сеть при неполнофазном режиме сети, обратном чередовании фаз и недопустимом снижении сопротивления изоляции обмоток: пат. 6082 Респ. Беларусь, МПК (2009) Н 02Н 7/08, Н 02К 15/12. / В. В. Гурин, В. В. Мурашко, Е. В. Лавцевич; заявитель и патентообладатель: Бел. гос. аграрн. техн. ун-т; № и 20090759, заявл. 2009.09.14; опубл. 2010.04.30 // Афіцыйны бюл. / Нац. цэнтр інтэлектуал. уласнасці. – 2010. – № 2. – С. 231–232.

108. *Гурин, В. В.* Автоматическая защита электрооборудования. В 2 ч. Ч. 1. Защита электрических цепей : учебно-методическое пособие / В. В. Гурин. – Минск : БГАТУ, 2010. – 360 с.

109. *Кабдин, Н. Г.* Повышение эксплуатационной надежности асинхронных двигателей в сельскохозяйственном производстве : автореферат дис. ... канд. техн. наук : 05. 20. 02 / Н. Г. Кабдин. – Москва, 2002. – 21 с.

110. Защита трехфазных асинхронных электродвигателей комплексными универсальными средствами / В. В. Гурин, Е. В. Лавцевич // Агропанорама. – 2008. – № 5. – С. 28–32.

111. Научно-производственное предприятие «Бинар». Система электронной бесконтактной защиты электродвигателя [Электронный ресурс] : / “Coogole”: Формат файла: Microsoft Word. – Режим доступа : www.binar-by.com/produce/1.html. – Дата доступа : 9.11.2010.

112. Реле : технический каталог. – Чебоксары : ОАО «ВНИИР», 2004. – 36 с.

113. Аппарат защиты электродвигателей АЗД [Электронный ресурс] : / “Coogole”: Формат файла : Microsoft Word. – Режим доступа : <http://azd.ami.ua/azd.php>. – Дата доступа : 11.11.2010.

114. Блок токовой защиты БТ31-1У [Электронный ресурс] : / “Coogole”: Формат файла : Microsoft Word. – Режим доступа : www.megom.narod.ru/price.doc. – Дата доступа : 12.11.2010.

115. Универсальные электронные устройства защиты электродвигателей серии УЗ-ЗД / Промышленный каталог 06. 20. 102 – Москва : Информэлектро. – 2003. – 5 с.

116. Прибор комбинированной защиты асинхронных электроприводов ФУКЗ-АФМ [Электронный ресурс] : / “Coogole”: Формат файла : Microsoft Word. – Режим доступа : <http://www.sibavtokrk.ru/4103298489>. – Дата доступа : 13.11.2010.

117. *Соркин, М.* Универсальная защита для асинхронного электродвигателя: миф или реальность [Электронный ресурс] : / “Coogole”: Формат файла: Microsoft Word. – Режим доступа : [web. www.novatek-electro.com](http://www.novatek-electro.com). – Дата доступа : 15.11.2010.

118. ПАО «Электротехнический завод» Релсис®. Реле защиты двигателей РДЦ-01 [Электронный ресурс] : / “Coogole”: Формат файла : Microsoft Word. – Режим доступа : <http://www.relsis.ua/relsis/tree/main.htm>. – Дата доступа : 17.11.2010.

119. Техническое описание на универсальный блок защиты электродвигателей УБЗ-301 [Электронный ресурс] : / “Coogole”: Формат файла : Microsoft Word. – Режим доступа : [web. www.novatek-electro.com](http://www.novatek-electro.com). – Дата доступа : 16.11.2010.

120. ООО «Энергосберегающие системы и технологии». Реле защиты электродвигателей [Электронный ресурс] : / “Coogole”: Формат файла : Microsoft Word. – Режим доступа : <http://www.ensytech.com>. – Дата доступа : 18.11.2010.

121. ООО «Крейтек». Устройство защиты электродвигателя УЗДР-8 [Электронный ресурс] : / “Coogole”: Формат файла : Microsoft Word. – Режим доступа : <http://www.thermoregulator.ru/uzdr8.html>. – Дата доступа : 19.11.2010.

122. ООО «СибЭлектроЗащита». Реле контроля и защиты РКЗМ-R [Электронный ресурс] : / “Coogole”: Формат файла : Microsoft Word. – Режим доступа : http://www.sezekt.com/rele_kontrolya_i_zaschit2. – Дата доступа : 21.11.2010.

123. ООО ПКФ «Электротрейд». Микропроцессорные блоки защиты электродвигателей [Электронный ресурс] : / “Coogole”: Формат файла : Microsoft Word. – Режим доступа : <http://www.el-treid.ru>. – Дата доступа : 22.11.2010.

124. А. с. 1413689 СССР, МКИ Н 02 Н 7/08. Устройство для защиты трехфазного электродвигателя от работы на двух фазах / А. А. Галейша, В. В. Гурин; Белорусский институт механизации сельского хозяйства – № 4156063/24-07; заявл. 15.10.86; опубликовано 30.07.88 // Открытия. Изобр. 1988. – Бюл. № 28. – 3 с.

125. *Лещевец, П. Э.* Защита и диагностика погружных электродвигателей в сельскохозяйственном водоснабжении : автореферат дис. ... канд. техн. наук : 05. 20. 02 / П. Э. Лещевец. – Минск, 1988. – 16 с.

126. ОАО «Завод Промбурвод». Станция управления и защиты СУЗ «Родник». Руководство по эксплуатации [Электронный ресурс] : / “Coogole”: Формат файла : Microsoft Word. – Режим доступа : <http://promburvod.com>. – Дата доступа : 10.06.2011.

127. Определение средневзвешенной стоимости электродвигателя и требуемой стоимости защиты / Е. В. Лавцевич // Агропанорама. – 2009, № 1. – С. 27–29.

128. Методические рекомендации по экономической оценке ущерба, наносимых сельскохозяйственному производству отказами электрооборудования. – Москва : ВИЭСХ. – 1987. – 36 с.

129. *Кузнецов, Б. В.* Асинхронные электродвигатели и аппараты управления / Б. В. Кузнецов, М. Ф. Сацукевич. – Минск : Беларусь, 1982. – 222 с.

ДЛЯ ЗАМЕТОК

Учебное издание

Гурин Владимир Владимирович

АВТОМАТИЧЕСКАЯ ЗАЩИТА ЭЛЕКТРООБОРУДОВАНИЯ

Учебно-методическое пособие

В двух частях

Часть 2

ЗАЩИТА АСИНХРОННЫХ ТРЕХФАЗНЫХ
ЭЛЕКТРОДВИГАТЕЛЕЙ

Ответственный за выпуск В. А. Дайнеко
Редакторы Ю. П. Каминская, Н. А. Антипович
Компьютерная верстка А. И. Стебули

Подписано в печать 28. 09.2011 г. Формат 60×84¹/16.

Бумага офсетная. Ризография.

Усл. печ. л. 26,27. Уч.-изд. л. 20,54. Тираж 150 экз. Заказ 828.

Издатель и полиграфическое исполнение: учреждение образования
«Белорусский государственный аграрный
технический университет»
ЛИ № 02330/0552984 от 14.04.2010
ЛП № 02330/0552743 от 02.02.2010
Пр. Независимости, 99–2, 220023, Минск