

**МИНИСТЕРСТВО СЕЛЬСКОГО ХОЗЯЙСТВА
И ПРОДОВОЛЬСТВИЯ РЕСПУБЛИКИ БЕЛАРУСЬ**

**Учреждение образования
«БЕЛОРУССКИЙ ГОСУДАРСТВЕННЫЙ АГРАРНЫЙ
ТЕХНИЧЕСКИЙ УНИВЕРСИТЕТ»**

Г. И. Янукович

**ПУТИ УЛУЧШЕНИЯ ПОКАЗАТЕЛЕЙ НЕСИММЕТРИИ
И НЕСИНУСОИДАЛЬНОСТИ НАПРЯЖЕНИЯ
В СЕЛЬСКОХОЗЯЙСТВЕННЫХ ЭЛЕКТРОУСТАНОВКАХ**

Минск
БГАТУ
2013

УДК 631.371:621.31

Янукович, Г. И. Пути улучшения показателей несимметрии и несинусоидальности напряжения в сельскохозяйственных электроустановках / Г. И. Янукович. – Минск : БГАТУ, 2013. – 216 с. : ил. – ISBN 978-985-519-622-9.

Изложены основные положения государственного стандарта на качество электрической энергии (ГОСТ 13109–97), приведены показатели качества электроэнергии и требования, предъявляемые к ним. Дан анализ способов повышения качества напряжения. Приведены теоретические и экспериментальные результаты исследования трансформаторов, рекомендованных кафедрой электроснабжения для повышения качества напряжения.

Предназначено для научных работников, руководителей и специалистов сельскохозяйственных предприятий, преподавателей и студентов учреждений образования

Табл. 3. Ил. 59. Библиогр.: 188 назв.

Рецензенты:

профессор кафедры «Электрические системы»
УО «Белорусский национальный технический университет»,
доктор технических наук, профессор *М. А. Короткевич*;
проректор по научной работе
УО «Белорусский государственный аграрный
технический университет»,
доктор технических наук *М. А. Прищепов*

ISBN 978-985-519-622-9

© БГАТУ, 2013

СОДЕРЖАНИЕ

ВВЕДЕНИЕ.....	6
1. ПРОБЛЕМА НЕСИММЕТРИИ И НЕСИНУСОИДАЛЬНОСТИ НАПРЯЖЕНИЯ В СЕЛЬСКИХ ЭЛЕКТРИЧЕСКИХ СЕТЯХ.....	7
1.1. Анализ качества напряжения в сельских электрических сетях 380/220 В.....	7
1.2. Причины возникновения несимметрии и несинусоидальности напряжения	10
1.3. Влияние несимметрии и несинусоидальности напряжения на работу потребителей.....	13
1.3.1. Влияние отклонений напряжения.....	13
1.3.2. Влияние несимметрии напряжений.....	20
1.3.3. Влияние несинусоидальности напряжения	23
1.4. Способы симметрирования напряжения в низковольтных электрических сетях	28
1.5. Способы минимизации высших гармоник	31
1.6. Влияние схем соединения обмоток трансформаторов на качество напряжения.....	35
2. НЕСИММЕТРИЧНЫЕ РЕЖИМЫ РАБОТЫ ТРЕХФАЗНЫХ СИММЕТРИРУЮЩИХ ТРАНСФОРМАТОРОВ	43
2.1. Методика исследования несимметричной работы трансформаторов	43
2.2. Трансформатор со схемой соединения обмоток «звезда–звезда–нуль–разомкнутый треугольник» (Y/Y_n –разомкнутый треугольник).....	44
2.2.1. Общий случай несимметрии	44
2.2.2. Расчет однофазного тока короткого замыкания.....	65
2.2.3. Экспериментальные исследования симметрирующей способности трансформатора Y/Y_n –разомкнутый треугольник	66
2.2.3.1. Задачи и методика экспериментальных исследований.....	66
2.2.3.2. Экспериментальное определение напряжений с первичной и вторичной сторон трансформатора и тока в нулевом проводе для схем «звезда–звезда–нуль» (Y/Y_n) и Y/Y_n –разомкнутый треугольник при несимметричной нагрузке фаз	68
2.2.3.3. Исследование зависимости фазного напряжения высокой и низкой сторон трансформатора для схем соединения Y/Y_n и Y/Y_n –разомкнутый треугольник от тока нагрузки	68
2.2.3.4. Исследование зависимости коэффициентов несимметрии напряжений по обратной и нулевой последовательности	74
2.2.3.5. Исследование сопротивления нулевой последовательности трансформатора.....	79
2.3. Трансформатор со схемой соединения обмоток «звезда–звезда–нуль с симметрирующим устройством» (Y/Y_n СУ).....	88
2.3.1. Условия анализа несимметричной работы трансформатора	88
2.3.2. Общий случай несимметрии.....	89
2.3.3. Экспериментальные исследования симметрирующей способности трансформатора Y/Y_n СУ.....	99
2.3.4. Исследование зависимости коэффициентов несимметрии напряжений по обратной и нулевой последовательности трансформатора Y/Y_n СУ	103
2.3.5. Сопротивление нулевой последовательности трансформатора Y/Y_n СУ	105
2.3.6. Исследование влияния симметрирующего устройства на нагрев трансформатора Y/Y_n СУ	110
2.4. Трансформатор со схемой соединения обмоток «звезда–треугольник с зигзагом» (Y/Δ с зигзагом).....	118
2.4.1. Область применения трансформатора	118
2.4.2. Работа трансформатора при несимметричной нагрузке фаз	124
2.4.2.1. Общий случай несимметрии	124
2.4.2.2. Экспериментальные исследования симметрирующей способности трансформатора Y/Δ с зигзагом.....	137
3. ПАРАЛЛЕЛЬНАЯ РАБОТА СИММЕТРИРУЮЩИХ ТРАНСФОРМАТОРОВ С ТРАНСФОРМАТОРОМ Y/Y_n	142
3.1. Задачи и методика исследования.....	142
3.2. Экспериментальное определение параметров и исследование их зависимостей при параллельной работе трансформаторов на несимметричную нагрузку.....	143
3.3. Коэффициенты несимметрии напряжений по обратной и нулевой последовательности при параллельной работе	

пар трансформаторов Y/Y_n , Y/Y_n и Y/Y_n , Y/Y_n -разомкнутый треугольник	148
3.4. Распределение нагрузки между параллельно работающими трансформаторами со схемами соединения обмоток Y/Y_n -разомкнутый треугольник и Y/Y_n при несимметричной нагрузке	151
4. РАБОТА ТРАНСФОРМАТОРОВ ПРИ НЕЛИНЕЙНОЙ НАГРУЗКЕ	153
4.1. Общие замечания.....	153
4.2. Характеристика спектра фазных напряжений вторичной стороны трансформаторов Y/Y_n -разомкнутый треугольник и Y/Y_n СУ при работе их на нелинейную нагрузку.....	154
4.3. Экспериментальные исследования способности трансформаторов Y/Y_n -разомкнутый треугольник и Y/Y_n СУ улучшать форму кривой напряжения	159
5. ТЕХНИКО-ЭКОНОМИЧЕСКАЯ ОПТИМИЗАЦИЯ ПАРАМЕТРОВ ТРАНСФОРМАТОРОВ	166
5.1. Конструктивное исполнение трансформаторов.....	166
5.2. Методика расчета конструктивных параметров и технических характеристик трансформаторов	169
5.3. Заводские и производственные испытания промышленных образцов симметрирующих трансформаторов.....	170
5.4. Техничко-экономическая оценка эффективности применения трансформаторов для улучшения показателей несимметрии и несинусоидальности напряжения в сельскохозяйственных электроустановках.....	175
СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ.....	180
ПРИЛОЖЕНИЯ.....	195

ВВЕДЕНИЕ

В настоящее время в хозяйствах республики имеется большое количество животноводческих предприятий, производящих продукцию на промышленной основе. Происходит всесторонняя автоматизация и комплексная механизация производственных процессов. Растет энергооборуженность сельскохозяйственного производства, а вместе с ней и энергопотребление.

С ростом производственной нагрузки растет и коммунально-бытовая нагрузка.

Одновременно с быстрым ростом потребления электрической энергии повышаются требования к надежности электроснабжения потребителей, и все более остро ставится вопрос повышения ее качества, так как от качества электрической энергии зависит и качество производимой продукции.

Качество электрической энергии характеризуется рядом показателей, при которых потребители могут нормально работать.

В Республике Беларусь, как и в ряде других стран СНГ, качество электроэнергии нормировано ГОСТ 13109-97 «Нормы качества электрической энергии в системах электроснабжения общего назначения».

В данной монографии приведены показатели и нормы качества электрической энергии в электрических сетях систем электроснабжения общего назначения переменного трехфазного и однофазного тока частотой 50 Гц в соответствии с указанным стандартом. Представлена информация ряда авторов о влиянии качества электрической энергии на работу потребителей. В краткой форме изложены известные способы повышения качества электрической энергии. Подробно рассмотрены предложенные и исследованные на кафедре электроснабжения Белорусского государственного аграрного технического университета трансформаторы со схемами соединения обмоток «звезда-звезда-нуль-разомкнутый треугольник», «звезда-звезда-нуль с симметрирующим устройством», «звезда-треугольник с зигзагом», улучшающие показатели несимметрии и несинусоидальности напряжения. Приведены их теоретические и экспериментальные исследования. Показана экономическая эффективность использования их в сельских электрических сетях.

1. ПРОБЛЕМА НЕСИММЕТРИИ И НЕСИНУСОИДАЛЬНОСТИ НАПРЯЖЕНИЯ В СЕЛЬСКИХ ЭЛЕКТРИЧЕСКИХ СЕТЯХ

1.1. Анализ качества напряжения в сельских электрических сетях 380/220 В

Качество электрической энергии в нашей республике регламентировано ГОСТ 13109–97 [1]. Вопросами повышения качества электроэнергии и влияния его на работу потребителей занималась большая группа советских ученых: В. А. Веников [2, 3], И. А. Будзко [4–6], А. А. Глазунов [7–9], А. А. Тайц [10], Б. П. Айзенберг [11–15], А. Г. Захарин, Л. Е. Эбин, М. С. Левин [6, 16], В. Ю. Гессен [17], И. И. Мартыненко [18, 19], В. А. Козлов [20, 21], Л. А. Солдаткина [22, 23], А. А. Тушина [24, 25] и многие другие, а также ряд зарубежных авторов [162–164].

Качество электрической энергии характеризуется показателями, относящимися к режиму напряжений и частоте переменного тока. Так как все сельскохозяйственные потребители присоединены к государственной энергосистеме, то частота переменного тока является практически стабильной. Чаще всего имеют место проявления таких показателей, как отклонение напряжения от номинальной величины и несимметрия напряжений. Как показали исследования [26–28], отклонение напряжения от номинального зачастую бывает больше допустимой стандартом величины.

По данным исследований Академии коммунального хозяйства им. Памфилова, даже при тщательном распределении нагрузки между фазами несимметрию напряжений не удалось получить ниже 20 %.

Исследования, проведенные в 1958–1960 гг. ВИЭСХом в сельских сетях Московской, Челябинской, Ростовской, Крымской, Запорожской, Киевской, Черкасской, Донецкой и Сумской областях, показали, что несимметрия выражена резко. В 75 % всех измерений ток в нулевом проводе превышает 25 % от среднего тока, а в 50 % всех измерений он больше половины среднего тока.

Исследования несимметрии напряжений были проведены в Саратовской области (Соколов Н. М., Ермаков Ю. А. – 1972 г.), на Украине (Рожавский С. М., Зубко В. М., Свергун Ю. Ф. – 1972 г.), в Узбекистане (Ганихаджаев Н. Г. – 1972 г.). Анализ этих исследований показал, что несимметрия напряжений в сельских электрических сетях значительная и с ней необходимо считаться.

В 1972 г. исследованием несимметрии напряжений в Белоруссии занимался ЦНИИМЭСХ. Была собрана информация с 187 подстанций напряжений 10/0,4 кВ Минского и Гомельского сельских районов. Исследования показали, что 33 % всех отклонений напряжения за летние сутки и 53 % за зимние сутки выходило за допустимые в то время пределы ($\pm 7,5$ %). Только в 20 % измерений коэффициент несимметрии, нормируемый в то время для электродвигателей, не превышал величины 5 %.

Исследования качества напряжения в 1980-х гг. проводились также и кафедрой электроснабжения БГАТУ [29]. Анализу были подвергнуты графики напряжений, снятые в зимнее время в Минской, Гомельской, Гродненской и Могилевской областях. Они показали, что отклонения напряжения от номинального нередко значительно превышают допустимые пределы. Так, например, максимальные значения их достигали: в начале линии +11,4 % и –4,8 %, а в конце линии +8,3 % и –18,2 %, что, безусловно, недопустимо. Как видно, в сельских электрических сетях республики имеет место. Коэффициент несимметрии по обратной последовательности K_{2U} составил 4 %, а коэффициент несимметрии по нулевой последовательности K_{0U} – около 8 %.

В 2007 г. с использованием новейших приборов было проверено качество напряжения в электрических сетях ряда регионов республики. Исследования показали, что при загрузке установленных в жилом секторе трансформаторов менее 50 % их мощности коэффициент несимметрии напряжений по обратной последовательности в течение суток изменялся от 0,7 % до 1,1 %. Коэффициент несимметрии напряжений по нулевой последовательности – от 0,9 % до 2,1 %.

При загрузке установленных в коммунально-бытовом секторе трансформаторов более 50 % их мощности коэффициент несимметрии напряжений по обратной последовательности составил 2,1 %, коэффициент несимметрии напряжений по нулевой последовательности – 5,8 %.

В производственном секторе значение этих коэффициентов оказались несколько ниже. В ремонтных мастерских значение коэффициента K_{2U} составило 1,2–1,6 %, K_{0U} – 1,4–2,4 %. На свиноводческой ферме коэффициент K_{2U} находился в пределах 0,7–1,2 %, K_{0U} – 0,3–0,6 % [30].

Одним из показателей качества напряжения является несинусоидальность формы кривой. Искажение формы кривой напряжения означает наличие наряду с гармоникой основной частоты составляющих гармоник других высших частот. Это явление в большинстве случаев объясняется насыщением железа электрических машин и аппаратов. Причем, обычно возникают гармоники нечетного порядка. Нелинейность параметров сети и выпрямительные устройства приводят к появлению также и четных гармоник.

Первые исследования нелинейных искажений были проведены еще в прошлом столетии. М. С. Либкинд теоретически и экспериментально обосновал схему замещения двухобмоточного трансформатора, а также предложил методику определения гармоник ЭДС трансформатора [31]. М. П. Костенко, С. Р. Глинтерник, З. В. Харламова [32–34] провели исследования высших гармоник в сетях с вентильными преобразователями и регуляторами. Они предложили методику расчетов токов и напряжений высших гармоник в сетях электрических систем. В настоящее время методика расчетов уровней гармоник в системах электроснабжения промышленных предприятий достаточно отработана и применяется в проектной практике.

Исследованиями формы кривой напряжения в электрических сетях занимался Н. П. Краснушкин [35]. Он обобщил влияние каждого элемента сети на уровень гармоник, показал особенности несинусоидальных режимов, характерных для сетей промышленных предприятий.

Маркушевич М. С. и Солдаткина Л. А. [36] исследовали спектр гармоник тока и напряжения, коэффициент искажения синусоидальности формы кривой напряжения в городских электрических сетях, на тяговых подстанциях электрифицированного железнодорожного транспорта.

Глубокие исследования в области высших гармоник проведены И. В. Жежеленко [37–39]. Он показал, что вентильные преобразователи, дуговые печи, установки электродуговой сварки и синхрон-

ные генераторы являются важнейшими источниками высших гармоник и что от насыщенности ими предприятий зависят уровни гармоник напряжения в электросетях.

Как показали исследования [40, 41], в энергетических системах высокого напряжения при наличии мощных вентильно-преобразовательных установок величины высших гармоник достигают 5–12 % от соответствующих гармоник основной частоты, а в отдельных случаях – и больших величин [42].

В то время как теоретические и экспериментальные исследования высших гармоник в сетях промышленных предприятий в литературе освещены довольно широко, то вопрос о несинусоидальности напряжения в сельских электрических сетях является менее изученным. Исследования наличия источников высших гармоник и состояния формы кривой напряжения в сельских электрических сетях Республики Беларусь были проведены в 1985–1990 гг. [43–45]. Однако за прошедшее время в республике изменилась структура электроприемников и режим их работы, что привело к изменению показателей искажения формы кривой напряжения.

По нашим исследованиям, проведенным в 2006 г. [30], при загрузке установленных в жилом секторе трансформаторов менее 50 % их мощности коэффициент искажения синусоидальности кривой напряжения находился в пределах от 0,9 % до 2,1 %, при загрузке трансформаторов более 50 % коэффициент искажения синусоидальности кривой напряжения достигал 8,3 %. В ремонтных мастерских значение коэффициента K_U – 2,1–6,0 %. Имели место всплески коэффициента искажения синусоидальности кривой напряжения до 8,1–8,4 %.

1.2. Причины возникновения несимметрии и несинусоидальности напряжения

В соответствии с ГОСТ 13109–97, виновниками ухудшения качества электрической энергии могут быть как электропотребители, так и питающая энергосистема. Длительность провала напряжения, импульсное напряжение, коэффициент временного перенапряжения, отклонение частоты обуславливаются режимами работы энергосистемы [37, 46]. Отклонения напряжения зависят как от уровня

напряжения, подаваемого энергосистемой, так и от работы отдельных электроприемников [37, 46, 47]. Несимметрия и несинусоидальность напряжения обусловлены работой отдельных электроприемников на предприятиях [37–39, 48–51].

Несимметричные режимы в трехфазных системах электроснабжения могут быть обусловлены неодинаковой нагрузкой по фазам, неравенством фазных параметров линий, а так же неполнофазной работой оборудования, вызванной отключением одной или двух фаз [36, 52–55].

Причиной возникновения несимметрии напряжений являются потребители электроэнергии, симметричное многофазное исполнение которых невозможно или нецелесообразно по технико-экономическим соображениям. Это индукционные и дуговые электрические печи, тяговые нагрузки электрифицированного транспорта на переменном токе, однофазные электротермические установки и электросварочные агрегаты, осветительные установки, специальные однофазные нагрузки, бытовые однофазные электроприборы [36, 54, 56, 57].

Существенное влияние на качество напряжения оказывает несимметрия нагрузки по фазам, о чем свидетельствуют проведенные работы [58–60].

Как известно, в сельских электрических сетях напряжением 380/220 В удельный вес однофазных нагрузок значителен. В основном это осветительно-бытовые приборы и двигатели малой мощности. При проектировании и строительстве сельских низковольтных электрических сетей стремятся однофазную нагрузку распределить равномерно по фазам. Однако это не всегда удается выполнить полностью. Кроме того, в процессе эксплуатации должно производиться выравнивание нагрузок по измерениям фазных токов. Так как при этом измеряются мгновенные значения токов, то такое выравнивание является малоэффективным. К тому же производство таких работ является затруднительным [61] и не дает нужного результата [62, 63]. Но даже в тех случаях, когда удается распределить нагрузку по фазам одинаково, необходимо иметь в виду, что каждый потребитель может быть включен или отключен в зависимости от случайных обстоятельств. Поэтому нагрузка каждой из фаз во времени будет изменяться независимо от нагрузки других фаз, то есть число и мощность потребителей, включенных в от-

дельные фазы в каждый конкретный момент времени, будут не одинаковыми. Вследствие этого в сельских электрических сетях низкого напряжения существует несимметрия нагрузок, вызывающая значительную несимметрию напряжений, о чем свидетельствуют литературные источники [59, 60, 64–68, 164].

Несимметрия входных напряжений трансформатора, как и его нагрузочных токов, приводит к появлению несимметрии и неуравновешенности его выходных напряжений, обусловленных составляющими, соответственно, обратной и нулевой последовательности [69]. Особенно чувствительны к несимметрии нагрузок трансформаторы со схемой соединения обмоток «звезда–звезда–нуль», которые имеют большое сопротивление нулевой последовательности, что вызывает возникновение неуравновешенной системы их выходных напряжений [53, 69–71].

Причиной искажения синусоидальности кривой напряжения в системах электроснабжения потребителей являются токи высших гармоник. Они протекают по элементам системы и приводят к появлению высших гармоник напряжения [37, 38, 48, 50, 51, 72]. Значения последних зависят от величин токов высших гармоник и от частотных характеристик элементов сети. Высшие гармоники напряжения накладываются на синусоиду напряжения основной частоты и искажают ее форму.

Источниками токов высших гармоник являются элементы электрических сетей с нелинейными и вольтамперными характеристиками. Это – полупроводниковые преобразователи частоты, установки однофазной и трехфазной электросварки, вентильные преобразователи, электродуговые печи, электрические машины, силовые трансформаторы, ветроэнергетические установки, газоразрядные лампы, персональные ЭВМ, файл-серверы, мониторы, лазерные принтеры, копировальная техника, факсы, блоки бесперебойного питания, газоразрядные лампы, кондиционеры, телевизоры, видеоманитофоны, СВЧ-печи и другие устройства, выполненные на базе полупроводниковых элементов [36–39, 48, 50, 51, 72]. Так, вентильные преобразователи являются источниками канонических высших гармоник (5; 7; 11; 13-й), уровни которых (по отношению к 1-й гармонике) обратно пропорциональны номеру [36–39]. Преобразователи частоты являются источниками не только высших гармоник, но и так называемых интергармоник, частоты

которых находятся между частотами канонических высших гармоник [36–39]. При работе электросварочного устройства появляются высшие гармоники и интергармоники с амплитудами, достигающими 20 % основной гармоники тока [36–38]. ЭВМ и газоразрядные лампы (люминесцентные и дуговые ртутные) являются источниками высших гармоник порядка $n = 3, 5, 7$; асинхронные двигатели – гармоник порядка $n = 3, 5, 7, 11$; однофазные выпрямители – гармоник порядка $n = 3, 5, 7, 9, 11$; трехфазные выпрямители – гармоник порядка $n = 5, 7, 11$ [36–38].

1.3. Влияние несимметрии и несинусоидальности напряжения на работу потребителей

Отклонения показателей качества электроэнергии от установленных стандартом норм отрицательно сказываются на работе электрооборудования как энергоснабжающих организаций, так и потребителей электроэнергии. Они могут привести к причинению значительного ущерба в промышленности, сельскохозяйственном производстве, в быту. Рассмотрим влияние качества электроэнергии на наиболее распространенные виды потребителей, которыми являются электродвигатели, установки электрического освещения, вентиляльные преобразователи, электросварочные и электротермические установки.

1.3.1. Влияние отклонений напряжения

Асинхронные электродвигатели. Наиболее распространенными приемниками электроэнергии как в промышленности, так и в сельском хозяйстве являются асинхронные электродвигатели. Отклонение напряжения от номинального оказывает существенное влияние на их работу. Так, при изменении напряжения изменяется механическая характеристика электродвигателя (зависимость его вращающего момента M от скольжения s или частоты вращения) (рис. 1.1). В связи с тем, что вращающий момент двигателя пропорционален квадрату напряжения на его выводах, при снижении напряжения уменьшаются вращающий момент и частота вращения

ротора двигателя, так как увеличивается его скольжение. Снижение частоты вращения зависит также от закона изменения момента сопротивления M_c (на рис. 1.1 M_c принят постоянным) и от загрузки двигателя. Зависимость частоты вращения ротора двигателя от напряжения можно выразить [46] следующим образом:

$$n = n_c \left(1 - k_3 \frac{U_{\text{ном}}^2}{U^2} S_{\text{ном}} \right), \quad (1.1)$$

где n_c – синхронная частота вращения;

k_3 – коэффициент загрузки двигателя;

$U_{\text{ном}}$, $S_{\text{ном}}$ – номинальные значения напряжения и скольжения соответственно.

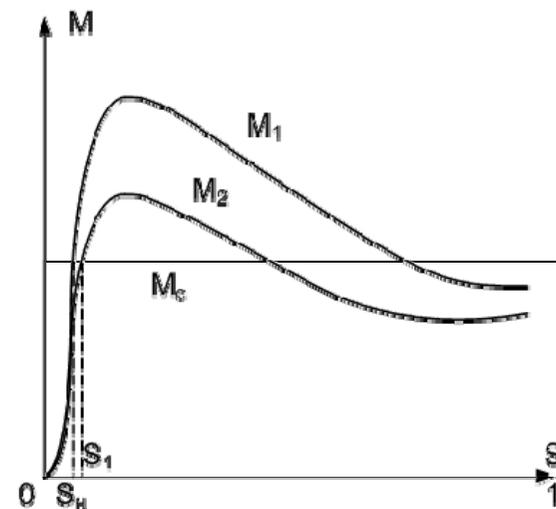


Рис. 1.1. Механическая характеристика двигателя при номинальном (M_1) и пониженном (M_2) напряжениях

Из формулы (1.1) следует, что при малых нагрузках двигателя частота вращения ротора будет больше номинальной частоты вращения (при номинальной нагрузке двигателя). В этих случаях

понижения напряжения не приводят к уменьшению производительности технологического оборудования, так как снижения частоты вращения двигателей ниже номинальной не происходит.

При работе электродвигателей с полной нагрузкой понижение напряжения приводит к уменьшению частоты вращения. Если производительность механизмов зависит от частоты вращения двигателя, то на выводах таких двигателей необходимо поддерживать напряжение не ниже номинального. При значительном снижении напряжения на выводах двигателей, работающих с полной нагрузкой, момент сопротивления механизма может превысить вращающий момент, что приведет к его остановке. В таких случаях во избежание повреждений двигатель необходимо отключить от сети.

Снижение напряжения в сети влияет на условия пуска асинхронных электродвигателей, так как пусковой момент их зависит от квадрата напряжения. При значительном снижении двигатель может не запуститься.

От значения напряжения на выводах электродвигателя зависит величина потребляемой им активной и реактивной мощности. В случае снижения напряжения на зажимах двигателя реактивная мощность намагничивания уменьшается (на 2–3 % при снижении напряжения на 1 %), при той же потребляемой мощности увеличивается ток двигателя, что вызывает перегрев изоляции.

Если двигатель работает при пониженном напряжении продолжительное время, то при этом происходит ускоренный износ изоляции, что приводит к снижению срока службы двигателя. Приблизительно срок службы изоляции T можно определить по формуле [46]

$$T = \frac{T_{\text{ном}}}{R}, \quad (1.2)$$

где $T_{\text{ном}}$ – срок службы изоляции двигателя при номинальном напряжении и номинальной нагрузке;

R – коэффициент, зависящий от значения и знака отклонения напряжения, а также от коэффициента загрузки двигателя. Определяется по формуле [73]

$$R = (47\delta U^2 - 7,55\delta U + 1)k_3^2 \quad \text{при} \quad -0,2 \leq \delta U_y < 0; \quad (1.3)$$

$$R = k_3^2 \quad \text{при} \quad 0,2 \geq \delta U_y > 0. \quad (1.4)$$

Поэтому с точки зрения нагрева двигателя более опасны в рассматриваемых пределах отрицательные отклонения напряжения. Снижение напряжения приводит также к заметному росту реактивной мощности, теряемой в реактивных сопротивлениях рассеяния линий, трансформаторов и асинхронных двигателей.

Работа электродвигателей при повышенном напряжении приводит к увеличению потребляемой ими реактивной мощности. При этом с уменьшением коэффициента загрузки двигателя удельное потребление реактивной мощности растет. В среднем на каждый процент повышения напряжения потребляемая реактивная мощность увеличивается на 3 % и более (в основном за счет увеличения тока холостого хода двигателя), что, в свою очередь, приводит к увеличению потерь активной мощности в элементах электрической сети.

Лампы накаливания. Лампы накаливания характеризуются номинальными параметрами: потребляемая мощность $P_{\text{ном}}$ (Вт), световой поток $F_{\text{ном}}$ (лм), световая отдача $H_{\text{ном}}$ (лм/Вт), срок службы $T_{\text{ном}}$ (ч). Эти показатели в значительной мере зависят от напряжения на выводах ламп накаливания. При отклонениях напряжения на 10 % эти характеристики приближенно можно описать следующими эмпирическими формулами [73]:

$$P_{\text{о.е.}} = \frac{P}{P_{\text{ном}}} = \left(\frac{U}{U_{\text{ном}}} \right)^{1,53}; \quad (1.5)$$

$$F_{\text{о.е.}} = \frac{F}{F_{\text{ном}}} = \left(\frac{U}{U_{\text{ном}}} \right)^{3,67}; \quad (1.6)$$

$$T_{\text{о.с.}} = \frac{T}{T_{\text{НОМ}}} = \left(\frac{U}{U_{\text{НОМ}}} \right)^{-14,8}; \quad (1.7)$$

$$H_{\text{о.в.}} = \frac{H}{H_{\text{НОМ}}} = \left(\frac{U}{U_{\text{НОМ}}} \right)^{2,14}. \quad (1.8)$$

На рис. 1.2 приведены зависимости номинальных параметров ламп накаливания от напряжения. Как следует из графика, при снижении напряжения значительно падает световой поток. При изменении напряжения выше номинального световой поток растет. Растет также мощность лампы и световая отдача, но резко снижается срок службы лампы. При этом имеет место перерасход электроэнергии.

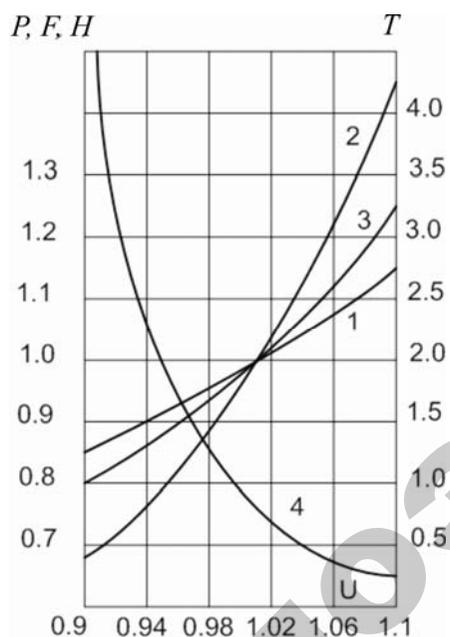


Рис. 1.2. Зависимости характеристик ламп накаливания от напряжения:
1 – потребляемая мощность; 2 – световой поток;
3 – световая отдача; 4 – срок службы

Если принять все эти величины при номинальном напряжении за 100 %, то при отклонении напряжения на ± 1 %:

- мощность лампы изменится на $\pm 1,5$ %;
- световой поток – на $\pm 3,5$ %;
- световая отдача – на $\pm 1,8$ %;
- срок службы – на ± 13 %.

Так, при напряжении 105 % номинального срок службы сокращается почти в 3 раза и составляет 350 ч вместо 1000 ч.

При напряжении 95 % номинального световой поток лампы составляет 82,5 %.

Изменения напряжения приводят к соответствующим изменениям светового потока и освещенности, что в конечном итоге оказывает влияние на производительность труда и утомляемость человека. Это видно из следующих данных [57]:

- освещенность, %: 30 60 100 200 300 600
- производительность труда, %: 85 95 100 105 107 109.

За 100 % освещенности условно принята освещенность 50 лк.

Люминесцентные лампы. Люминесцентные лампы менее чувствительны к отклонениям напряжения. При повышении напряжения потребляемая мощность и световой поток увеличиваются, а при снижении – уменьшаются, но не в такой степени, как у ламп накаливания.

При отклонении напряжения в пределах ± 1 % световой поток изменяется на ± 1 %, световая отдача – всего на $\pm 0,5$ %.

Однако при напряжении 93–94 % номинального лампы нагораются, а при напряжении 106–107 % номинального перегреваются вспомогательная аппаратура.

При пониженном напряжении условия зажигания люминесцентных ламп ухудшаются, поэтому срок их службы, определяемый распылением оксидного покрытия электродов, сокращается как при отрицательных, так и при положительных отклонениях напряжения.

При отклонениях напряжения на 10 % срок службы люминесцентных ламп в среднем снижается на 20–25 %. Существенным недостатком люминесцентных ламп является потребление ими реактивной мощности, которая растет с увеличением питающего их напряжения [74].

Ультрафиолетовые лампы (эритемные и бактерицидные). Лампы не зажигаются при понижении напряжения на 10 % номинального и больше.

При повышении напряжения эритемный и бактерицидный потоки растут, при уменьшении – убывают.

В пределах изменения напряжения $\pm 10\%$ его номинального значения световой поток изменяется примерно на 2% на каждый процент изменения напряжения.

Срок службы ламп при номинальном напряжении составляет 800–1000 ч. При повышении напряжения срок службы резко сокращается.

Бытовая техника. Отклонения напряжения отрицательно влияют на качество работы и срок службы бытовой электронной техники (радиоприемники, телевизоры, аппараты телефонно-телеграфной связи, компьютерная техника).

Снижение напряжения ухудшает изображение, повышение напряжения сокращает срок службы деталей телевизоров.

Если при повышении напряжения цепей накала электронных ламп температура катода увеличивается на 3% , то это приводит к снижению примерно в 2 раза срока службы эмитирующей поверхности [36].

Нагревательные бытовые приборы (плитки, утюги) мало реагируют на изменение напряжения. Однако необходимо учитывать, что их мощность меняется прямо пропорционально квадрату изменения напряжения. Например, при напряжении 90% номинального электрический утюг мощностью 400 Вт развивает мощность 324 Вт.

Вентильные преобразователи. Вентильные преобразователи автоматически путем фазового управления регулируют постоянный ток. При повышении напряжения в сети угол регулирования автоматически увеличивается. При понижении напряжения – уменьшается. Повышение напряжения на 1% приводит к увеличению потребления реактивной мощности преобразователем примерно на $1,0\text{--}1,4\%$, что снижает коэффициент мощности. В то же время другие показатели вентильных преобразователей с повышением напряжения улучшаются, и поэтому выгодно повышать напряжение на их выводах в пределах допустимых значений [75].

Электрические печи. Электрические печи чувствительны к отклонениям напряжения. Так, при понижении напряжения электродуговых печей на 7% происходит удлинение процесса плавки стали в 1,5 раза. Повышение напряжения на 5% и выше приводит к перерасходу электроэнергии.

Отклонения напряжения отрицательно влияют на работу электросварочных машин. Например, машины точечной сварки при изменении напряжения на 15% производят полностью бракованную продукцию [76].

1.3.2. Влияние несимметрии напряжений

Несимметрия нагрузок вызывает несимметрию напряжений. Одни однофазные электроприемники могут оказаться под повышенным напряжением, другие – под пониженным. На выводах трехфазных электроприемников появляется несимметричная система напряжений. Отклонения напряжения у электроприемников перегруженной фазы могут превысить нормально допустимые значения, в то время как отклонения напряжения у электроприемников других фаз будут находиться в нормируемых пределах. При несимметричном режиме работы сети существенно ухудшаются условия работы как самих электроприемников, так и всех элементов сети, снижается надежность работы электрооборудования и системы электроснабжения в целом.

Несимметрия напряжений отрицательно влияет на работу всех элементов электрической системы, вызывая дополнительные потери активной мощности, снижая срок службы электрооборудования и экономические показатели его работы [54, 55, 77–79].

Рассмотрим влияние несимметрии напряжений на работу наиболее распространенных потребителей.

Асинхронные электродвигатели. При несимметричном режиме особое влияние на работу асинхронных электродвигателей оказывает напряжение обратной последовательности. Сопротивление обратной последовательности электродвигателей примерно равно сопротивлению заторможенного двигателя и, следовательно, в 5–8 раз меньше сопротивления прямой последовательности. Поэтому даже небольшая несимметрия напряжений вызывает значительные токи обратной последовательности. Токи обратной последовательности накладываются на токи прямой последовательности, создают противодействующий вращающий момент и вызывают дополнительный нагрев статора и ротора (особенно массивных частей ротора), а это приводит к ускоренному старению изоляции электродви-

гателя, снижению его номинальной мощности [77, 80–86]. Срок службы полностью загруженного асинхронного электродвигателя, работающего при несимметрии напряжений 4 %, сокращается в 2 раза. При несимметрии напряжений 5 % его мощность уменьшается на 5–10 % [46].

Синхронные машины. При несимметрии напряжений сети с появлением токов обратной последовательности в синхронных машинах возникают дополнительные потери активной мощности, происходит нагрев статора и ротора, могут возникнуть также опасные вибрации в результате появления знакопеременных вращающих моментов и тангенциальных сил, пульсирующих с двойной частотой сети. При значительной несимметрии вибрация может оказаться опасной, особенно при недостаточной прочности и наличии дефектов сварных соединений. При несимметрии токов, не превышающей 30 %, опасные перенапряжения в элементах конструкций, как правило, не возникают [46].

В соответствии с Правилами технической эксплуатации (ПТЭ) электрических сетей и станций длительная работа генераторов и синхронных компенсаторов при неравных токах фаз допускается, если разница токов не превышает 10 % номинального тока статора для турбогенераторов и 20 % – для гидрогенераторов. При этом токи в фазах не должны превышать номинальных значений. Если эти условия не выполняются, то необходимо принимать специальные меры по уменьшению несимметрии.

Электрические сети. При наличии в сети несимметрии напряжений по проводам линий электропередачи будут протекать токи обратной и нулевой последовательности. Это приводит к увеличению суммарных токов в отдельных фазах сети, и в итоге – к увеличению потерь активной мощности, что может быть недопустимым в отношении нагрева. Токи нулевой последовательности протекают постоянно через заземлители. При этом дополнительно высушивается и увеличивается сопротивление заземляющих устройств. Это отрицательно влияет на работу релейной защиты, низкочастотных установок связи и устройств железнодорожной блокировки.

Одним из элементов сети являются трансформаторы. При подаче на трансформатор несимметричного напряжения под действием составляющих обратной и нулевой последовательности происходит несимметрия выходного напряжения [69]. Несимметрия напряже-

ний вызывает значительное сокращение срока службы трансформаторов вследствие перегрева его изоляции. В случае выбора предельной загрузки трансформатора из условия равенства тока номинальному наиболее загруженной фазы его пропускная способность в несимметричном режиме работы уменьшается на 42 % мощности однофазной эквивалентной нагрузки [47].

Конденсаторные установки. Конденсаторные установки при несимметрии напряжений неравномерно загружаются реактивной мощностью по фазам. Это делает невозможным полное использование их установленной мощности. Кроме того, конденсаторные установки в этом случае усиливают уже существующую несимметрию, так как выдача реактивной мощности в сеть в фазе с наименьшим напряжением будет меньше, чем в остальных фазах [38, 47, 72, 75, 87, 88].

Однофазные электроприемники. Несимметрия напряжений значительно влияет и на однофазные потребители. Например, лампы накаливания, подключенные к фазе с более высоким напряжением, имеют больший световой поток, но значительно меньший срок службы по сравнению с лампами, подключенными к фазе с меньшим напряжением. Несимметрия напряжений усложняет работу релейной защиты, ведет к ошибкам при работе счетчиков электроэнергии и т. д.

Несимметрия напряжений ухудшает работу преобразовательных устройств. Так, если при симметричном напряжении токи во всех вентилях выпрямителя одинаковы по значению и времени протекания, то при несимметричном режиме отдельные его вентили оказываются недогруженными, что приводит к снижению располагаемой мощности выпрямителя. Кроме того, в этом случае в кривых переменного и выпрямленного напряжения появляются неканонические гармоники и связанные с ними нежелательные резонансные режимы [36, 37, 89]. Возможно также появление субгармоник [36, 38]. В условиях несимметрии напряжений в значительной степени теряет свою эффективность многофазное выпрямление с целью уменьшения пульсаций выпрямленного тока, поскольку амплитуда гармоник двойной частоты оказывается пропорциональной значению напряжения обратной последовательности.

Несимметричные режимы приводят к появлению дополнительных отклонений напряжения на зажимах однофазных потребителей, в ча-

стности осветительных и телевизионных приемников, которые очень чувствительны к изменению режима напряжений [47, 86].

Несимметричные режимы отрицательно влияют на работу инверторов, уменьшают устойчивость систем и межсистемных связей, приводят к ошибкам при подсчете электроэнергии [38]. Так, в случае амплитудно-фазовой несимметрии напряжений и токов погрешность измерений у индукционных счетчиков может достигать 33 % [47].

На кафедре электроснабжения (БГАТУ) выполнен ряд работ по исследованию и снижению несимметрии напряжений в системах электроснабжения сельскохозяйственных потребителей [70, 71, 88, 89]. Но поскольку за истекшее время произошли изменения в структуре нагрузок и режимах работы сельскохозяйственных потребителей, вопросы симметрирования напряжения в сельских сетях являются актуальными.

1.3.3. Влияние несинусоидальности напряжения

Потребители с нелинейными вольтамперными характеристиками, подключенные к сети с синусоидальным напряжением, потребляют несинусоидальные токи. Эти токи, проходя по элементам сети, создают падения напряжения в сопротивлениях этих элементов и, накладываясь на основную синусоиду напряжения, приводят к искажениям формы кривой напряжения. В связи с этим потребители с нелинейной вольтамперной характеристикой называют источниками высших гармоник.

Наиболее серьезные нарушения качества электроэнергии в электрической сети имеют место при работе мощных управляемых вентиляционных преобразователей, электродуговых сталеплавильных и рудотермических печей, установок дуговой и контактной сварки газоразрядных ламп, трансформаторов.

Вентильные преобразователи в зависимости от схемы выпрямления генерируют в сеть гармоники тока: при 6-фазной схеме – до 19-го порядка; при 12-фазной схеме – до 25-го порядка включительно [36, 37].

Коэффициент искажения синусоидальности кривой напряжения в сетях с электродуговыми сталеплавильными и рудотермическими печами определяется в основном 2, 3, 4, 5, 7-й гармониками.

Коэффициент искажения синусоидальности кривой напряжения установок дуговой и контактной сварки определяется в основном 5, 7, 11, 13-й гармониками.

Токи 3-й гармоники газоразрядных ламп составляет 10 % тока 1-й гармоники, 5-й гармоники – 3 %. Эти токи совпадают по фазе в соответствующих линейных проводах сети и, складываясь в нулевом проводе сети 380/220 В, обуславливают ток в нем, почти равный току в фазном проводе. Остальными гармониками для газоразрядных ламп можно пренебречь [36, 37].

Высшие гармоники тока и напряжения вызывают дополнительные потери активной мощности во всех элементах системы электроснабжения: в линиях электропередачи, трансформаторах, электрических машинах, статических конденсаторах, так как сопротивление этих элементов зависят от частоты.

Гармоники тока в линиях электропередач приводят к дополнительным потерям электроэнергии и напряжения, ухудшают характеристики изоляции кабелей [37, 38]. Дополнительные потери в кабелях вызываются увеличением действующего значения негармонического тока, увеличением активного сопротивления проводника из-за поверхностного эффекта, увеличением потерь в диэлектрике изоляции кабеля. Они приводят к повышению температуры проводников и ускоренному старению изоляции. Явление нагрева поверхностного слоя проводника ничтожно при частоте 50 Гц, но уже становится значимым при частоте 350 Гц (7-я гармоника) и выше [36, 37]. Увеличивающееся по мере роста частоты активное и емкостное сопротивление приводит к падению и еще большему искажению напряжения. Токи утечки силового кабеля, работающего при уровне гармоник в кривой напряжения 6,0–8,5 %, оказались через 2,5 года эксплуатации на 36 % больше, а через 3,5 года – на 43 % больше по сравнению с кабелем, работавшим при синусоидальном напряжении [36]. При значительных составляющих высших гармоник в кабельных сетях чаще возникают однофазные короткие замыкания. При этом снижается эффективность работы дугогасящих аппаратов. Даже при резонансной их настройке однофазные короткие замыкания часто переходят в двухфазные и трехфазные (вследствие прожигания кабеля), потому что через место повреждения протекают большие токи высших гармоник и повреждение не самоликвидируется. Высшие гармоники приводят к повышению аварийности в ка-

бельных сетях, увеличению числа необходимых ремонтов и увеличению затрат на эксплуатацию. Исследования показали, что при уровне гармоник 5–10 % амортизационные отчисления и стоимость текущих ремонтов кабельных линий возрастают на 15–20 %, а при уровне гармоник 10–25 % – на 30 % и более [37].

Высшие гармоники вызывают в трансформаторах дополнительные потери на гистерезис и вихревые токи в магнитопроводе, а также дополнительные потери в обмотках, обусловленные увеличением активного сопротивления обмотки с ростом частоты тока [36, 37, 51]. Кроме того, высокочастотные гармоники являются причиной появления вихревых токов в обмотках трансформатора, что также вызывает дополнительные потери мощности. Дополнительные потери вызывают дополнительный нагрев и уменьшение срока службы трансформатора. При нагрузках, близких в максимальным, дополнительные потери могут привести к выходу трансформатора из строя в результате перегрева и прогара изоляции обмоток [36, 37, 47]. В трансформаторах, дросселях и других электромагнитных элементах высшие гармоники тока, создавая электродинамические усилия, вызывают дополнительные акустические шумы [36, 38, 47].

Исследования кривой тока намагничивания трансформаторов, включенных в сеть синусоидального напряжения, показали, что при трехсердцевом сердечнике и соединениях обмоток «звезда–звезда–ноль» и «треугольник–звезда–ноль» в электрической сети имеются все нечетные гармоники, в том числе гармоники, кратные трем. Гармоники, кратные трем, обусловлены несимметрией намагничивающих токов по фазам.

Токи намагничивания образуют системы токов прямой и обратной последовательности, которые по абсолютной величине одинаковы для гармоник, кратных трем. Для других нечетных гармоник токи обратной последовательности составляют около 0,25 токов прямой последовательности. Если на вводы трансформаторов подается несинусоидальное напряжение, возникают дополнительные составляющие высших гармоник тока.

В целом несинусоидальные режимы обладают теми же недостатками, что и несимметричные.

Если конденсаторы, устанавливаемые в целях компенсации реактивной мощности, работают при напряжении с повышенной час-

тотой, их сопротивление уменьшается. Поэтому, при наличии в напряжении питающей сети высших гармоник, сопротивление конденсаторов на этих гармониках оказывается значительно ниже, чем на частоте 50 Гц, из-за чего в конденсаторах, предназначенных для компенсации реактивной мощности, даже небольшие напряжения высших гармоник могут вызвать значительные токи гармоник. На предприятиях с большим удельным весом нелинейных нагрузок батареи конденсаторов работают неудовлетворительно: они отключаются защитой от перегрузки по току или за короткий срок выйдут из строя из-за вспучивания банок (или ускоренного старения изоляции) [37].

Высшие гармоники вызывают в синхронных и асинхронных двигателях паразитные поля и электромагнитные моменты, ухудшающие их механические характеристики и КПД.

В результате необратимых физико-химических процессов, протекающих под воздействием полей высших гармоник, а также повышенного нагрева токоведущих частей наблюдается ускоренное старение изоляции электрических машин, трансформаторов, кабелей; происходит ухудшение коэффициента мощности электроприемников; нарушается работа устройств автоматики, телемеханики, компьютерной техники и других устройств с элементами электроники; возникают погрешности измерений индукционных счетчиков электроэнергии, нарушается работа самих вентильных преобразователей [46].

Наличие высших гармоник неблагоприятно сказывается на работе не только электрооборудования потребителей, но и электронных устройств в самих энергосистемах.

Необходимо отметить, что в условиях работы потребителей электроэнергии несинусоидальность напряжения проявляется совместно с действиями других влияющих факторов, и поэтому следует рассматривать всю совокупность факторов.

Наличие высших гармоник в напряжении питания асинхронных электродвигателей является причиной возникновения высших гармоник тока и составляющих высших гармоник в магнитном потоке, которые будут наводить гармоники ЭДС и, как следствие этого, в обмотках ротора появятся высшие гармоники тока [37, 38]. Эти гармоники будут взаимодействовать с основным магнитным потоком, создавая дополнительные механические моменты на валу электриче-

ской машины (например, 5-я гармоника создает магнитное поле, вращающееся противоположно магнитному полю 1-й гармоники, а 7-я – не синхронно вращающееся) [36, 37]. В результате создаются гармонические пульсации вращающего момента на валу двигателя, которые вызывают повышенные нагрузки и износ подшипников. В экстремальных случаях может возникнуть вибрация на резонансной частоте вращающейся массы ротора, приводящая к накоплению усталости металла и возможному разрыву вала ротора электродвигателя [37–39]. Высшие гармоники вызывают перегрев асинхронных электродвигателей, обусловленный дополнительными потерями вследствие эффекта увеличения активного сопротивления обмоток с ростом частоты тока и повышением потерь на гистерезис и вихревые токи в магнитопроводе [37–39, 47]. Кроме того, из-за значительной разницы в скоростях вращающихся магнитных полей, создаваемых высшими гармониками, и скоростью вращения ротора возникают дополнительные потери в демпферных обмотках ротора [37–39]. Все эти дополнительные потери приводят к повышению общей температуры машины и к местным перегревам, наиболее вероятным в роторе [36–39, 47]. Это вызывает снижение срока службы изоляции машин. Высшие гармоники тока и напряжения ухудшают условия коммутации машин постоянного тока, нарушают равномерность вращения ротора синхронного двигателя.

Высшие гармоники напряжения и тока затрудняют компенсацию реактивной мощности с помощью батарей конденсаторов, так как могут наблюдаться резонансные явления на частотах высших гармоник, что приводит к выходу из строя конденсаторов [36–38, 72]. Наличие высших гармоник снижает срок службы конденсаторов. Это связано с дополнительным нагревом изоляции при протекании токов высших гармоник и ускорением под воздействием повышенной частоты физико-химических процессов в диэлектриках, обуславливающих ее старение [36–38]. Из всех видов электрооборудования конденсаторы являются наиболее чувствительными к воздействию высших гармоник.

Высшие гармоники неблагоприятно влияют на работу устройств контроля, автоматики, телемеханики, связи. При несинусоидальных режимах учет электроэнергии сопряжен со значительными погрешностями, которые зависят от измерительной системы счетчика, его частотной характеристики, места установки. Индукционные счетчи-

ки имеют отрицательные частотные погрешности, что вызывает недоучет расхода электроэнергии [39]. Электронные и цифровые счетчики имеют положительную частотную погрешность, поэтому в сетях с нелинейными нагрузками имеет место переучет электроэнергии [39]. Наблюдаются сбои в работе и выход из строя компьютерного оборудования. Когда телекоммуникационные или управляющие сети проходят вблизи силовых сетей, по которым протекают токи высших гармоник, в них могут наводиться помехи и искажения информационного сигнала [47].

Высшие гармоники вызывают ложное срабатывание предохранителей и автоматических выключателей из-за их внутреннего дополнительного нагрева за счет явлений поверхностного эффекта и эффекта близости [72].

Высшие гармоники напряжения и тока могут вызывать искажения изображения и изменение яркости телевизоров [90]. В светильниках с газоразрядными лампами, укомплектованными балластными устройствами, содержащими конденсаторы, при определенных условиях может возникнуть резонанс, приводящий к выходу ламп из строя [47].

1.4. Способы симметрирования напряжения в низковольтных электрических сетях

Несимметрия напряжений обусловлена смещением нулевой точки в треугольнике линейных напряжений. Отсюда следует, что снизить несимметрию напряжений можно уменьшением сопротивления сети токам обратной и нулевой последовательности или снижением величины этих токов [52–55]. Снизить несимметрию напряжений в распределительных сетях можно рациональным распределением однофазных нагрузок между фазами, чтобы сопротивления этих нагрузок в фазах были равны между собой [52–55]. Для этой цели разработан ряд симметрирующих устройств, автоматически перераспределяющих нагрузки по фазам [55–58], но практического применения в условиях сельских электрических сетей они не нашли по причине их сложности, малой мощности однофазных сельскохозяйственных электроприемников, а также из-за снижения надежности электроснабжения однофазных потребителей при применении этих устройств [63].

Если несимметрия напряжений не может быть снижена этим путем, требуется применение специальных технических средств [52–55, 91–95].

Повысить качество напряжения можно путем увеличения сечения нулевого провода до уровня фазных проводов или снижения длины линии. Увеличением сечения нулевого провода достигается уменьшение сопротивления нулевой последовательности, что улучшает качество напряжения. Однако этот способ не всегда применяется по причине затратности. Увеличение сечения нулевого провода или снижение длины линий не всегда экономически оправдано, потому что при неравномерной нагрузке фаз искажение системы напряжений происходит уже в начале линии.

В Харьковском национальном техническом университете сельского хозяйства для улучшения симметрии напряжений был предложен специальный аппарат – трансреактор. Он представляет собой трансформатор, первичная обмотка которого включается в цепь нулевого провода, а во вторичную обмотку включается емкость, осуществляющая продольную компенсацию реактивной составляющей индуктивного сопротивления нулевой последовательности (рис. 1.3) [96].

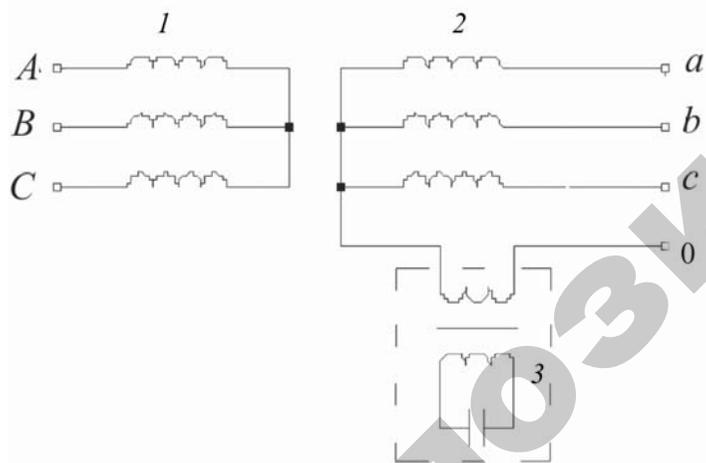


Рис. 1.3. Симметрирование напряжения с помощью трансреактора:
1 – обмотка высшего напряжения трансформатора; 2 – обмотка низшего напряжения трансформатора; 3 – трансреактор

Трансреактор широкого распространения не получил. Он способен снизить смещения нейтрали только до 50 %. К тому же стоимость его соизмерима со стоимостью потребительских трансформаторов.

В 1937 г. инженером А. А. Куликовским был предложен специальный аппарат для уменьшения длины нулевого провода, получивший название нейтралер. Он представляет собой трехфазный автотрансформатор с коэффициентом трансформации, равным единице. Обмотки выполнены по типу вторичной обмотки трансформатора «звезда–зигзаг». На каждом стержне помещаются половины обмоток двух разных фаз [97]. Исследования показали, что данный аппарат способен симметрировать напряжение. Он позволяет уменьшить длину нулевого провода, но в сельских сетях, где нагрузка рассредоточена по всей длине линий, применения не получил.

Симметрирующие устройства на основе электромагнитных аппаратов имеют высокую стоимость и значительные потери холостого хода [52, 53, 55, 93].

Исследования ряда авторов показывают, что симметрирующей способностью обладают асинхронные двигатели. Однако эффект от такого симметрирования в сельских электрических сетях при большом удельном весе однофазных нагрузок незначителен.

Одним из способов уменьшения несимметрии напряжений является кольцевание сетей. При этом наиболее загруженная фаза разгружается, а слабо загруженная – загружается, то есть происходит взаимное выравнивание нагрузки фаз, и несимметрия напряжений снижается. Однако кольцевание сетей не обеспечивает при повышении надежности электроснабжения необходимого качества напряжения. Несимметрия напряжений снижается только на 33 % [36].

Уменьшить несимметрию напряжений можно путем несимметричного включения конденсаторных батарей [52–55, 93, 95–97]. При этом увеличивается коэффициент мощности, и снижаются потери электрической энергии в линиях за счет компенсации реактивных токов. Но в сельских электрических сетях этот способ симметрирования напряжений широкого применения не получил, так как обеспечивает только ступенчатое регулирование напряжений.

Уменьшать несимметрию напряжений могут асинхронные и синхронные двигатели, устройства с вращающимися магнитными

полями [53, 54]. Однако эффект от такого симметрирования в сетях сельскохозяйственного назначения незначителен.

В Германии (как и в большинстве стран Евросоюза) для снижения несимметрии напряжений все потребители имеют трехфазные вводы, а распределительные сети не имеют двухфазных и однофазных ответвлений [98]. Причем отсутствие однофазных вводов полностью не гарантирует симметрию напряжений в сети. Поэтому на потребительских подстанциях там используют понижающие силовые трансформаторы со схемой соединения обмоток «звезда-зигзаг–нуль» (Y/Z_n) [98], способные поддерживать симметрию напряжений при несимметрии нагрузки путем компенсации магнитных потоков нулевой последовательности в своем магнитопроводе.

1.5. Способы минимизации высших гармоник

С целью снижения уровня высших гармоник необходимо знать условия эксплуатации и технические характеристики распределительной системы, а также гармонический состав токов и напряжений электрических нагрузок, их потребляемую мощность и место подключения в системе электроснабжения.

Снизить уровни высших гармоник можно либо путем реконструкции электрической сети либо применением специальных корректирующих устройств.

При реконструкции электрической сети можно выделить нелинейные нагрузки и присоединить их к отдельной секции шин, подключенной к одной из обмоток многообмоточного трансформатора или реактора [36], можно рассредоточить нелинейные нагрузки по узлам системы с подключением параллельно к ним электродвигателей [36]. Уровни высших гармоник снижают также путем применения последовательного и параллельного включения многофазных вентильных установок с различными схемами соединения обмоток выпрямительных трансформаторов. Этим достигается увеличение числа пульсаций выпрямленного напряжения [36]. В сложных преобразовательных устройствах используют специальные законы управления, которые обеспечивают подавление одной или нескольких гармоник сетевого тока на частотах, на которых возможны резонансные явления [36, 47].

Если вышеперечисленные мероприятия не обеспечивают требуемого эффекта, тогда применяются специальные корректирующие устройства [47, 101–106, 165–187]: линейные дроссели, пассивные и активные фильтры высших гармоник, разделительные трансформаторы и специальные магнитные синтезаторы.

Последовательное включение в сеть линейных дросселей, имеющих малое значение индуктивного сопротивления на основной частоте и значительные величины сопротивлений для высших гармоник, приводит к их снижению [177].

Последовательное включение в сеть линейных дросселей в ряде случаев не обеспечивает желаемого эффекта. Тогда целесообразно использовать пассивные резонансные LC-фильтры, настроенные на определенную гармонику. Такие фильтры широко применяются в системах с источниками бесперебойного питания (UPS). Так, подключение фильтра на входе шестиполупериодного выпрямителя при номинальной нагрузке UPS обеспечивает снижение коэффициента искажения синусоидальности тока до величины 8–10 % [186]. Фильтры состоят из индуктивности и емкости, настроенных на определенную гармонику. К недостаткам силовых резонансных фильтров относится сложность выбора номинальных параметров фильтровой конденсаторной батареи и реактора, которые должны обеспечивать нормы допустимой нагрузки этих элементов в условиях, когда через них протекают не только токи основной частоты, но и токи высших гармоник [36, 47]. Снижение уровней гармоник при помощи резонансных фильтров требует больших затрат, так как для обеспечения эффективности этого мероприятия необходима установка фильтров высших гармоник, начиная с самой меньшей канонической гармоники. Неправильное включение фильтров высших гармоник приводит к резонансным явлениям, что влечет за собой аварии в системах электроснабжения. Выход из строя фильтра низшего порядка приводит к аварии на резонансных фильтрах более высокого порядка [36, 47].

В силовых полупроводниковых системах для снижения уровня высших гармоник используют активные фильтры. Они построены на модулях IGBT (биполярный транзистор с изолированным затвором) [101, 102, 106, 165–170, 172, 179–186]. Это многофункциональные устройства, позволяющие компенсировать реактивную мощность электросетей, восстановить симметрию напряжений и токов трехфаз-

ной системы. Активные фильтры гармоник подключаются параллельно нагрузке. Принцип их действия основан на анализе гармоник тока нелинейной нагрузки и генерировании в распределительную сеть таких же гармоник тока, но с противоположной фазой. При этом высшие гармонические составляющие тока нейтрализуются в точке подключения фильтра, не распространяются в сеть и не искажают напряжения первичного источника энергии, который обеспечивает только основную гармонику тока нагрузки. В отличие от резонансных фильтров, активные фильтры подавляют все не основные составляющие токов сетей в определенном диапазоне частот, в том числе неканонические и низкочастотные составляющие.

Для систем с мощными нелинейными электроприемниками силовые активные фильтры могут быть выполнены многотактными, многоуровневыми, каскадными [101, 102, 106, 165, 166, 170, 172, 179–184, 186]. Многотактный активный фильтр содержит многообмоточный трансформатор, несколько транзисторных мостовых выпрямительных мостов, включенных параллельно и работающих совместно с общей конденсаторной батареей, блок управления транзисторами и трехфазную RC-цепь, подключенную к электросети. Он обеспечивает фильтрацию высших гармонических составляющих токов в диапазоне частот до 2000 Гц и выше [184]. Многоуровневый фильтр состоит из транзисторного моста, подключенного к электросети через фазные дроссели, блока управления и RC-цепи. За счет многоуровневого исполнения транзисторного преобразователя в нем меньше динамические потери энергии в полупроводниковых элементах, но на частотах широтно-импульсной модуляции и выше активный фильтр является генератором гармоник. Каскадный фильтр содержит полупроводниковый преобразователь, в каждой фазе которого несколько низковольтных однофазных преобразователей соединены последовательно, образуя высоковольтный преобразователь, который может быть подключен непосредственно к электросети. Недостатком всех типов активных фильтров является то, что на частотах широтно-импульсной модуляции и выше активный фильтр является генератором гармонических составляющих и для их подавления требуется использование RC-цепи [184].

Для повышения качества напряжения применяются также специальные устройства, синтезирующие свое выходное напряжение, так называемые «магнитные синтезаторы». Они подключаются по-

следовательно с нелинейной нагрузкой и обеспечивают защиту от провалов и выбросов напряжения, импульсных и высокочастотных помех, наличия высших гармоник, вызывающих искажения синусоидальности формы напряжения [171, 175, 187]. Магнитный синтезатор включает в себя блок линейных дросселей, блок гальванической развязки, блок импульсных трансформаторов, блок конденсаторов, фильтры 2-й и 3-й гармоник, трансформатор со специальной схемой соединения обмоток. Выходное напряжение магнитного синтезатора на каждом полупериоде основной частоты генерируется путем объединения шести прямоугольных импульсов от связанных между собой трансформаторов с насыщением. Это напряжение поступает на нагрузку через фильтры, настроенные на 2-ю и 3-ю гармоники, и специальный трансформатор, что обеспечивает коэффициент искажения синусоидальности выходного напряжения не выше 4 % независимо от степени искажения напряжения на входе магнитного синтезатора [171, 175, 187]. Коэффициент искажения тока на входе магнитного синтезатора не превышает 8 %, независимо от искажения тока нагрузки [171, 175, 187]. Однако это устройство достаточно сложное и дорогостоящее.

В распределительных сетях некоторых экономически развитых стран мира для уменьшения высших гармоник применяются так называемые «активные кондиционеры гармоник» (АКГ). Они представляют собой разновидность активных фильтров [167–169, 175, 185]. АКГ может быть установлен в любой точке распределительной сети с целью компенсации высших гармоник от одной или нескольких нелинейных нагрузок. Недостатком активного кондиционера гармоник является то, что он компенсирует гармоники не выше 25-й [167–169, 175, 185].

При выборе способов и средств снижения несимметрии и несинусоидальности напряжений в электроустановках сельскохозяйственного назначения необходимо учитывать специфические особенности электроснабжения сельского хозяйства. Энерговооруженность труда в сельскохозяйственном производстве значительно ниже, чем в промышленности. Структура организации сельскохозяйственного производства, необходимость обработки больших площадей и невысокая плотность населения определяют сравнительно малую плотность электрических нагрузок. Для электроснабжения сельскохозяйственных потребителей приходится передавать относительно

небольшие мощности на большие расстояния. В результате распределительные сети имеют значительную протяженность, что неблагоприятно влияет на показатели качества и надежности электроснабжения. Электропотребление носит ярко выраженный сезонный характер. Значительная часть электрооборудования в сельском хозяйстве эксплуатируется в условиях агрессивной внешней среды. Часто электротехнические службы сельскохозяйственных организаций не укомплектованы достаточным количеством квалифицированного персонала, что отрицательно влияет на качество эксплуатации электрооборудования и срок его службы. В таких условиях для повышения качества напряжения наиболее целесообразным является применение относительно недорогих, простых и надежных по конструктивному исполнению устройств, не требующих особых условий эксплуатации и не предъявляющих слишком высоких требований к квалификации обслуживающего персонала. В связи с этим рассмотренные мероприятия улучшения качества напряжения не нашли широкого применения в сельском хозяйстве.

1.6. Влияние схем соединения обмоток трансформаторов на качество напряжения

В соответствии с ГОСТ 12022–66 [107] для сельских электрических сетей рекомендованы трансформаторы со схемами соединения обмоток «звезда–звезда–нуль» и «звезда–зигзаг–нуль». Эти схемы достаточно хорошо изучены и изложены в специальной литературе [69, 110–115].

В настоящее время на сельских трансформаторных пунктах (ТП) в основном установлены и продолжают устанавливаться трансформаторы со схемой соединения обмоток «звезда–звезда–нуль». Это объясняется известными их достоинствами: простота и дешевизна изготовления, передача электрической энергии повышенным напряжением при фазном напряжении 220 В. Однако эта схема имеет ряд существенных недостатков. Она чрезвычайно чувствительна к несимметрии нагрузки фаз. Поэтому в сельских электрических сетях нередки случаи отклонения напряжения у потребителей свыше допустимых пределов. Причем с ростом тока в нулевом проводе искажение фазных напряжений происходит непосредственно на выводах трансформатора. Такое явление

объясняется большой величиной сопротивления нулевой последовательности и наличием токов нулевой последовательности, которые появляются во вторичной обмотке трансформатора при нагрузке не равными по величине сопротивлениями.

При соединении обмоток «звезда–звезда–нуль» система токов нулевой последовательности не может трансформироваться в первичной обмотке, так как она не имеет выведенной нейтральной точки и, следовательно, эта система токов будет целиком намагничивающей. Она создает в каждом стержне неуравновешенный магнитный поток. Это обуславливает значительное увеличение сопротивления нулевой последовательности.

Исследованиями [58] установлено, что у трансформаторов «звезда–звезда–нуль» сопротивление нулевой последовательности больше сопротивления короткого замыкания в 5–10 раз, а в отдельных случаях – в 15 раз. Падение напряжения на сопротивлении нулевой последовательности вызывает смещение нулевой точки в треугольнике линейных напряжений, что приводит, в свою очередь, к искажению фазных напряжений. Потеря напряжения в этих трансформаторах при несимметричной нагрузке может достигать до 15–20 % вместо 4 % при симметричном режиме. В конце же линии несимметрия напряжений бывает приблизительно в 2 раза больше [116], чем в начале.

Расчеты показали [58], что для компенсации неизбежно высоких потерь напряжения в трансформаторах необходимо идти на крупные дополнительные затраты проводникового материала в линиях. Так, например, у трансформатора мощностью 50 кВ·А при потере напряжения в одной из фаз 10 % (вместо 4 % при симметричном режиме) расход металла в линии следовало бы повысить с 16 до 22 кг/кВт. Иными словами, расход алюминия для конкретной сети, питающейся от указанного трансформатора, пришлось бы повысить на 600 кг.

Поскольку наличие составляющих нулевой последовательности не сказывается на линейном напряжении, несимметрии нагрузок сети низкого напряжения в меньшей степени влияет на линейные напряжения.

Наличие составляющих обратной последовательности на режим напряжения сети низшего напряжения влияет слабо, что объясняется малой величиной сопротивления обратной последовательности. Оно находится в пределах равным сопротивлению короткого замыкания, что подтверждается экспериментальными данными.

Наличие неуравновешенных потоков нулевой последовательности, которые замыкаются через конструктивные детали (консоли, шпильки и прочее), а также бак трансформатора вызывают в них дополнительные потери. При величине тока в нулевом проводе приблизительно до 15 % номинального они незначительны, но дальнейший рост его вызывает резкое повышение потерь [113, 117]. Это приводит к дополнительному разогреву бака трансформатора, что ухудшает теплоотдачу трансформаторного масла и способствует росту температуры обмоток. Однако это явление мало сказывается на сроке службы трансформатора, так как общая нагрузка трансформатора в этот период ниже номинальной.

Серьезным недостатком трансформатора со схемой соединения обмоток «звезда–звезда–нуль» является усложнение защиты сети низкого напряжения при однофазных коротких замыканиях. Причина такого положения объясняется высоким сопротивлением нулевой последовательности. Высокое сопротивление нулевой последовательности вызывает резкое уменьшение однофазного тока короткого замыкания, что подтверждается и расчетом, и практикой. Так, например, по данным [116], величина однофазного тока короткого замыкания на выводах вторичной обмотки составляет 3,6–5,3 номинального тока трансформатора.

В сельских электрических сетях ток однофазного короткого замыкания нередко бывает соизмерим с номинальным током. А так как при выборе плавких вставок для защиты трансформатора необходимо выполнить условие селективности, то номинальный ток плавких вставок оказывается больше однофазного тока короткого замыкания. Поэтому становится понятным, почему на практике часты случаи, когда трансформатор выбирается не по условиям его загрузки, а исходя из минимального значения однофазного тока короткого замыкания, то есть на две-три ступени выше требуемой мощности.

Таким образом, трансформаторы со схемой соединения обмоток «звезда–звезда–нуль» в сельских электрических сетях целесообразно использовать в тех случаях, когда ТП устанавливаются в местах сосредоточения симметричных трехфазных нагрузок (мастерские, кормоприготовительные цеха, мельницы и т. п.), то есть там, где мощность однофазных нагрузок сравнительно мала и где величина однофазного тока короткого замыкания значима для надежной работы защиты. В сельских электрических сетях с высоким удель-

ным весом однофазных нагрузок трансформаторы с указанной схемой соединения обмоток не целесообразны.

Способностью симметрировать напряжение, как известно из теории электрических машин, обладают трансформаторы с некоторыми схемами соединения обмоток («звезда–зигзаг–нуль», «звезда–звезда–нуль–разомкнутый треугольник», «звезда–звезда–нуль с симметрирующим устройством» и т. п.).

Схема соединения обмоток «звезда–зигзаг–нуль» рекомендована ГОСТ 3484–65 как наиболее целесообразная для сельских электрических сетей [58, 59, 116]. Она обеспечивает симметрию фазных и линейных напряжений при несимметричной нагрузке фаз, дает возможность включать потребители как на линейные, так и на фазные напряжения (рис. 1.4).

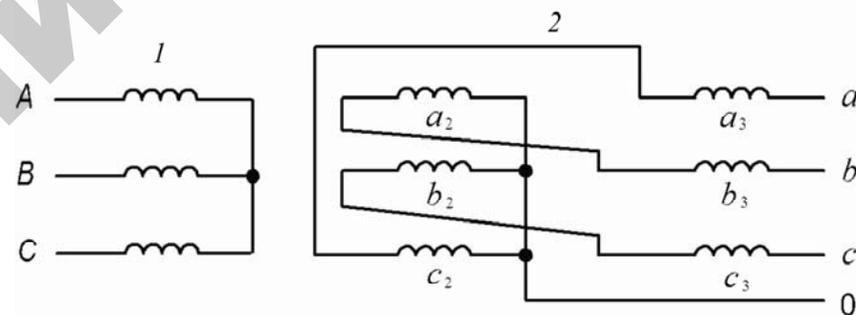


Рис. 1.4. Схема соединения обмоток трансформатора «звезда–зигзаг–нуль»: 1 – обмотка высшего напряжения трансформатора; 2 – обмотка низшего напряжения трансформатора

Наряду с указанными преимуществами трансформатор с данной схемой соединения обмоток обладает рядом недостатков. Вес обмоток у него возрастает до 17 % по сравнению со схемой «звезда–звезда–нуль». Потери мощности также будут больше, и помимо дополнительных затрат энергии ухудшается тепловой режим работы. Кроме того, данная схема не может работать в замкнутых сетях или в параллель с трансформаторами «звезда–звезда–нуль», так как она имеет одиннадцатую группу. При этом повышение надежности требует как установки двухтрансформаторных подстанций, так и кольцевания сетей с обеспечением потребителей высококачественной электроэнергией.

Таким образом, использование трансформаторов со схемой соединения обмоток «звезда–зигзаг–нуль» в сельских электрических сетях целесообразно там, где имеет место несимметрия напряжений и при этом не требуется кольцевание сетей или параллельная работа с трансформаторами «звезда–звезда–нуль».

На кафедре электроснабжения (БГАУ) разработана схема соединения обмоток «звезда–звезда–нуль–разомкнутый треугольник» [117, 118]. Схема содержит дополнительные компенсирующие витки, расположенные на всех трех стержнях магнитопровода трансформатора и соединенные в разомкнутый треугольник. Один из свободных концов разомкнутого треугольника подключен к нейтрали обмотки низшего напряжения, другой – через фарфоровый ввод, закрепленный на крышке трансформатора, – выведен наружу (рис. 1.5).

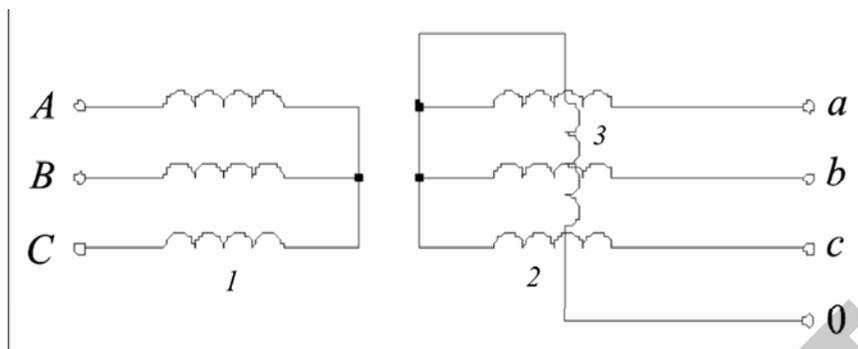


Рис. 1.5. Схема соединения обмоток трансформатора «звезда–звезда–нуль–разомкнутый треугольник»:

1 – обмотка высшего напряжения трансформатора; 2 – компенсирующие витки; 3 – обмотка низшего напряжения трансформатора

Компенсирующие витки уложены и включены таким образом, чтобы ток нулевого провода, равный утроенной величине тока нулевой последовательности, проходя по виткам, создавал встречные компенсирующие потоки нулевой последовательности в той же магнитной цепи, в которой протекают потоки нулевой последовательности, создаваемые токами рабочих обмоток. При равенстве потоков от компенсирующих витков и рабочих обмоток будет иметь место полная компенсация.

Схема «звезда–звезда–нуль–разомкнутый треугольник» не препятствует кольцеванию сетей с трансформаторами «звезда–звезда–нуль» и может работать с ними в параллель, так как имеет ту же группу. Она обладает всеми достоинствами трансформатора со схемой соединения обмоток «звезда–зигзаг–нуль».

В 1984 г. на кафедре электроснабжения (БГАУ) была разработана новая схема соединения обмоток трансформатора «звезда–звезда–нуль с симметрирующим устройством» (Y/Y_nCU) [119].

Трансформатор с указанной схемой соединения обмоток содержит обмотку высшего напряжения 1, обмотку низшего напряжения 2 и компенсационную обмотку 3, охватывающую все основные обмотки. Один конец компенсационной обмотки подключен к нейтрали обмоток низшего напряжения, а другой конец выведен наружу (рис. 1.6).

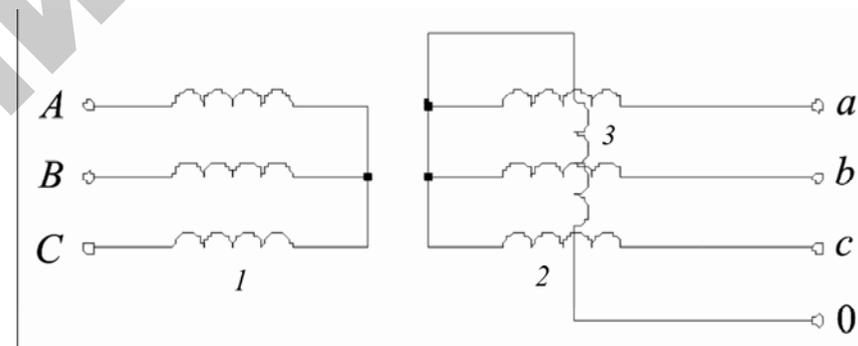


Рис. 1.6. Схема соединения обмоток трансформатора «звезда–звезда–нуль с симметрирующим устройством»:

1 – обмотка высшего напряжения трансформатора; 2 – обмотка низшего напряжения трансформатора; 3 – компенсационная обмотка

Компенсационная обмотка уложена и включена таким образом, чтобы ток нулевого провода, равный утроенной величине тока нулевой последовательности, проходя по виткам, создавал бы встречные компенсирующие потоки нулевой последовательности в той же магнитной цепи, в которой протекают потоки нулевой последовательности, создаваемые токами рабочих обмоток. Полная компенсация потоков выполняется при равенстве ампервитков рабочей обмотки и дополнительных компенсирующих витков.

Сопротивление нулевой последовательности данного трансформатора уменьшается более чем в десять раз, при этом существенно улучшается качество напряжения.

Трансформатор со схемой соединения обмоток «звезда–звезда–нуль с симметрирующим устройством» обладает всеми достоинствами трансформатора со схемой «звезда–звезда–нуль–разомкнутый треугольник». Однако более удобен при его изготовлении. Данный трансформатор улучшает также форму кривой напряжения, так как компенсирует высшие гармонические напряжения, кратные трем и имеющие нулевую последовательность.

Способностью улучшать качество напряжения обладает также предложенная и разработанная на кафедре электроснабжения (БГАТУ) схема соединения обмоток трансформатора «звезда–треугольник с зигзагом» (рис. 1.7). Трансформатор с такой схемой компенсирует магнитные потоки нулевой последовательности в стержнях магнитопровода при несимметричной нагрузке и магнитные потоки высших гармоник при нелинейном характере нагрузки [120].

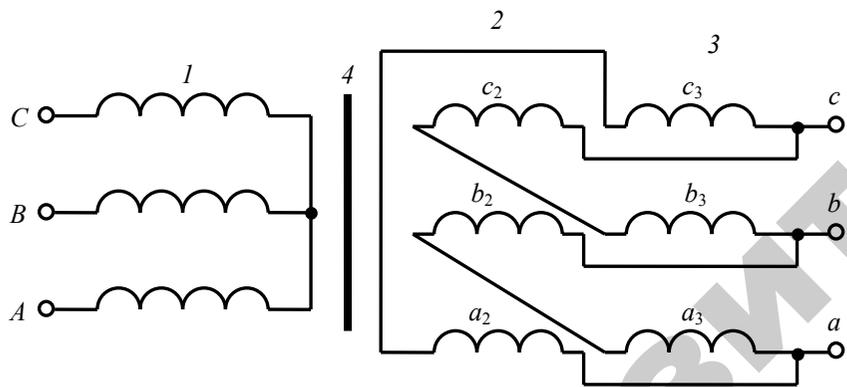


Рис. 1.7. Схема соединения обмоток трехфазного трансформатора «звезда–треугольник с зигзагом»:

1 – первичные фазные обмотки; 2, 3 – половины вторичных обмоток;
4 – магнитопровод

При этом компенсация будет практически полной, так как предлагаемая схема сочетает в себе компенсирующие свойства схем соединения обмоток «зигзаг» и «треугольник». Первичные фазные

обмотки 1 трансформатора соединены в звезду без нулевого провода. Вторичные обмотки состоят из двух одинаковых половин 2 и 3. Причем на каждой из стержней магнитопровода 4 размещены половины вторичных обмоток двух разных фаз. Вторичная обмотка фазы *a* состоит из двух половин – a_3 и b_2 , фазы *b* – b_3 и c_2 , фазы *c* – c_3 и a_2 . Вторичные обмотки соединены в треугольник.

В 2010 г. сотрудниками кафедры электроснабжения (БГАТУ) было предложено новое симметрирующее устройство [121, 122], позволяющее путем перераспределения токов нагрузки в фазных проводах при несимметричной нагрузке фаз повышать качество напряжения в трехфазной четырехпроводной сети. Оно содержит магнитопровод 1 и расположенные на нем три обмотки 2, начала которых подключены к источнику питания, а концы – к линиям электропередачи с несимметричной нагрузкой. Каждая обмотка выполнена с одинаковым числом витков и включена в рассечку соответствующего фазного провода источника питания (рис. 1.8).

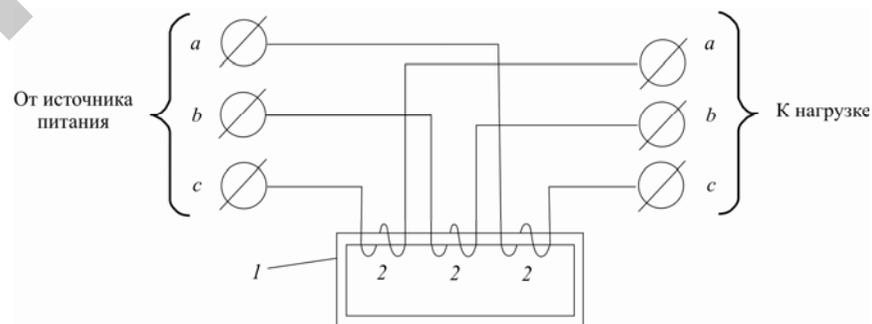


Рис. 1.8. Устройство для симметрирования напряжения при несимметричной нагрузке фаз:
1 – магнитопровод; 2 – обмотка

Так как коэффициент трансформации устройства равен единице, то большие значения токов в некоторых фазах будут трансформироваться в другие фазы, где ток меньше. Это приводит к перераспределению токов по фазам, и происходит их взаимное выравнивание независимо от величины нагрузки. Последнее приводит к симметрированию напряжения при несимметричной нагрузке фаз.

2. НЕСИММЕТРИЧНЫЕ РЕЖИМЫ РАБОТЫ ТРЕХФАЗНЫХ СИММЕТРИРУЮЩИХ ТРАНСФОРМАТОРОВ

2.1. Методика исследования несимметричной работы трансформаторов

Исследования несимметричных режимов работы трансформаторов производились методом симметричных составляющих. Этот метод был разработан Фортестью и впервые опубликован в 1918 году [188]. Примерно в то же время (независимо от Фортестья) метод был разработан профессором В. А. Толвинским в Петрограде, но его работа была опубликована лишь в 1924 г. [123].

Сначала метод симметричных составляющих казался искусственным приемом, пригодным для решения только ряда определенных задач. Сейчас, основанный на твердой теоретической базе, он является мощным аналитическим средством для решения всех вопросов, связанных с несимметричными режимами в электрических системах.

В настоящее время этот метод излагается как в специальной [5, 124, 125], так и в учебной [112, 126–128] литературе и является обязательным для изучения в энергетических и электромеханических вузах.

Метод симметричных составляющих служит неотъемлемым средством для исследования несимметричной работы всех электрических устройств вообще, и трансформаторов в частности.

Сущность метода заключается в том, что любая трехфазная несимметричная система (токов и напряжений) может быть разложена на три симметричные системы: прямой, обратной и нулевой последовательности.

Сопротивления для каждой симметричной системы токов различны и называются соответственно сопротивлениями прямой, обратной и нулевой последовательности.

Так как трансформатор представляет собой статический аппарат, то сопротивления прямой и обратной последовательности у него равны сопротивлению короткого замыкания. Потому токи прямой и обратной последовательности рассматривать в отдельности нет необходимости, а удобнее заменить их суммой.

Для анализа несимметричной работы трансформаторов были приняты следующие допущения:

- а) трансформатор является линейным элементом сети;
- б) система первичных напряжений симметрична и не зависит от работы трансформатора;
- в) вторичная обмотка трансформатора приведена к первичной;
- г) ток холостого хода равен нулю;
- д) рассматривается трансформатор понизительный.

2.2. Трансформатор со схемой соединения обмоток «звезда–звезда–нуль–разомкнутый треугольник» (Y/Y_n–разомкнутый треугольник)

2.2.1 Общий случай несимметрии

Соотношение токов и напряжений. Несимметричную работу трансформатора со схемой соединения обмоток Y/Y_n–разомкнутый треугольник начнем с рассмотрения условий протекания токов нулевой последовательности. Для этого рассмотрим схему соединения обмоток данного трансформатора, представленную на рис. 1.2.

Так как обмотка высшего напряжения трансформатора соединена в «звезду» и нет нулевого провода, то токи нулевой последовательности в этой обмотке отсутствуют. Поэтому сумма векторов фазных токов будет равна

$$\underline{I}_A + \underline{I}_B + \underline{I}_C = 0, \quad (2.1)$$

где $\underline{I}_A, \underline{I}_B, \underline{I}_C$ – фазные токи обмотки высшего напряжения.

Или

$$\left. \begin{aligned} \underline{I}_A &= \underline{I}_{A1} + \underline{I}_{A2} = \underline{I}'_A; \\ \underline{I}_B &= \underline{I}_{B1} + \underline{I}_{B2} = \underline{I}'_B; \\ \underline{I}_C &= \underline{I}_{C1} + \underline{I}_{C2} = \underline{I}'_C, \end{aligned} \right\} \quad (2.2)$$

где $\underline{I}'_A, \underline{I}'_B, \underline{I}'_C$ – суммы токов прямой и обратной последовательности обмотки высшего напряжения трансформатора соответствующих фаз.

Напряжение высшей обмотки трансформатора будет содержать составляющие всех последовательностей:

$$\left. \begin{aligned} \underline{U}_A &= \underline{U}_{A1} + \underline{U}_{A2} + \underline{U}_{A0} = \underline{U}'_A + \underline{U}_{A0}; \\ \underline{U}_B &= \underline{U}_{B1} + \underline{U}_{B2} + \underline{U}_{B0} = \underline{U}'_B + \underline{U}_{B0}; \\ \underline{U}_C &= \underline{U}_{C1} + \underline{U}_{C2} + \underline{U}_{C0} = \underline{U}'_C + \underline{U}_{C0}, \end{aligned} \right\} \quad (2.3)$$

где $\underline{U}_A, \underline{U}_B, \underline{U}_C$ – фазные напряжения обмотки высшего напряжения трансформатора;

$\underline{U}'_A, \underline{U}'_B, \underline{U}'_C$ – суммы фазных напряжений прямой и обратной последовательности обмотки высшего напряжения трансформатора соответствующих фаз;

$\underline{U}_{A0}, \underline{U}_{B0}, \underline{U}_{C0}$ – напряжение нулевой последовательности обмотки высшего напряжения трансформатора соответствующих фаз.

В токе и в напряжении обмотки низшего напряжения трансформатора имеются составляющие всех последовательностей, то есть:

$$\left. \begin{aligned} \underline{I}_a &= \underline{I}_{a1} + \underline{I}_{a2} + \underline{I}_{a0} = \underline{I}'_a + \underline{I}_{a0}; \\ \underline{I}_b &= \underline{I}_{b1} + \underline{I}_{b2} + \underline{I}_{b0} = \underline{I}'_b + \underline{I}_{b0}; \\ \underline{I}_c &= \underline{I}_{c1} + \underline{I}_{c2} + \underline{I}_{c0} = \underline{I}'_c + \underline{I}_{c0}, \end{aligned} \right\} \quad (2.4)$$

$$\left. \begin{aligned} \underline{U}_a &= \underline{U}_{a1} + \underline{U}_{a2} + \underline{U}_{a0} = \underline{U}'_a + \underline{U}_{a0}; \\ \underline{U}_b &= \underline{U}_{b1} + \underline{U}_{b2} + \underline{U}_{b0} = \underline{U}'_b + \underline{U}_{b0}; \\ \underline{U}_c &= \underline{U}_{c1} + \underline{U}_{c2} + \underline{U}_{c0} = \underline{U}'_c + \underline{U}_{c0}, \end{aligned} \right\} \quad (2.5)$$

где $\underline{U}_a, \underline{U}_b, \underline{U}_c$ – фазные напряжения обмотки низшего напряжения трансформатора;

$\underline{U}'_a, \underline{U}'_b, \underline{U}'_c$ – суммы фазных напряжений прямой и обратной последовательности обмотки низшего напряжения трансформатора соответствующих фаз;

$\underline{U}_{a0}, \underline{U}_{b0}, \underline{U}_{c0}$ – напряжение нулевой последовательности обмотки низшего трансформатора соответствующих фаз.

Система токов нулевой последовательности не может трансформироваться в первичной обмотке трансформатора, а трансформируются только токи прямой и обратной последовательности.

Поэтому

$$\left. \begin{aligned} \underline{I}'_A &= -\underline{I}'_{a0}; \\ \underline{I}'_B &= -\underline{I}'_{b0}; \\ \underline{I}'_C &= -\underline{I}'_{c0}. \end{aligned} \right\} \quad (2.6)$$

На основании равенства (2.2)

$$\left. \begin{aligned} \underline{I}_A &= -\underline{I}'_a; \\ \underline{I}_B &= -\underline{I}'_b; \\ \underline{I}_C &= -\underline{I}'_c. \end{aligned} \right\} \quad (2.7)$$

Учитывая выражение (2.1):

$$\underline{I}'_a + \underline{I}'_b + \underline{I}'_c = 0. \quad (2.8)$$

Схема замещения трансформатора. Исследование электрических аппаратов в различных режимах работы (как симметричных, так и несимметричных) удобно проводить с использованием схем замещения.

Схема замещения рассматриваемого трансформатора в симметричном режиме ничем не отличается от схемы замещения трансформатора «звезда–звезда–нуль». Для несимметричных режимов работы схемы замещения будут отличаться.

Чтобы получить схему замещения трансформатора Y/Y_n –разомкнутый треугольник, приведенного на рис. 1.2, согласно законам Киргофа запишем уравнения:

1) для обмотки высшего напряжения фазы A :

$$\underline{U}_A = -\underline{E}_a + \underline{I}_A Z_{\text{ВПК}}, \quad (2.9)$$

где \underline{E}_a – ЭДС фазы a , создаваемая основным потоком трансформатора;

$Z_{\text{ВПК}}$ – эквивалентное сопротивление обмотки высшего напряжения трансформатора;

2) для обмотки низшего напряжения с учетом действия компенсирующих витков для фазы a :

$$\underline{U}_a = -\underline{E}_a - \underline{I}_a Z_{\text{РВК}} + \underline{I}_{a0} 3Z_{\text{КВР}}, \quad (2.10)$$

где $Z_{\text{РВК}}$ – эквивалентное сопротивление низшего напряжения;

\underline{I}_{a0} – ток нулевой последовательности, протекающий по компенсирующим виткам от фазы a ;

$Z_{\text{КВР}}$ – эквивалентное сопротивление компенсирующих витков.

Эквивалентные сопротивления обмоток высшего, низшего напряжения и компенсирующих витков определяются по формулам:

$$\left. \begin{aligned} Z_{\text{ВПК}} &= r_{\text{ВПК}} + jx_{\text{ВПК}} = r_{\text{В}} + j\omega(L_{\text{В}} - M_{\text{ВР}} - M_{\text{ВК}} + M_{\text{РК}}); \\ Z_{\text{РВК}} &= r_{\text{РВК}} + jx_{\text{РВК}} = r_{\text{Р}} + j\omega(L_{\text{Р}} - M_{\text{ВР}} - M_{\text{РК}} + M_{\text{ВК}}); \\ Z_{\text{КВР}} &= r_{\text{КВР}} + jx_{\text{КВР}} = r_{\text{К}} + j\omega(L_{\text{К}} - M_{\text{ВК}} - M_{\text{РК}} + M_{\text{ВР}}), \end{aligned} \right\} \quad (2.11)$$

где $r_{\text{В}}, r_{\text{Р}}, r_{\text{К}}$ – активные сопротивления соответственно обмотки высшего напряжения, рабочей обмотки низшего напряжения и компенсирующих витков;

$L_{\text{В}}, L_{\text{Р}}, L_{\text{К}}$ – индуктивность, соответственно, обмотки высшего, рабочей обмотки низшего напряжения и компенсирующих витков;

$M_{\text{ВР}}, M_{\text{ВК}}, M_{\text{РК}}$ – взаимная индукция пары обмоток.

В уравнении (2.10) сопротивление компенсирующих витков утроено, так как компенсирующие витки, уложенные на трех стержнях, соединены последовательно, и ток нулевой последовательности каждой фазы протекает по ним всем.

Обе части уравнений (2.9) и (2.10) разложим на симметричные составляющие.

Получим

$$\begin{aligned} \underline{U}_A &= \underline{U}_{A1} + \underline{U}_{A2} + \underline{U}_{A0} = \\ &= -\underline{E}_{a1} - \underline{E}_{a2} - \underline{E}_{a0} + \underline{I}_{A1} Z_{\text{ВПК}} + \underline{I}_{A2} Z_{\text{ВПК}}; \end{aligned} \quad (2.12)$$

$$\begin{aligned} \underline{U}_a &= \underline{U}_{a1} + \underline{U}_{a2} + \underline{U}_{a0} = \\ &= \underline{E}_{a1} + \underline{E}_{a2} + \underline{E}_{a0} - \underline{I}_{a1} Z_{\text{РВК}} - \underline{I}_{a2} Z_{\text{РВК}} - \underline{I}_{a0} Z_{\text{РВК}} + \underline{I}_{a0} 3Z_{\text{КВР}}, \end{aligned} \quad (2.13)$$

где $\underline{E}_{a1}, \underline{E}_{a2}, \underline{E}_{a0}$ – ЭДС фазы a , соответственно, прямой, обратной и нулевой последовательности;

$\underline{I}_{a1}, \underline{I}_{a2}, \underline{I}_{a0}$ – токи прямой, обратной и нулевой последовательности, протекающие по рабочей обмотке низшего напряжения фазы a .

Из выражения (2.12) следует:

$$\underline{U}'_A = -\underline{E}'_a + \underline{I}'_A Z_{\text{ВПК}}; \quad (2.14)$$

$$\underline{U}_{A0} = -\underline{E}_{a0}, \quad (2.15)$$

где $\underline{E}'_a = \underline{E}_{a1} + \underline{E}_{a2}$ – сумма ЭДС прямой и обратной последовательности рабочей обмотки низшего напряжения фазы a .

Аналогично из уравнения (2.13) следует, что

$$\underline{U}'_{ap} = \underline{E}'_a - \underline{I}'_{ap} Z_{PBK}, \quad (2.16)$$

где $\underline{U}'_{ap} = \underline{U}_{a1} + \underline{U}_{a2}$ – сумма фазных напряжений прямой и обратной последовательности обмотки низшего напряжения трансформатора фазы a ;

$$\underline{U}_{a0} = \underline{E}_{a0} - \underline{I}_{ap0} Z_{PBK} + \underline{I}_{ak0} 3Z_{KBP}. \quad (2.17)$$

Напряжение нулевой последовательности обмотки низшего напряжения трансформатора с учетом действия компенсирующих витков представим следующим образом:

$$\underline{U}_{a0} = \underline{U}_{ap0} - \underline{U}_{ak0},$$

где \underline{U}_{ap0} – напряжение нулевой последовательности рабочей обмотки низшего напряжения фазы a без учета действия компенсирующих витков;

\underline{U}_{ak0} – напряжение нулевой последовательности компенсирующих витков фазы a без учета влияния обмотки высшего напряжения.

Теперь уравнение (2.17) будет иметь следующий вид:

$$\underline{U}_{ap0} - \underline{U}_{ak0} = \underline{E}_{a0} - \underline{I}_{ap0} Z_{PBK} + \underline{I}_{ak0} 3Z_{KBP}. \quad (2.18)$$

Преобразуя последнее выражение, получим

$$-\underline{E}_{a0} = -\underline{I}_{ap0} Z_{PBK} - \underline{U}_{ap0} + \underline{I}_{ak0} 3Z_{KBP} + \underline{U}_{ak0}. \quad (2.19)$$

На основании уравнений (2.14) и (2.16) построена схема замещения трансформатора со схемой соединения обмоток Y/Y_n –разомкнутый треугольник для токов прямой и обратной последовательности (рис. 2.1, a), а на основании уравнений (2.15) и (2.19) – для токов нулевой последовательности (рис. 2.1, b) [129].

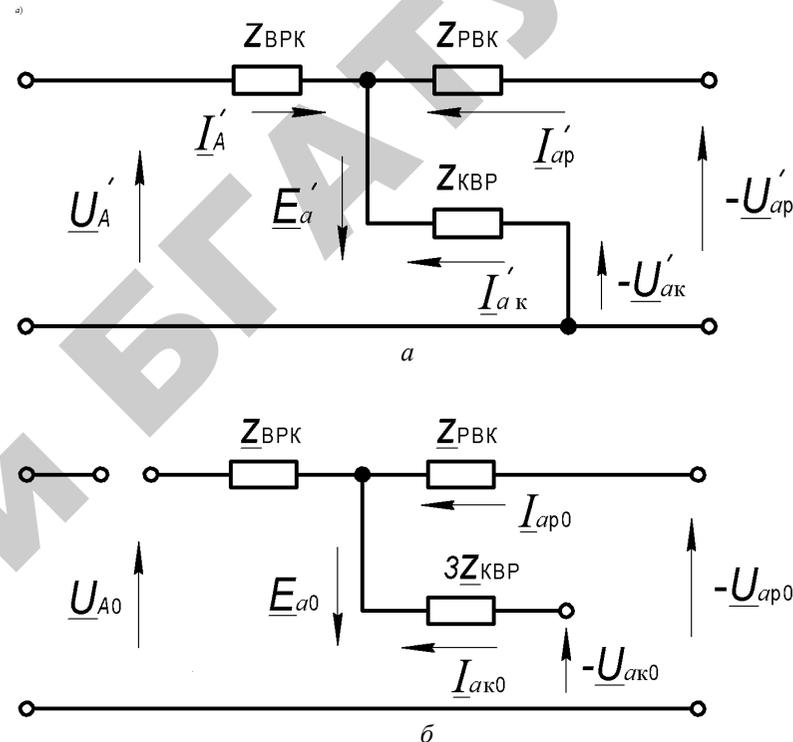


Рис. 2.1. Схемы замещения трансформатора Y/Y_n –разомкнутый треугольник:
 a – для токов прямой и обратной последовательности;
 b – для токов нулевой последовательности

Фазные напряжения вторичной цепи. На основании схемы замещения (рис. 2.1, a) для напряжений и обратной последовательности трансформатора без учета компенсирующих витков для фаз A обмоток высшего и низшего напряжения можно записать следующее уравнение:

$$\underline{U}'_A - \underline{I}'_A Z_{BPK} + \underline{I}'_{ap} Z_{PBK} = -\underline{U}'_{ap}. \quad (2.20)$$

Первичные и вторичные напряжения прямой и обратной последовательности обмотки высшего напряжения и компенсирующих витков (рис. 2.1, a) связаны следующим уравнением:

$$\underline{U}'_A - \underline{I}'_A Z_{\text{ВРК}} + \underline{I}'_{\text{ак}} 3Z_{\text{КВР}} = -\underline{U}'_{\text{ак}} = 0, \quad (2.21)$$

где $\underline{I}'_{\text{ак}}$ – суммарный ток прямой и обратной последовательности фазы \dot{a} , протекающий в компенсирующих витках;

$\underline{U}'_{\text{ак}}$ – суммарное фазное напряжение прямой и обратной последовательности компенсирующих витков фазы \dot{a} .

Так как по компенсирующим виткам протекает только ток нулевой последовательности, то

$$\underline{I}'_{\text{ак}} = 0 \text{ и } \underline{U}'_{\text{ак}} = 0.$$

Учитывая выражения (2.7) и то, что $Z_{\text{ВРК}} + Z_{\text{РВК}} = Z_{\text{К}}$, уравнение (2.20) для фазы A можно записать в следующем виде:

$$\underline{U}'_A - \underline{I}'_A Z_{\text{К}} = -\underline{U}'_{\text{ар}}. \quad (2.22)$$

Аналогично для фаз B и C :

$$\underline{U}'_B - \underline{I}'_B Z_{\text{К}} = -\underline{U}'_{\text{бр}}; \quad (2.23)$$

$$\underline{U}'_C - \underline{I}'_C Z_{\text{К}} = -\underline{U}'_{\text{ср}}, \quad (2.24)$$

где $\underline{U}'_{\text{бр}}$, $\underline{U}'_{\text{ср}}$ – сумма фазных напряжений прямой и обратной последовательности рабочих обмоток низшего напряжения трансформатора соответственно фаз b и c .

Для токов нулевой последовательности (рис. 2.1, δ) справедливы следующие соотношения:

– для обмоток трансформатора без учета действия компенсирующих витков:

$$\underline{U}_{\text{А0}} + \underline{I}_{\text{ар0}} Z_{\text{РВК}} = -\underline{U}_{\text{ар0}}; \quad (2.25)$$

– для обмотки высшего напряжения и компенсирующих витков:

$$\underline{U}_{\text{А0}} + \underline{I}_{\text{ак0}} 3Z_{\text{КВР}} = -\underline{U}_{\text{ак0}}. \quad (2.26)$$

Аналогично уравнениям (2.25) и (2.26) имеем для фазы B :

$$\underline{U}_{\text{В0}} + \underline{I}_{\text{бр0}} Z_{\text{РВК}} = -\underline{U}_{\text{бр0}}; \quad (2.27)$$

$$\underline{U}_{\text{В0}} + \underline{I}_{\text{бк0}} 3Z_{\text{КВР}} = -\underline{U}_{\text{бк0}}, \quad (2.28)$$

Для фазы C :

$$\underline{U}_{\text{С0}} + \underline{I}_{\text{ср0}} Z_{\text{РВК}} = -\underline{U}_{\text{ср0}}; \quad (2.29)$$

$$\underline{U}_{\text{С0}} + \underline{I}_{\text{ск0}} 3Z_{\text{КВР}} = -\underline{U}_{\text{ск0}}, \quad (2.30)$$

где $\underline{U}_{\text{бр0}}$, $\underline{U}_{\text{ср0}}$ – напряжение нулевой последовательности рабочей обмотки низшего напряжения без учета действия компенсирующих витков соответственно фаз b и c ;

$\underline{U}_{\text{бк0}}$, $\underline{U}_{\text{ск0}}$ – напряжение нулевой последовательности компенсирующих витков без учета влияния обмотки высшего напряжения соответственно фаз b и c ;

$\underline{I}_{\text{бк0}}$, $\underline{I}_{\text{ск0}}$ – ток нулевой последовательности, протекающий по компенсирующим виткам соответственно от фаз b и c .

Так как

$$\left. \begin{aligned} \underline{I}_{\text{ар0}} &= -\underline{I}_{\text{ак0}} = \underline{I}_0; \\ \underline{I}_{\text{бр0}} &= -\underline{I}_{\text{бк0}} = \underline{I}_0; \\ \underline{I}_{\text{ср0}} &= -\underline{I}_{\text{ск0}} = \underline{I}_0, \end{aligned} \right\} \quad (2.31)$$

то уравнения (2.25)–(2.30) можно записать в следующем виде:

для фазы A :

$$\underline{U}_{A0} + \underline{I}_0 Z_{\text{РВК}} = -\underline{U}_{ap0}; \quad (2.32)$$

$$\underline{U}_{A0} + 3\underline{I}_0 Z_{\text{КВР}} = -\underline{U}_{ak0}; \quad (2.33)$$

для фазы B :

$$\underline{U}_{B0} + \underline{I}_0 Z_{\text{РВК}} = -\underline{U}_{bp0}; \quad (2.34)$$

$$\underline{U}_{B0} + 3\underline{I}_0 Z_{\text{КВР}} = -\underline{U}_{bk0}; \quad (2.35)$$

для фазы C :

$$\underline{U}_{C0} + \underline{I}_0 Z_{\text{РВК}} = -\underline{U}_{cp0}; \quad (2.36)$$

$$\underline{U}_{C0} + 3\underline{I}_0 Z_{\text{КВР}} = -\underline{U}_{ck0}. \quad (2.37)$$

Из выражений (2.32), (2.34), (2.36) видно, что напряжение нулевой последовательности каждой из фаз трансформатора

$$-\underline{U}_0 = -\underline{U}_{ap0} - \underline{U}_{A0} = -\underline{U}_{bp0} - \underline{U}_{B0} = -\underline{U}_{cp0} - \underline{U}_{C0} = \underline{I}_0 Z_{\text{РВК}}$$

или

$$\underline{U}_0 = -\underline{I}_0 Z_{\text{РВК}}, \quad (2.38)$$

а из выражений (2.33), (2.35), (2.37) следует, что компенсирующее напряжение нулевой последовательности компенсирующих витков, уложенных на одном стержне, равно

$$-\underline{U}_{0к} = -\underline{U}_{ak0} - \underline{U}_{A0} = -\underline{U}_{bk0} - \underline{U}_{B0} = -\underline{U}_{ck0} - \underline{U}_{C0} = 3\underline{I}_0 Z_{\text{КВР}}$$

или

$$\underline{U}_{0к} = -3\underline{I}_0 Z_{\text{КВР}}. \quad (2.39)$$

Из выражений (2.38) и (2.39) следует: чтобы симметричная составляющая нулевой последовательности фазного напряжения вторичной обмотки трансформатора была компенсирована дополнительными компенсирующими витками, уложенными на каждом стержне, необходимо соблюдение условия:

$$\underline{U}_0 = \underline{U}_{0к} \quad (2.40)$$

или

$$\underline{I}_0 Z_{\text{РВК}} = 3\underline{I}_0 Z_{\text{КВР}}. \quad (2.41)$$

Отсюда условие полной компенсации будет:

$$Z_{\text{КВР}} = \frac{Z_{\text{РВК}}}{3}. \quad (2.42)$$

Таким образом, для компенсации напряжения нулевой последовательности обмотки низшего напряжения необходимо, чтобы сопротивление компенсирующих витков, уложенных на одном стержне, было втрое меньше сопротивления одной из фаз обмотки низшего напряжения.

Сложив выражения (2.22) и (2.32), (2.23) и (2.34), (2.24) и (2.36), получим фазные напряжения вторичной обмотки трансформатора без учета действия компенсирующих витков:

$$\left. \begin{aligned} \underline{U}'_A + \underline{U}_{A0} - \underline{I}'_A Z_{\text{К}} + \underline{I}_0 Z_{\text{РВК}} &= -\underline{U}'_{ap} - \underline{U}_{ap0}; \\ \underline{U}'_B + \underline{U}_{B0} - \underline{I}'_B Z_{\text{К}} + \underline{I}_0 Z_{\text{РВК}} &= -\underline{U}'_{bp} - \underline{U}_{bp0}; \\ \underline{U}'_C + \underline{U}_{C0} - \underline{I}'_C Z_{\text{К}} + \underline{I}_0 Z_{\text{РВК}} &= -\underline{U}'_{cp} - \underline{U}_{cp0}. \end{aligned} \right\} \quad (2.43)$$

Учитывая уравнения (2.3) и (2.5), получим:

$$\left. \begin{aligned} \underline{U}_A - \underline{I}'_A Z_K + \underline{I}_0 Z_{\text{РВК}} &= -\underline{U}_{ap}; \\ \underline{U}_B - \underline{I}'_B Z_K + \underline{I}_0 Z_{\text{РВК}} &= -\underline{U}_{bp}; \\ \underline{U}_C - \underline{I}'_C Z_K + \underline{I}_0 Z_{\text{РВК}} &= -\underline{U}_{cp}, \end{aligned} \right\} \quad (2.44)$$

где $\underline{U}_{ap}, \underline{U}_{bp}, \underline{U}_{cp}$ – фазные напряжения вторичной обмотки трансформатора без учета действия компенсирующих витков.

Вычтя из правой и левой частей (2.44) одну и ту же величину

$$\underline{U}_{0к} = -3\underline{I}_0 Z_{\text{КВР}},$$

получим фазные напряжения вторичной обмотки трансформатора с учетом действия компенсирующих витков:

$$\left. \begin{aligned} \underline{U}_{ap} - \underline{U}_{0к} &= -\underline{U}_A + \underline{I}_A Z_K - \underline{I}_0 Z_{\text{РВК}} + 3\underline{I}_0 Z_{\text{КВР}} = \underline{U}_a; \\ \underline{U}_{bp} - \underline{U}_{0к} &= -\underline{U}_B + \underline{I}_B Z_K - \underline{I}_0 Z_{\text{РВК}} + 3\underline{I}_0 Z_{\text{КВР}} = \underline{U}_b; \\ \underline{U}_{cp} - \underline{U}_{0к} &= -\underline{U}_C + \underline{I}_C Z_K - \underline{I}_0 Z_{\text{РВК}} + 3\underline{I}_0 Z_{\text{КВР}} = \underline{U}_c, \end{aligned} \right\} \quad (2.45)$$

где $\underline{U}_a, \underline{U}_b, \underline{U}_c$ – фазные напряжения вторичной обмотки трансформатора с учетом компенсирующего воздействия дополнительных компенсирующих витков.

Вынесем ток \underline{I}_0 за скобку и уравнения (2.45) получим в следующем виде:

$$\left. \begin{aligned} \underline{U}_a &= -\underline{U}_A + \underline{I}_A Z_K - \underline{I}_0 (Z_{\text{РВК}} + 3Z_{\text{КВР}}); \\ \underline{U}_b &= -\underline{U}_B + \underline{I}_B Z_K - \underline{I}_0 (Z_{\text{РВК}} + 3Z_{\text{КВР}}); \\ \underline{U}_c &= -\underline{U}_C + \underline{I}_C Z_K - \underline{I}_0 (Z_{\text{РВК}} + 3Z_{\text{КВР}}). \end{aligned} \right\} \quad (2.46)$$

Так как в этих уравнениях $Z_{\text{РВК}} - 3Z_{\text{КВР}} = Z_0$, то фазные напряжения вторичной обмотки трансформатора с учетом действия компенсирующих витков будут равны:

$$\left. \begin{aligned} \underline{U}_a &= -\underline{U}_A + \underline{I}_A Z_K - \underline{I}_0 Z_0; \\ \underline{U}_b &= -\underline{U}_B + \underline{I}_B Z_K - \underline{I}_0 Z_0; \\ \underline{U}_c &= -\underline{U}_C + \underline{I}_C Z_K - \underline{I}_0 Z_0, \end{aligned} \right\} \quad (2.47)$$

где Z_0 – полное сопротивление нулевой последовательности рассматриваемого трансформатора.

Выполняя условие полной компенсации (2.42) и пренебрегая активной составляющей сопротивления нулевой последовательности ввиду его незначительной величины, можно считать $Z_0 = 0$.

В этом случае уравнения (2.47) примут вид:

$$\left. \begin{aligned} \underline{U}_a &= -\underline{U}_A + \underline{I}_A Z_K; \\ \underline{U}_b &= -\underline{U}_B + \underline{I}_B Z_K; \\ \underline{U}_c &= -\underline{U}_C + \underline{I}_C Z_K. \end{aligned} \right\} \quad (2.48)$$

Из последних уравнений следует, что с применением у трансформатора со схемой соединения обмоток Y/Y_n дополнительных компенсирующих витков будет иметь место полная компенсация потоков нулевой последовательности и система напряжений будет симметричной [130, 131].

Линейные напряжения вторичной цепи обмотки трансформатора. Линейные напряжения обмотки низшего напряжения трансформатора равны:

$$\left. \begin{aligned} \underline{U}_{ab} &= \underline{U}_a - \underline{U}_b; \\ \underline{U}_{bc} &= \underline{U}_b - \underline{U}_c; \\ \underline{U}_{ca} &= \underline{U}_c - \underline{U}_a, \end{aligned} \right\} \quad (2.49)$$

где $\underline{U}_{ab}, \underline{U}_{bc}, \underline{U}_{ca}$ – линейные напряжения вторичной цепи трансформатора.

Подставив в эти выражения значения фазных напряжений из уравнений (2.48) линейные напряжения вторичной цепи трансформатора можно получить следующим образом:

$$\left. \begin{aligned} \underline{U}_{ab} &= -(\underline{U}_A - \underline{U}_B) + (\underline{I}_A - \underline{I}_B)Z_K = -\underline{U}_{AB} + (\underline{I}_A - \underline{I}_B)Z_K; \\ \underline{U}_{bc} &= -(\underline{U}_B - \underline{U}_C) + (\underline{I}_B - \underline{I}_C)Z_K = -\underline{U}_{BC} + (\underline{I}_B - \underline{I}_C)Z_K; \\ \underline{U}_{ca} &= -(\underline{U}_C - \underline{U}_A) + (\underline{I}_C - \underline{I}_A)Z_K = -\underline{U}_{CA} + (\underline{I}_C - \underline{I}_A)Z_K. \end{aligned} \right\} (2.50)$$

Из последних уравнений видно, что линейные напряжения вторичной цепи трансформатора со схемой соединения обмоток Y/Y_n–разомкнутый треугольник определяются по тем же уравнениям, что и трансформатора Y/Y_n.

Ток нулевой последовательности. Запишем уравнения напряжения цепей нагрузки:

$$\left. \begin{aligned} \underline{U}_a &= \underline{I}_a Z_a = (\underline{I}'_a + \underline{I}_0)Z_a; \\ \underline{U}_b &= \underline{I}_b Z_b = (\underline{I}'_b + \underline{I}_0)Z_b; \\ \underline{U}_c &= \underline{I}_c Z_c = (\underline{I}'_c + \underline{I}_0)Z_c, \end{aligned} \right\} (2.51)$$

где Z_a, Z_b, Z_c – сопротивление нагрузки, соответственно, фаз a, b, c .

С учетом выражения (2.7) уравнения (2.51) получают следующий вид:

$$\left. \begin{aligned} \underline{U}_a &= (-\underline{I}_A + \underline{I}_0)Z_a; \\ \underline{U}_b &= (-\underline{I}_B + \underline{I}_0)Z_b; \\ \underline{U}_c &= (-\underline{I}_C + \underline{I}_0)Z_c. \end{aligned} \right\} (2.52)$$

Подставив значения фазных напряжений уравнений (2.52) в уравнение (2.48), получим:

$$\left. \begin{aligned} -\underline{U}_A + \underline{I}_A Z_K - (-\underline{I}_A + \underline{I}_0)Z_a &= 0; \\ -\underline{U}_B + \underline{I}_B Z_K - (-\underline{I}_B + \underline{I}_0)Z_b &= 0; \\ -\underline{U}_C + \underline{I}_C Z_K - (-\underline{I}_C + \underline{I}_0)Z_c &= 0. \end{aligned} \right\} (2.53)$$

Преобразуя уравнения (2.53), получим их в следующем виде:

$$\left. \begin{aligned} -\underline{U}_A + \underline{I}_A(Z_K + Z_a) - \underline{I}_0 Z_a &= 0; \\ -\underline{U}_B + \underline{I}_B(Z_K + Z_b) - \underline{I}_0 Z_b &= 0; \\ -\underline{U}_C + \underline{I}_C(Z_K + Z_c) - \underline{I}_0 Z_c &= 0. \end{aligned} \right\} (2.54)$$

Учитывая, что

$$\underline{I}_A + \underline{I}_B + \underline{I}_C = 0, \quad (2.55)$$

решим уравнения (2.54) совместно относительно тока \underline{I}_0 .

Из уравнения (2.54) определим значения токов обмотки высшего напряжения трансформатора:

$$\left. \begin{aligned} \underline{I}_A &= \frac{\underline{U}_A + \underline{I}_0 Z_a}{Z_K + Z_a}; \\ \underline{I}_B &= \frac{\underline{U}_B + \underline{I}_0 Z_b}{Z_K + Z_b}; \\ \underline{I}_C &= \frac{\underline{U}_C + \underline{I}_0 Z_c}{Z_K + Z_c}. \end{aligned} \right\} (2.56)$$

Подставив значения токов из уравнений (2.56) в уравнение (2.55), получим

$$\frac{\underline{U}_A + \underline{I}_0 Z_a}{Z_K + Z_a} + \frac{\underline{U}_B + \underline{I}_0 Z_b}{Z_K + Z_b} + \frac{\underline{U}_C + \underline{I}_0 Z_c}{Z_K + Z_c} = 0.$$

Приведем эти уравнения к общему знаменателю:

$$\begin{aligned} & \frac{\underline{U}_A (Z_K + Z_b)(Z_K + Z_c) + \underline{I}_0 Z_a (Z_K + Z_b)(Z_K + Z_c) +}{(Z_K + Z_a)(Z_K + Z_b)(Z_K + Z_c)} \\ & + \frac{\underline{U}_B (Z_K + Z_a)(Z_K + Z_c) + \underline{I}_0 Z_b (Z_K + Z_a)(Z_K + Z_c) +}{(Z_K + Z_a)(Z_K + Z_b)(Z_K + Z_c)} \\ & + \frac{\underline{U}_C (Z_K + Z_a)(Z_K + Z_b) + \underline{I}_0 Z_c (Z_K + Z_a)(Z_K + Z_b) +}{(Z_K + Z_a)(Z_K + Z_b)(Z_K + Z_c)} = 0. \end{aligned}$$

Отсюда найдем ток \underline{I}_0 .

$$\begin{aligned} \underline{I}_0 = & \frac{\underline{U}_A (Z_K + Z_b)(Z_K + Z_c) + \underline{U}_B (Z_K + Z_a)(Z_K + Z_c) +}{Z_a (Z_K + Z_b)(Z_K + Z_c) + Z_b (Z_K + Z_a)(Z_K + Z_c) +} \\ & + \frac{\underline{U}_C (Z_K + Z_a)(Z_K + Z_b)}{Z_c (Z_K + Z_a)(Z_K + Z_b)}. \end{aligned} \quad (2.57)$$

Обозначим знаменатель уравнения (2.57) через

$$\Delta = Z_a (Z_K + Z_b)(Z_K + Z_c) + Z_b (Z_K + Z_a)(Z_K + Z_c) + Z_c (Z_K + Z_a)(Z_K + Z_b)$$

$$\frac{(Z_K + Z_b)(Z_K + Z_c)}{\Delta} = Y_A;$$

$$\frac{(Z_K + Z_a)(Z_K + Z_c)}{\Delta} = Y_B;$$

$$\frac{(Z_K + Z_a)(Z_K + Z_b)}{\Delta} = Y_C,$$

уравнение (2.57) получим в более простом виде:

$$\underline{I}_0 = \underline{U}_A Y_A + \underline{U}_B Y_B + \underline{U}_C Y_C. \quad (2.58)$$

Ток в нулевом проводе трансформатора

$$\underline{I}_{н.п} = \underline{I}_a + \underline{I}_b + \underline{I}_c = 3\underline{I}_0. \quad (2.59)$$

Вторичные токи обмоток трансформатора находим из уравнений:

$$\left. \begin{aligned} \underline{I}_a &= -\underline{I}_A + \underline{I}_0; \\ \underline{I}_b &= -\underline{I}_B + \underline{I}_0; \\ \underline{I}_c &= -\underline{I}_C + \underline{I}_0. \end{aligned} \right\} \quad (2.60)$$

Фазные напряжения первичной стороны трансформатора со схемой соединения обмоток Y/Y_n определяются по формулам:

$$\left. \begin{aligned} \underline{U}_A &= \frac{\underline{U}_{AB} - \underline{U}_{CA}}{3} + \underline{I}_0 z_0; \\ \underline{U}_B &= \frac{\underline{U}_{BC} - \underline{U}_{AB}}{3} + \underline{I}_0 z_0; \\ \underline{U}_C &= \frac{\underline{U}_{CA} - \underline{U}_{BC}}{3} + \underline{I}_0 z_0. \end{aligned} \right\} \quad (2.61)$$

Так как у рассматриваемого трансформатора с дополнительными компенсирующими витками $z_0 = 0$, то последний член уравнений (2.61) будет отсутствовать. Тогда фазные напряжения обмотки высшего напряжения данного трансформатора можно определить:

$$\left. \begin{aligned} \underline{U}_A &= \frac{\underline{U}_{AB} - \underline{U}_{CA}}{3}; \\ \underline{U}_B &= \frac{\underline{U}_{BC} - \underline{U}_{AB}}{3}; \\ \underline{U}_C &= \frac{\underline{U}_{CA} - \underline{U}_{BC}}{3}. \end{aligned} \right\} \quad (2.62)$$

Из последних уравнений следует, что фазные напряжения обмотки высшего напряжения будут также симметричны.

Векторная диаграмма трансформатора. Согласно полученным уравнениям (2.46) построим векторную диаграмму трансформатора со схемой соединения обмоток Y/Y_n — разомкнутый треугольник при несимметричной нагрузке фаз. Построение ее будем производить с учетом падения напряжения от токов прямой, обратной и нулевой последовательности. Для наглядности воспользуемся методом совмещенной диаграммы [132]. Учитывая выражения (2.4) и (2.7), уравнения (2.46) перепишем в следующем виде:

$$\left. \begin{aligned} \underline{U}_a &= -\underline{U}_A - \underline{I}_{a1}z_K - \underline{I}_{a2}z_K - \underline{I}_0z_{PBK} + 3\underline{I}_0z_{KBP}; \\ \underline{U}_b &= -\underline{U}_B - \underline{I}_{b1}z_K - \underline{I}_{b2}z_K - \underline{I}_0z_{PBK} + 3\underline{I}_0z_{KBP}; \\ \underline{U}_c &= -\underline{U}_C - \underline{I}_{c1}z_K - \underline{I}_{c2}z_K - \underline{I}_0z_{PBK} + 3\underline{I}_0z_{KBP}. \end{aligned} \right\} \quad (2.63)$$

В этом уравнении вектора фазы B повернем на 120° , а фазы C на 240° . Для этого умножим их на операторы a и a^2 .

Тогда получим:

$$\left. \begin{aligned} \underline{U}_a &= -\underline{U}_A - \underline{I}_{a1}z_K - \underline{I}_{a2}z_K - \underline{I}_0z_{PBK} + 3\underline{I}_0z_{KBP}; \\ a\underline{U}_b &= a(-\underline{U}_B - \underline{I}_{b1}z_K - \underline{I}_{b2}z_K - \underline{I}_0z_{PBK} + 3\underline{I}_0z_{KBP}); \\ a^2\underline{U}_c &= a^2(-\underline{U}_C - \underline{I}_{c1}z_K - \underline{I}_{c2}z_K - \underline{I}_0z_{PBK} + 3\underline{I}_0z_{KBP}), \end{aligned} \right\}$$

или

$$\left. \begin{aligned} \underline{U}_a &= -\underline{U}_A - \underline{I}_{a1}z_K - \underline{I}_{a2}z_K - \underline{I}_0z_{PBK} + 3\underline{I}_0z_{KBP}; \\ a\underline{U}_b &= -a(a^2\underline{U}_A) - a(a^2\underline{I}_{a1})z_K - a(a\underline{I}_{a2})z_K - a\underline{I}_0z_{PBK} + a3\underline{I}_0z_{KBP}; \\ a^2\underline{U}_c &= -a^2(a\underline{U}_A) - a^2(a\underline{I}_{a1})z_K - a^2(a^2\underline{I}_{a2})z_K - a^2\underline{I}_0z_{PBK} + a^23\underline{I}_0z_{KBP}. \end{aligned} \right\} \quad (2.64)$$

После преобразования уравнения (2.64) будут иметь вид:

$$\left. \begin{aligned} \underline{U}_a &= -\underline{U}_A - \underline{I}_{a1}z_K - \underline{I}_{a2}z_K - \underline{I}_0z_{PBK} + 3\underline{I}_0z_{KBP}; \\ a\underline{U}_b &= -a^3\underline{U}_A - a^3\underline{I}_{a1}z_K - a^2\underline{I}_{a2}z_K - a\underline{I}_0z_{PBK} + a3\underline{I}_0z_{KBP}; \\ a^2\underline{U}_c &= -a^3\underline{U}_A - a^3\underline{I}_{a1}z_K - a^4\underline{I}_{a2}z_K - a^2\underline{I}_0z_{PBK} + a^23\underline{I}_0z_{KBP}. \end{aligned} \right\} \quad (2.65)$$

С учетом свойств векторов

$$a^3 = 1, \quad a^4 = a,$$

фазные напряжения трансформатора в совмещенной диаграмме будут равны:

$$\left. \begin{aligned} \underline{U}_a &= -\underline{U}_A - \underline{I}_{a1}z_K - \underline{I}_{a2}z_K - \underline{I}_0z_{PBK} + 3\underline{I}_0z_{KBP}; \\ a\underline{U}_b &= -\underline{U}_A - \underline{I}_{a1}z_K - a^2\underline{I}_{a2}z_K - a\underline{I}_0z_{PBK} + a3\underline{I}_0z_{KBP}; \\ a^2\underline{U}_c &= -\underline{U}_A - \underline{I}_{a1}z_K - a\underline{I}_{a2}z_K - a^2\underline{I}_0z_{PBK} + a^23\underline{I}_0z_{KBP}. \end{aligned} \right\} \quad (2.66)$$

На основании полученных уравнений (2.66) построим совмещенную векторную диаграмму (рис. 2.2) [133].

На совмещенной диаграмме векторы напряжений холостого хода \underline{U}_A , \underline{U}_B и \underline{U}_C совпадают. Отложив их, прибавим к ним векторы падений напряжений от тока прямой последовательности $\underline{I}_{a1}z_K$, $\underline{I}_{b1}z_K$, $\underline{I}_{c1}z_K$, которые также совпадают, так как они равны по величине и сдвинуты относительно друг друга на 120° .

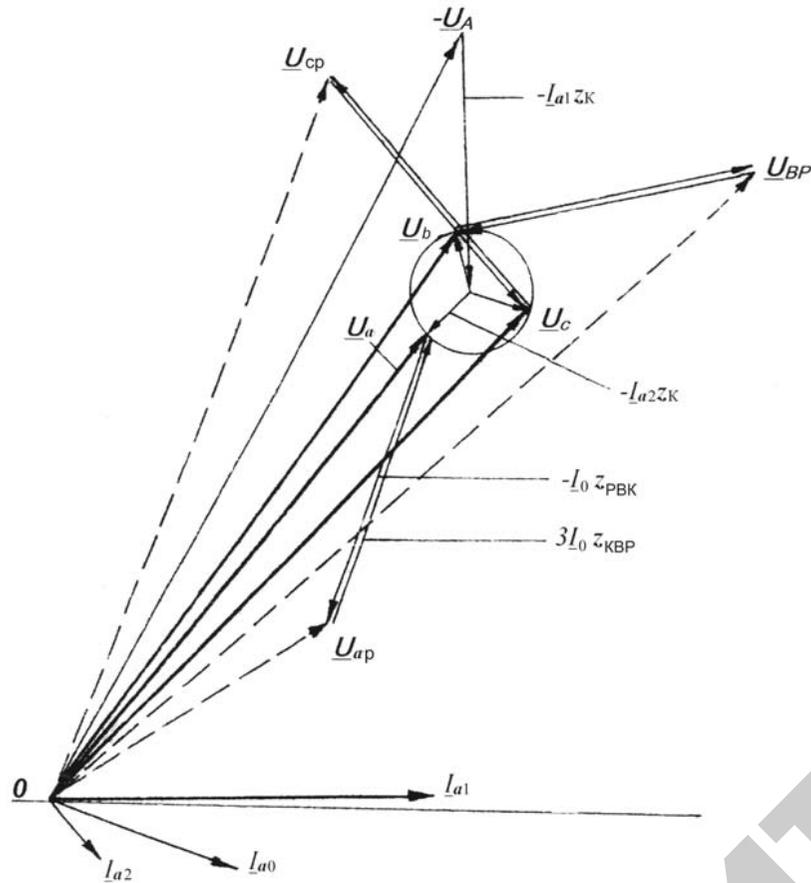


Рис. 2.2. Совмещенная векторная диаграмма трехфазного трансформатора со схемой соединения обмоток Y/Y_n-разомкнутый треугольник при несимметричной нагрузке фаз

К концу вектора $\underline{I}_{a1}z_K$ прибавим вектор падения напряжения от тока обратной последовательности $\underline{I}_{a2}z_K$. С конца вектора $\underline{I}_{a1}z_K$ проводим окружность радиусом, равным вектору $\underline{I}_{a2}z_K$, и разместим на ней концы векторов $\underline{I}_{b2}z_K$ и $\underline{I}_{c2}z_K$ в порядке прямой последовательности, так как векторы падения напряжений от тока обратной последовательности в совмещенной диаграмме имеют порядок чередования фаз прямой по-

следовательности. К концам векторов $\underline{I}_{a2}z_K$, $\underline{I}_{b2}z_K$, $\underline{I}_{c2}z_K$ прибавим в обратном порядке векторы падения напряжения от тока нулевой последовательности, протекающего по рабочим обмоткам, и соединим их с началом координат. Получим векторы напряжений рабочей обмотки без воздействия дополнительных компенсирующих витков \underline{U}_{ap} , \underline{U}_{bp} , \underline{U}_{cp} .

Векторы падения напряжений от тока нулевого провода, протекающего по компенсационным виткам, имеют также обратное чередование и направлены встречно векторам падения напряжений от тока нулевой последовательности. Поэтому эти векторы направим встречно последним, отложив их с концов \underline{U}_{ap} , \underline{U}_{bp} , \underline{U}_{cp} . Соединив данные вектора с началом координат, получим векторы фазных напряжений \underline{U}_a , \underline{U}_b , \underline{U}_c с учетом компенсирующего воздействия дополнительных витков.

Из векторной диаграммы видно, что степень симметрирования фазных напряжений вторичной обмотки трансформатора зависит от соотношения сопротивлений нулевой последовательности рабочих обмоток и дополнительных компенсирующих витков.

Так как величина активной составляющей сопротивления нулевой последовательности очень мала, ею можно пренебречь:

$$z_{PVK} - 3z_{KBV} = 0.$$

В этом случае уравнения (2.66) примут вид:

$$\left. \begin{aligned} \underline{U}_a &= -\underline{U}_A - \underline{I}_{a1}z_K - \underline{I}_{a2}z_K; \\ a\underline{U}_b &= -\underline{U}_A - \underline{I}_{a1}z_K - a^2\underline{I}_{a2}z_K; \\ a^2\underline{U}_c &= -\underline{U}_A - \underline{I}_{a1}z_K - a\underline{I}_{a2}z_K, \end{aligned} \right\} \quad (2.67)$$

то есть имеет место полная компенсация падения напряжений нулевой последовательности. Искажение напряжений в этом случае зависит только от системы векторов падения напряжений от тока обратной последовательности. Как показывают исследования, такое искажение крайне незначительно и им в практических условиях можно пренебречь.

2.2.2. Расчет однофазного тока короткого замыкания

Подставив в уравнение (2.57) $z_a = 0$, $z_b = z_c = \infty$, а также учитывая выражение (2.59) и наличие активной составляющей сопротивления нулевой последовательности, получим выражение для определения однофазного тока короткого замыкания на выводах вторичной обмотки трансформатора:

$$\underline{I}_K^{(1)} = \frac{3U_A}{2z_K + z_0}. \quad (2.68)$$

По данным Минского электротехнического завода, z_0 трансформатора Y/Y_n –разомкнутый треугольник промышленного изготовления мощностью $100 \text{ кВ} \cdot \text{А}$ равно $0,06079 \text{ Ом}$, $U_K = 4,55 \%$. В этом случае

$$z_K = \frac{U_K}{100} \cdot \frac{U_{н.ф.}}{I_{н.ф.}} = \frac{4,55 \cdot 230}{100 \cdot 144,5} = 0,0725 \text{ Ом}$$

и

$$z_0 = 0,835z_K.$$

Тогда

$$\underline{I}_K^{(1)} = \frac{3U_A}{2z_K + 0,835z_K} = \frac{3U_A}{2,835z_K}. \quad (2.69)$$

Преобразуем значение этого тока в долях от номинального. Известно, что

$$z_{K\%} = \frac{z_K}{z_n} \cdot 100.$$

Отсюда

$$z_K = \frac{z_{K\%} z_n}{100}.$$

Так как $z_{K\%} = U_{K\%}$, то

$$z_K = \frac{U_{K\%}}{100} z_n = \frac{U_{K\%}}{100} \frac{U_{н.ф.}}{I_{н.ф.}},$$

где z_n – номинальное сопротивление фазы обмотки трансформатора.

Подставив значение z_K в формулу (2.69), после соответствующих преобразований получим

$$\underline{I}_K^{(1)} = \frac{3 \cdot 100}{2,835 U_K} I_{н.ф.} \quad (2.70)$$

или

$$\underline{I}_K^{(1)} = 23,2 I_{н.ф.}$$

Таким образом, ток однофазного короткого замыкания трансформатора со схемой соединения обмоток Y/Y_n –разомкнутый треугольник превышает в 4–7 раз значение однофазного тока короткого замыкания трансформатора со схемой соединения обмоток Y/Y_n , что обеспечивает надежную работу защиты и находится в пределах трехфазного тока короткого замыкания, безопасно для динамической устойчивости оборудования и не вынуждает завышать мощность трансформатора на 2–3 ступени (как это имеет место в практике).

2.2.3. Экспериментальные исследования симметрирующей способности трансформатора Y/Y_n –разомкнутый треугольник

2.2.3.1. Задачи и методика экспериментальных исследований

В задачи экспериментальных исследований входили следующие вопросы:

1. Экспериментальное определение напряжений с первичной и вторичной сторон трансформатора и тока в нулевом проводе для

схем Y/Y_n и Y/Y_n –разомкнутый треугольник при несимметричной нагрузке фаз.

2. Исследование зависимости фазного напряжения высокой и низкой сторон трансформатора для схем соединения Y/Y_n и Y/Y_n –разомкнутый треугольник от тока нагрузки.

3. Исследование зависимости коэффициентов несимметрии и неуравновешенности от изменения токов нагрузки по фазам.

3. Определение величины смещения нулевой точки и исследование ее зависимости от величины тока нагрузки.

Целью исследования является определение степени симметрирования фазных и линейных напряжений при несимметричной нагрузке фаз путем использования дополнительных компенсирующих витков в схеме трансформатора Y/Y_n . Исходя из этого, исследования искажений напряжений проводились на одном и том же образце трансформатора, изготовленном в лаборатории, путем включения или отключения компенсирующих витков, что дало возможность получить обе схемы. Нужные несимметричные режимы устанавливались величиной тока по фазам для схем Y/Y_n и Y/Y_n –разомкнутый треугольник.

За основу были приняты следующие режимы нагрузки:

1) в одной из фаз ток равнялся номинальному и оставался неизменным, в двух других фазах ток изменялся от нуля до номинального на одну и ту же величину;

2) в двух фазах ток равнялся номинальному и оставался неизменным, в третьей фазе ток изменялся от нуля до номинального значения на одну и ту же величину.

Такое решение дало возможность получить при одном и том же значении тока в нулевом проводе большое число вариантов несимметричных режимов работы схем.

При всех указанных режимах работы с первичной и вторичной сторон трансформатора замерялись величины напряжений для обеих схем соединений обмоток. Полученные результаты сравнивались между собой. Для более полной картины симметрирования подсчитаны коэффициенты несимметрии и неуравновешенности. Проведено исследование влияния на них изменяющегося тока нагрузки. Исследовалось смещение нулевой точки от величины тока в нулевом проводе.

План экспериментальных исследований предусматривал замеры следующих величин:

а) токов во всех трех фазах с первичной и вторичной сторон трансформатора и в нулевом проводе;

б) напряжений линейных и фазных – с первичной и вторичной сторон трансформатора;

в) мощностей – с первичной и вторичной сторон трансформатора.

Схема эксперимента общеизвестна, поэтому ее не приводим.

2.2.3.2. Экспериментальное определение напряжений с первичной и вторичной сторон трансформатора и тока в нулевом проводе для схем Y/Y_n и Y/Y_n –разомкнутый треугольник при несимметричной нагрузке фаз

Измерялись значения напряжений с первичной и вторичной сторон трансформатора и токов в нулевом проводе (табл. П1 и П2). В таблицах напряжения приведены в относительных единицах к номинальному напряжению сети, а значения величин токов – в относительных единицах к номинальному току трансформатора.

Полученные результаты показывают, что на величину тока в нулевом проводе изменение тока в двух фазах при сохранении в третьей фазе номинального влияния оказывается слабое. Следовательно, по величине тока в нулевом проводе оба режима при подобных экспериментах практически равноценны.

При глубокой несимметрии нагрузки фаз искажение фазных напряжений значительно в обоих режимах.

Характерно, что при схеме соединения обмоток трансформатора Y/Y_n происходит резкое искажение фазных напряжений не только с вторичной, но и с первичной стороны.

2.2.3.3. Исследование зависимости фазного напряжения высокой и низкой сторон трансформатора для схем соединения Y/Y_n и Y/Y_n –разомкнутый треугольник от тока нагрузки

Для наглядной оценки зависимости фазных напряжений высокой и низкой сторон трансформатора от тока нагрузки по данным измерений (табл. П1 и П2) построены кривые (рис. 2.3–2.6).

На этих рисунках кривые указанных зависимостей обеих схем совмещены для одинаковых режимов работы.

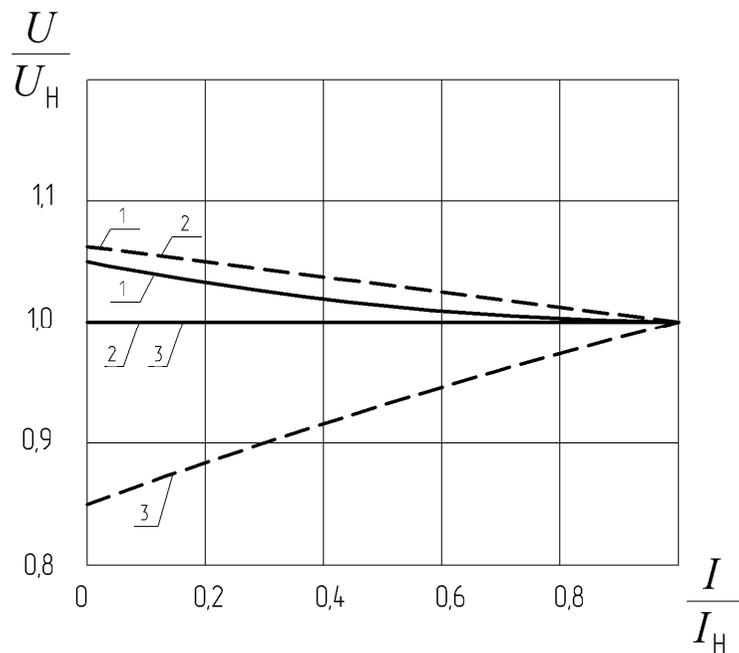


Рис. 2.3. Зависимость фазных напряжений обмотки низшего напряжения трансформатора со схемой соединения Y/Y_n -разомкнутый треугольник и Y/Y_n от тока нагрузки (режим $I_a = I_n \neq 0$; $I_b = I_c = I_n = \text{const}$):

— схема соединения обмоток Y/Y_n -разомкнутый треугольник;
 - - - схема соединения обмоток Y/Y_n ; 1 - фаза a ; 2 - фаза b ; 3 - фаза c

Кривые зависимости фазных напряжений вторичной стороны трансформатора, работающего в режиме $I_a = I_n \neq 0$, $I_b = I_c = I_n = \text{const}$ от тока нагрузки (рис. 2.3), показывают, что при глубокой несимметрии нагрузки (работа трансформатора в неполнофазном режиме, $I_a = 0$) максимальное расхождение между напряжениями для схемы Y/Y_n составляет около 20 %, при схеме соединения обмоток Y/Y_n -разомкнутый треугольник эта величина равна 5,1 %, то есть в 4 раза меньше. При этом отклонение напря-

жений от номинального для схемы Y/Y_n составляет для фаз a , b и c соответственно 4,8 %, 4,8 % и 14,7 %, для схемы соединения обмоток Y/Y_n -разомкнутый треугольник, для этих фаз соответственно, 5,1 %, 0 % и 0 %.

Кривые приведенных зависимостей фазных напряжений первичной стороны трансформатора, работающего при указанном выше режиме (рис. 2.4), показывают, что при глубокой несимметрии нагрузки картина зависимостей напряжений первичной стороны трансформатора аналогична картине с вторичной стороны, описанной ранее.

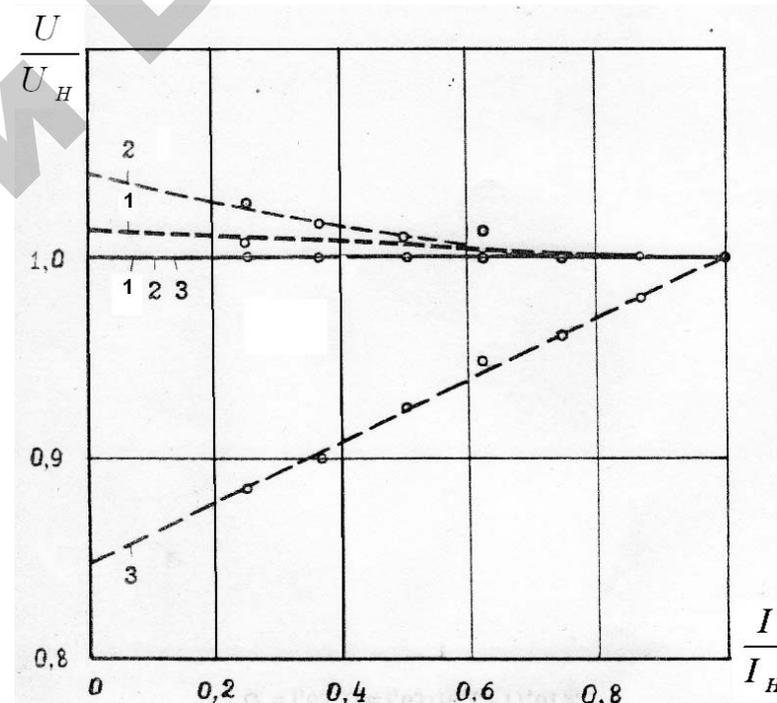


Рис. 2.4. Зависимость фазных напряжений обмотки высшего напряжения трансформатора со схемой соединения обмоток Y/Y_n -разомкнутый треугольник и Y/Y_n от тока нагрузки (режим $I_a = I_n \neq 0$; $I_b = I_c = I_n = \text{const}$):

— схема соединения обмоток Y/Y_n -разомкнутый треугольник;
 - - - схема соединения обмоток Y/Y_n ; 1 - фаза A ; 2 - фаза B ; 3 - фаза C

Максимальное расхождение между фазными напряжениями в этом случае (схема Y/Y_n) составляет около 19 %, при схеме Y/Y_n –разомкнутый треугольник – 0 %. Отклонение напряжений от номинального для схемы Y/Y_n составляет соответственно для фаз A, B, C 1,3 %, 4,0 % и 14,6 %, для схемы Y/Y_n –разомкнутый треугольник – 0 %, 0 % и 0 %.

Характерно, что при схеме соединения обмоток трансформатора Y/Y_n –разомкнутый треугольник напряжение поднимается на разгруженной фазе, в двух других фазах напряжение остается неизменным, то есть искажение фазных напряжений отсутствует. При схеме соединения Y/Y_n при разгрузке фазы a поднимается напряжение не только на фазе a , но и на фазе b , что объясняется смещением нулевой точки в треугольнике линейных напряжений трансформатора. Примерно та же картина имеет место с первичной стороны.

Зависимость фазных напряжений вторичной стороны трансформатора для режима $I_a = I_b = I_n \div 0, I_c = I_n = \text{const}$ (рис. 2.5) свидетельствует о том, что для схемы соединения обмоток трансформатора Y/Y_n , при работе его в неполнофазном режиме ($I_a = I_b = 0, I_c = I_n$), максимальное расхождение между напряжениями (в данном случае, между U_c и U_b) составляет 26,5 %, тогда как для схемы Y/Y_n –разомкнутый треугольник – 5,2 %.

Отклонение фазных напряжений от номинального значения для схемы Y/Y_n составляет соответственно для фаз a, b, c 4,2 %, 19,5 % и 7,0 %. При схеме Y/Y_n –разомкнутый треугольник для того же случая эти отклонения равны 5,2 %, 5,2 % и 0 %, то есть напряжения возросли на разгружаемых фазах, тогда как в нагруженной фазе напряжение сохранилось постоянным.

Таким образом, при схеме соединения обмоток Y/Y_n –разомкнутый треугольник оба рассматриваемых режима показывают практически полное отсутствие искажения фазных напряжений за счет влияния несимметрии нагрузки [133].

Схема соединения обмоток Y/Y_n имеет высокую чувствительность к несимметрии нагрузки фаз. Причем в режиме, когда разгружаются две фазы, искажение напряжений несколько больше.

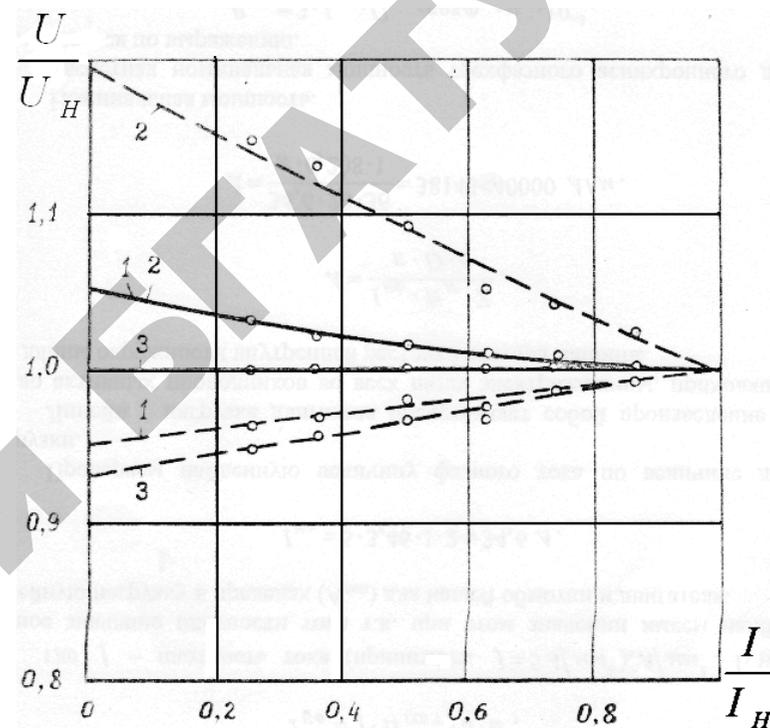


Рис. 2.5. Зависимость фазных напряжений обмотки низшего напряжения трансформатора со схемой соединения обмоток Y/Y_n –разомкнутый треугольник и Y/Y_n от тока нагрузки (режим $I_a = I_b = I_n \div 0; I_c = I_n = \text{const}$):

— схема соединения обмоток Y/Y_n –разомкнутый треугольник;
 - - - схема соединения обмоток Y/Y_n ; 1 – фаза a ; 2 – фаза b ; 3 – фаза c

Кривые зависимости фазных напряжений первичной стороны трансформатора от нагрузки для режимов $I_a = I_b = I_n \div 0, I_c = I_n = \text{const}$ (рис. 2.6) показывают, что при схеме соединения обмоток Y/Y_n расхождение между фазными напряжениями при глубокой несимметрии значительно и в наиболее тяжелом случае ($I_a = I_b = 0, I_c = I_n$) составляет около 20 %, тогда как при схеме Y/Y_n –разомкнутый треугольник – около нуля. Отклонение фазных напряжений от номинального в первом случае значительное, во втором – практически отсутствует.

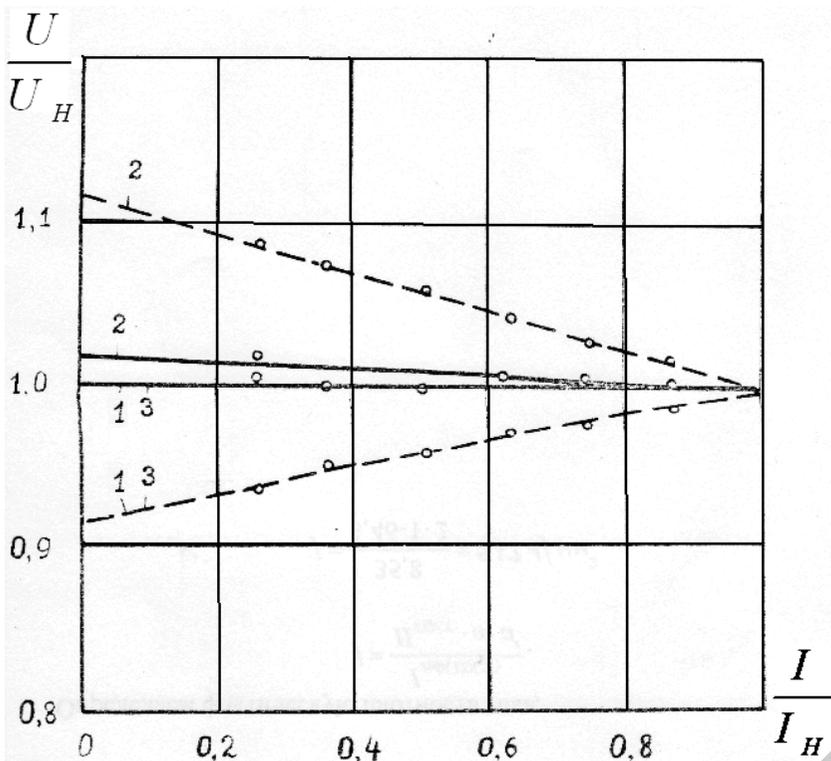


Рис. 2.6. Зависимость фазных напряжений обмотки высшего напряжения трансформатора со схемой соединения обмоток Y/Y_n — разомкнутый треугольник и Y/Y_n от тока нагрузки (режим $I_a = I_b = I_n \div 0$ $I_c = I_n = \text{const}$):
 — — — — — схема соединения обмоток Y/Y_n — разомкнутый треугольник;
 — — — — — схема соединения обмоток Y/Y_n ; 1 — фаза А; 2 — фаза В; 3 — фаза С

Измерение режимов несимметрии нагрузки на напряжение первичной стороны (их расхождения и отклонения от номинального) влияет мало.

2.2.3.4. Исследование зависимости коэффициентов несимметрии напряжений по обратной и нулевой последовательности

Для оценки несимметрии трехфазных электрических величин предложены различные коэффициенты и формулы для их определения [24, 99]. В соответствии с ГОСТ 13109–97 [1] в настоящее время количественная и качественная оценка несимметрии напряжений должна производиться по двум показателям: коэффициенту несимметрии напряжений по обратной последовательности (K_{2U}) и коэффициенту несимметрии напряжений по нулевой последовательности (K_{0U}).

В рассматриваемой работе эти величины определялись по выражениям, приведенным в ГОСТ 13109–97.

По данным расчетов указанных выше коэффициентов в зависимости от токов нагрузки для принятых режимов (табл. ПЗ) для наглядности построены графики (рис. 2.7 и 2.8).

Как видно из кривых, коэффициент несимметрии напряжений по нулевой последовательности в схеме Y/Y_n имеет значительную величину. Коэффициент несимметрии напряжений по обратной последовательности мал. Так, для схемы Y/Y_n при работе трансформатора в неполнофазном режиме ($I_a = I_b = 0$, $I_c = I_n$) с низшей стороны $K_{0U} = 20\%$, $K_{2U} = 0,32\%$. В режиме работы трансформатора, когда $I_a = 0$, $I_b = I_c = I_n$, значение этих коэффициентов несколько ниже: $K_{0U} = 13,7\%$, $K_{2U} = 0,28\%$.

Характерно, что схема соединения обмоток Y/Y_n чрезвычайно чувствительна к несимметрии нагрузок и с высшей стороны. Коэффициент K_{0U} немного ниже в процентном отношении, чем с низшей стороны, и составляет для первого режима работы 14,5%, для второго — 12,0%, что объясняется насыщением бака трансформатора и увеличением рассеяния магнитного потока нулевой последовательности.

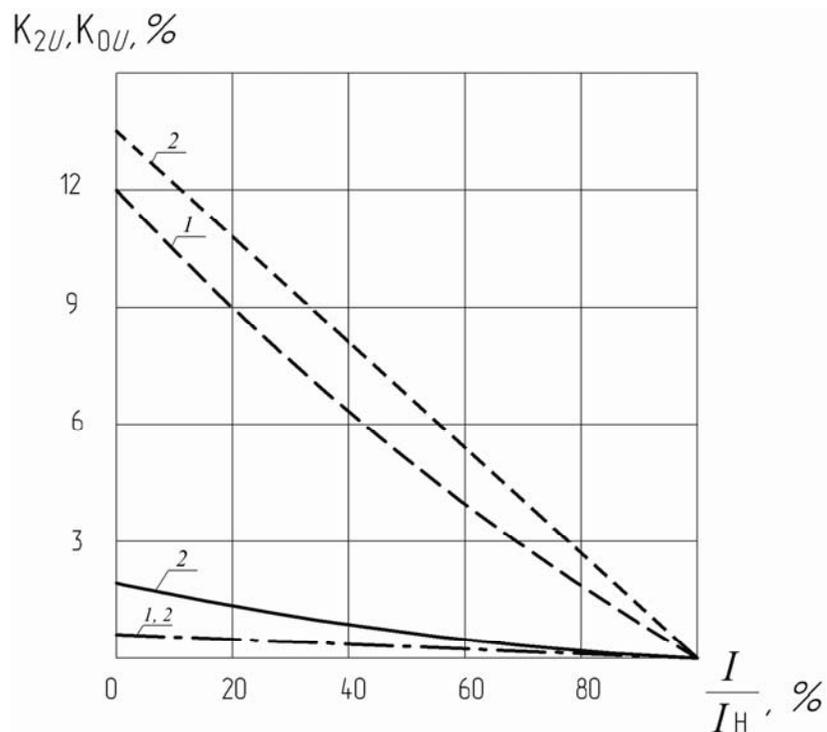


Рис. 2.7. Зависимость коэффициентов несимметрии напряжений по обратной и нулевой последовательности трансформатора со схемой соединения обмоток Y/Y_n –разомкнутый треугольник и Y/Y_n от тока нагрузки (режим $I_a = I_n \div 0, I_b = I_c = I_n = \text{const}$):

- — — — — K_{0U} для схемы соединения обмоток Y/Y_n –разомкнутый треугольник;
 - — — — — K_{0U} для схемы соединения обмоток трансформаторов Y/Y_n ;
 - · - · - · - K_{2U} для схемы соединения обмоток Y/Y_n –разомкнутый треугольник и Y/Y_n ;
- I – высшая сторона; 2 – низшая сторона

Эти коэффициенты для схемы соединения обмоток Y/Y_n –разомкнутый треугольник для обоих режимов с высшей стороны практически равны нулю. Для низшей стороны: кривые имеют тенденцию к подъему, однако процентная величина их незначительна. Так, например, при режиме $I_a = I_b = 0, I_c = I_n$ $K_{0U} = 3,7\%$. Для второго режима, когда $I_a = 0, I_b = I_c = I_n$, $K_{0U} = 1,7\%$.

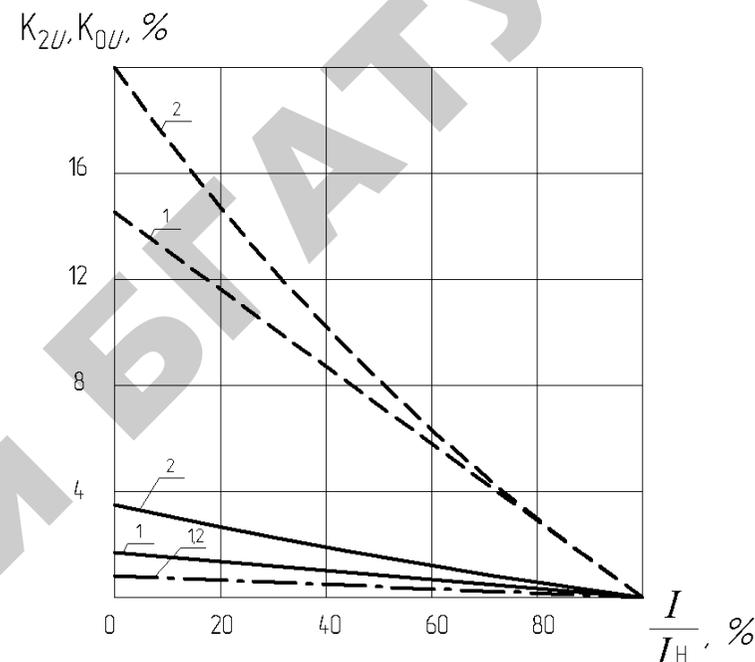


Рис. 2.8. Зависимость коэффициентов несимметрии напряжений по обратной и нулевой последовательности трансформатора со схемой соединения обмоток Y/Y_n –разомкнутый треугольник и Y/Y_n от тока нагрузки (режим $I_a = I_b = I_n \div 0; I_c = I_n = \text{const}$):

- — — — — K_{0U} схема соединения обмоток Y/Y_n –разомкнутый треугольник;
 - — — — — K_{0U} схема соединения обмоток Y/Y_n ;
 - · - · - · - K_{2U} схема соединения обмоток Y/Y_n –разомкнутый треугольник и Y/Y_n ;
- I – высшая сторона; 2 – низшая сторона

Величина коэффициента несимметрии как с высшей, так и с низшей стороны трансформатора практически не изменяется независимо от схемы соединения обмоток трансформаторов и режимов их работ.

Показателем несимметрии фазных напряжений служит также величина смещения нулевой точки в треугольнике линейных напряжений. Определение смещения нулевой точки для обоих режимов и обеих схем проводилось по методике, приведенной в работе [134].

По данным измеренных напряжений в треугольнике линейных напряжений в треугольнике линейных напряжений первичной стороны трансформатора, приведенных к вторичной, определялось положение нулевой точки. Это давало возможность определить величину напряжения нулевой последовательности.

По результатам измерений (табл. П4) построены графики зависимости смещения нулевой точки от тока нагрузки (рис. 2.9 и 2.10).

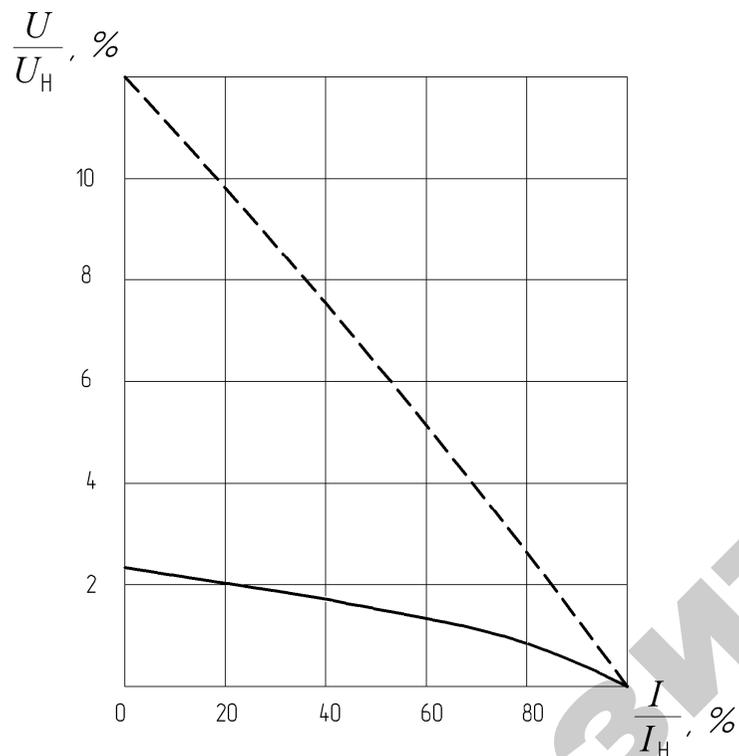


Рис. 2.9. Зависимость величины смещения нулевой точки трансформатора со схемой соединения обмоток Y/Y_n–разомкнутый треугольник и Y/Y_n от тока нагрузки (режим $I_a = I_b = 0; I_c = I_n = \text{const}$):

————— – схема соединения обмоток Y/Y_n–разомкнутый треугольник;
 - - - - - – схема соединения обмоток Y/Y_n

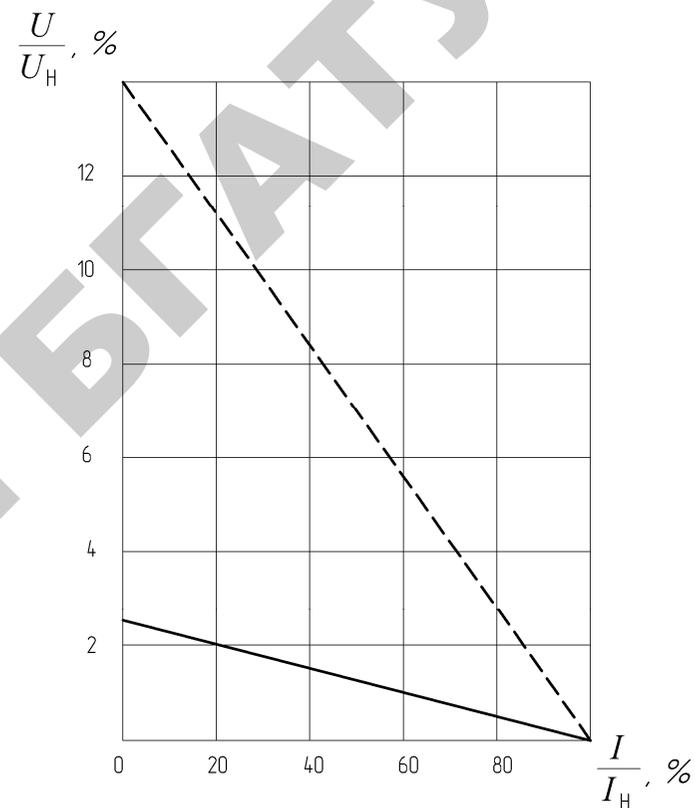


Рис. 2.10. Зависимость величины смещения нулевой точки трансформатора со схемой соединения обмоток Y/Y_n–разомкнутый треугольник и Y/Y_n от тока нагрузки (режим $I_a = I_b = I_n \div 0; I_c = I_n = \text{const}$):

————— – схема соединения обмоток Y/Y_n–разомкнутый треугольник;
 - - - - - – схема соединения обмоток Y/Y_n

Смещение нулевой точки и для трансформаторов со схемой соединения Y/Y_n, как и следовало ожидать, значительно большее, чем для схемы Y/Y_n–разомкнутый треугольник. Так, например, при глубокой несимметрии в режиме работы трансформатора, когда $I_a = I_b = 0, I_c = I_n$, при схеме Y/Y_n смещение нулевой точки 13,8 %, а для схемы Y/Y_n–разомкнутый треугольник – 2,45 %.

2.2.3.5. Исследование сопротивления нулевой последовательности трансформатора

Искажение фазных и линейных напряжений зависит, главным образом, от величины неуравновешенных потоков нулевой последовательности трансформатора.

Схема соединения сопротивлений обмоток трансформатора Y/Y_n -разомкнутый треугольник имеет следующий вид (рис. 2.11).

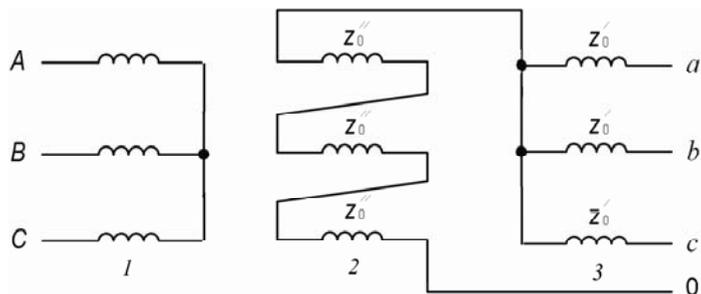


Рис. 2.11. Схема соединения сопротивлений нулевой последовательности трансформатора Y/Y_n -разомкнутый треугольник:
1 – обмотка высшего напряжения; 2 – компенсирующие витки;
3 – обмотка низшего напряжения

Для определения сопротивления нулевой последовательности приведенного трансформатора выводы обмоток низшего напряжения a, b, c закорачиваются. К ним и свободному концу компенсирующих витков подводится напряжение.

В этом случае общее сопротивление нулевой последовательности $Z_0^{(3)}$ будет равно

$$Z_0^{(3)} = \frac{Z_0'}{3} + 3Z_0'' = \frac{Z_0' + 9Z_0''}{3} \quad (2.71)$$

или

$$3Z_0^{(3)} = Z_0' + 9Z_0'', \quad (2.72)$$

где $Z_0^{(3)}$ – общее сопротивление нулевой последовательности обмоток трансформатора, Ом;

Z_0' – полное сопротивление нулевой последовательности вторичной обмотки трансформатора, Ом;

Z_0'' – полное сопротивление нулевой последовательности компенсирующих витков, Ом.

Катушки обмоток низшего напряжения трансформатора (рис. 2.11) соединены параллельно. Последовательно им включены компенсирующие витки, которые расположены на всех трех стержнях и соединены в разомкнутый треугольник.

Теперь для определения сопротивления нулевой последовательности обмотки трансформатора преобразуем данную схему в эквивалентную ей (рис. 2.12).

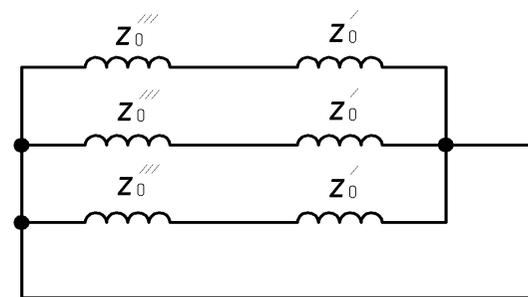


Рис. 2.12. Эквивалентная схема соединения сопротивлений нулевой последовательности обмоток трансформатора Y/Y_n -разомкнутый треугольник

В этой схеме фактические полные сопротивления нулевой последовательности (Z_0'') заменены эквивалентными сопротивлениями (Z_0'''), которые включены последовательно полным сопротивлениям нулевой последовательности обмотки низшего напряжения (Z_0').

Так как общее сопротивление нулевой последовательности от этой замены не изменится, а останется величиной постоянной, то в этом случае общее сопротивление нулевой последовательности, определенное по эквивалентной схеме (рис. 2.12), будет равно

$$\frac{1}{Z_0^{(3)}} = \frac{1}{Z_0' + Z_0'''} + \frac{1}{Z_0' + Z_0'''} + \frac{1}{Z_0' + Z_0'''} = \frac{3}{Z_0' + Z_0'''}$$

где Z_0''' – эквивалентное сопротивление нулевой последовательности компенсирующих витков, Ом:

$$\text{или } Z_0^{(3)} = \frac{Z_0' + Z_0'''}{3}. \quad (2.73)$$

$$\text{Отсюда } 3Z_0^{(3)} = Z_0' + Z_0'''. \quad (2.74)$$

Из выражений (2.72) и (2.74) имеем

$$Z_0' + 9Z_0'' = Z_0' + Z_0'''. \quad (2.75)$$

Произведя сокращение, получим

$$Z_0''' = 9Z_0''. \quad (2.75)$$

Из равенства (2.75) следует, что эквивалентное сопротивление нулевой последовательности равно девятикратному значению действительного сопротивления той же последовательности компенсирующих витков.

Согласно схеме (рис. 2.10) сопротивление нулевой последовательности будет равно

$$Z_0 = Z_0' + Z_0'''. \quad (2.76)$$

Или, с учетом выражения (2.75):

$$Z_0 = Z_0' + 9Z_0''. \quad (2.77)$$

Соответственно, активное и индуктивное сопротивление нулевой последовательности будут равны

$$r_0 = r_0' + 9r_0'', \quad (2.78)$$

$$X_0 = \sqrt{Z_0^2 - r_0^2}. \quad (2.79)$$

Таким образом, для определения сопротивления нулевой последовательности трансформатора со схемой соединения обмоток Y/Y_n –разомкнутый треугольник необходимо пользоваться формулами (2.77)–(2.79).

Теоретические выводы были проверены экспериментальным путем. Нами было определено сопротивление нулевой последовательности трансформатора со схемой соединения обмоток Y/Y_n –разомкнутый треугольник при ненасыщенном сердечнике. Опыт проводился по схеме (рис. 2.13), результаты измерений и вычислений приведены в табл. 2.1.

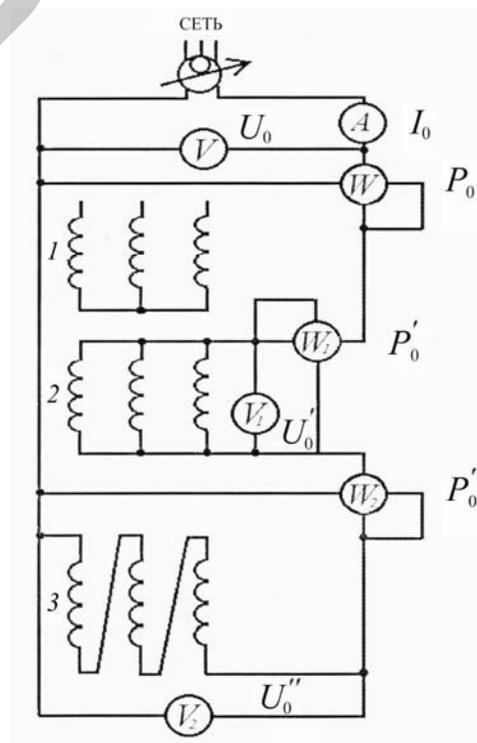


Рис. 2.13. Схема опытного определения сопротивлений нулевой последовательности трансформатора со схемой соединения обмоток Y/Y_n –разомкнутый треугольник:
1 – обмотка высшего напряжения; 2 – обмотка низшего напряжения; 3 – компенсирующие витки

Таблица 2.1

Результаты определения сопротивления
нулевой последовательности трансформатора

Параметры	№ опыта		
	1	2	3
Данные измерений			
U_0 , В	1,6	2,4	3,2
U'_0 , В	0,62	0,95	1,26
U''_0 , В	0,98	1,45	1,94
I_0 , А	2,0	3,0	4,0
P_0 , Вт	3,0	6,9	12,7
P'_0 , Вт	1,0	2,1	4,0
P''_0 , Вт	2,0	4,8	8,7
Данные вычислений			
$r_0^{(3)}$, Ом	0,250	0,233	0,250
r'_0 , Ом	0,750	0,699	0,750
$r_0''^{(3)}$, Ом	0,500	0,533	0,543
r_0'' , Ом	0,166	0,177	0,181
$r_0^{(3)}$, Ом	0,750	0,766	0,794
r_0 , Ом	2,244	2,292	2,379
r_{0cp} , Ом	2,305		
x_0 , Ом	0,843	0,712	0,337
x_{0cp} , Ом	0,631		
$Z_0^{(3)}$, Ом	0,310	0,317	0,315
Z'_0 , Ом	0,930	0,951	0,945
$Z_0''^{(3)}$, Ом	0,490	0,483	0,485
Z_0'' , Ом	0,163	0,161	0,162
$Z_0^{(3)}$, Ом	0,800	0,800	0,800

Окончание табл. 2.1

Параметры	№ опыта		
	1	2	3
Z_0 , Ом	2,397	2,400	2,403
Z_{0cp} , Ом	2,4		
r_0 , %	6,98	7,13	7,40
x_0 , %	2,62	2,21	1,05
Z_0 , %	7,45	7,46	7,45
r_{0cp} , %	7,17		
x_{0cp} , %	1,96		
Z_{0cp} , %	7,45		

Вычисления результатов (табл. 2.1) произведены по формулам:
а) активные сопротивления нулевой последовательности:

$$r_0^{(3)} = \frac{P'_0}{I_0^2}; r_0^{(3)} = \frac{P''_0}{I_0^2}; r_0^{(3)} = \frac{P_0}{I_0^2};$$

$$r'_0 = \frac{3P'_0}{I_0^2} = 3r_0^{(3)};$$

$$r_0'' = \frac{P''_0}{3I_0^2} = \frac{r_0''^{(3)}}{3};$$

$$r_0 = r'_0 + 9r_0'';$$

б) полные сопротивления нулевой последовательности:

$$Z_0^{(3)} = \frac{U'_0}{I_0};$$

$$Z_0' = \frac{3U_0'}{I_0} = 3Z_0^{(3)};$$

$$Z_0^{(3)} = \frac{U_0''}{I_0};$$

$$Z_0'' = \frac{U_0''}{3I_0} = \frac{Z_0^{(3)}}{3};$$

$$Z_0^{(3)} = \frac{U_0}{I_0}; Z_0 = Z_0' + 9Z_0'';$$

$$Z_{0cp} = \frac{Z_{01} + Z_{02} + Z_{03}}{3};$$

в) индуктивное сопротивление нулевой последовательности:

$$x_0 = \sqrt{Z_0^2 - r_0^2}.$$

Значения сопротивлений Z_0, r_0, x_0 в процентах подсчитаны по формулам:

$$Z_{0\%} = \frac{Z_0 I_{н.ф.}}{U_{н.ф.}} \cdot 100;$$

$$r_{0\%} = \frac{r_0 I_{н.ф.}}{U_{н.ф.}} \cdot 100;$$

$$x_{0\%} = \frac{x_0 I_{н.ф.}}{U_{н.ф.}} \cdot 100,$$

где $I_{н.ф.}, U_{н.ф.}$ – номинальный ток и напряжение обмотки, в которой производилось измерение.

Опытным путем была проверена возможность пользоваться формулой (2.77) при определении Z_0' и Z_0'' отдельно по известным схемам [112, 134].

Результаты измерений и вычислений приведены в табл. 2.2 и 2.3.

Таблица 2.2

Результаты измерений и вычислений сопротивления z_0'

№ опыта	$U_0, В$	$I_0, А$	$P_0, Вт$	$r_0', Ом$	$x_0', Ом$	$Z_0', Ом$	$Z_{0cp}', Ом$
1	8,2	2	8,75	6,56	10,40	12,30	12,773
2	12,9	3	18,75	6,25	11,28	12,90	
3	17,5	4	32,5	6,09	11,62	13,12	

Таблица 2.3

Результаты измерений и вычислений сопротивления z_0''

№ опыта	$U_0, В$	$I_0, А$	$P_0, Вт$	$r_0'', Ом$	$x_0'', Ом$	$Z_0'', Ом$	$Z_{0cp}'', Ом$
1	8,25	2	10,00	0,833	1,094	1,375	1,431
2	13,00	3	20,25	0,750	1,234	1,444	
3	17,70	4	36,25	0,755	1,267	1,475	

Значения сопротивлений (табл. 2.2 и 2.3) подсчитаны по общеизвестным формулам. Подставив значение Z_0' и Z_0'' в формулу (2.77), получим

- 1) $Z_{01} = 12,3 + 9 \cdot 1,375 = 12,3 + 12,375 = 24,675;$
- 2) $Z_{02} = 12,9 + 9 \cdot 1,444 = 12,9 + 12,99 = 25,89;$
- 3) $Z_{03} = 13,12 + 9 \cdot 1,475 = 13,12 + 13,27 = 26,39$

(2.80)

или

$$Z_{\text{оср}} = \frac{24,675 + 25,89 + 26,39}{3} = 25,977 \text{ Ом.}$$

Действительное сопротивление нулевой последовательности равно 2,4 Ом.

Отсюда следует, что определение нулевой последовательности раздельно для каждой обмотки по формуле (2.7) приводит к небольшой ошибке.

Одновременно с определением сопротивления нулевой последовательности исследуемого трансформатора по разработанной нами методике была проверена возможность использования для этой цели общеизвестной методики [134, 135]. Оказалось, что сопротивление нулевой последовательности трансформатора Y/Y_n -разомкнутый треугольник при ненасыщенном сердечнике можно также определять с достаточной степенью точности по известной формуле

$$Z_0 = \frac{3U_0}{I_0}, \quad (2.81)$$

пользуясь при этом схемой (рис. 2.13).

Таким образом, сопротивление нулевой последовательности компенсирующих витков практически равно сопротивлению вторичной обмотки трансформатора. Отличие между ними не превышает 0,075–0,150 Ом, что составляет 0,60–1,14 %. Величина этой погрешности зависит от правильного расчета числа компенсирующих витков и их укладки и при абсолютно точном выполнении этих условий она близка к нулю. Так как дополнительные витки включены встречно виткам обмотки низшего напряжения, то выполняется условие компенсации потоков нулевой последовательности.

Сопротивление нулевой последовательности трансформатора со схемой соединения обмоток Y/Y_n -разомкнутый треугольник можно определять по формулам (2.77), (2.78), (2.79) или (2.81), пользуясь схемой (рис. 2.13) [136]. Определение сопротивления нулевой последовательности по формуле (2.77) при раздельном определении Z'_0 и Z''_0 приводит к большой ошибке.

Так как в формуле (2.77) $Z'_0 \approx 9Z''_0$, $r_0 \approx z_0$ и x_0 сравнительно мало, то это еще раз говорит о компенсирующей способности трансформатора со схемой Y/Y_n -разомкнутый треугольник.

2.3. Трансформатор со схемой соединения обмоток «звезда–звезда–нуль с симметрирующим устройством» (Y/Y_n СУ)

2.3.1. Условия анализа несимметричной работы трансформатора

Анализ симметрирующей способности трансформатора Y/Y_n СУ и методика исследований такие же, как и трансформатора со схемой соединения обмоток Y/Y_n -разомкнутый треугольник.

Задачи исследования:

- 1) исследование зависимости фазных напряжений трансформаторов от тока в нулевом проводе;
- 2) исследование зависимости коэффициентов несимметрии напряжений по обратной и нулевой последовательности от изменения токов нагрузки по фазам;
- 3) исследование сопротивления нулевой последовательности трансформатора;
- 4) расчет и исследование потерь энергии в трансформаторах при неравномерной нагрузке фаз.

Исследования проводились методом сравнения параметров для различных схем соединения обмоток при одинаковых условиях загрузки трансформаторов и следующих режимах:

- 1) в одной из фаз ток менялся от нуля до номинального фазного тока, в двух других оставался неизменным и равным номинальному;
- 2) в двух фазах ток изменялся от нуля до номинального, в третьей фазе ток оставался неизменным и равным номинальному.

Такое решение дало возможность получить наибольшее число вариантов несимметричных режимов работы трансформаторов.

Для сравнения исследований были взяты трансформаторы типа ТСЗ-2,5/0,38 со схемами соединения обмоток Y/Y_n , Y/Z_n ,

Y/Y_n –разомкнутый треугольник, Y/Y_n СУ. Данные трансформаторы были изготовлены на предприятии «Белэнергоремналадка» (г. Минск) на базе серийных.

2.3.2. Общий случай несимметрии

Соотношение токов и напряжений. Работа трансформатора в несимметричном режиме представлена на схеме (рис. 2.14).

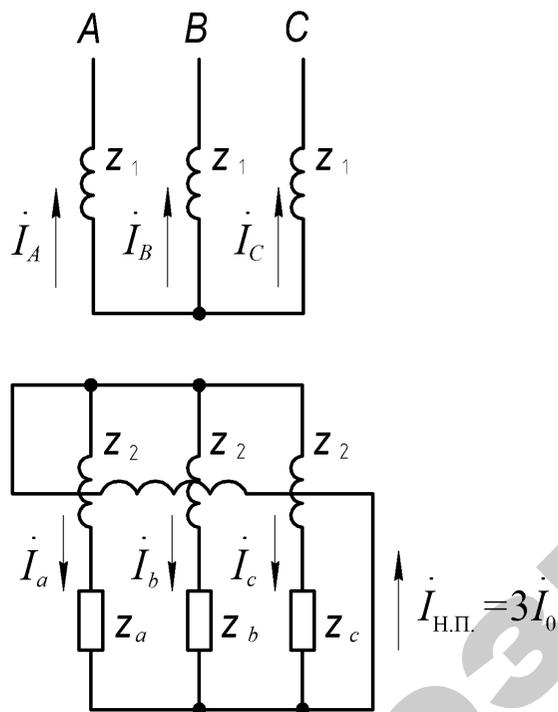


Рис. 2.14. Схема несимметричной работы трансформатора Y/Y_n СУ

Обмотка симметрирующего устройства (СУ) рассматриваемого трансформатора намотана поверх обмоток высшего напряжения и охватывает все три стержня. Она включена встречно обмоткам

нижнего напряжения. По ней протекает только ток нулевого провода, равный утроенной величине тока нулевой последовательности. Этот ток создает встречный компенсирующий магнитный поток нулевой последовательности, создаваемый обмотками низшего напряжения трансформатора. При равенстве потоков от обмотки СУ и обмоток низшего напряжения будет иметь место полная компенсация потоков нулевой последовательности:

$$\Phi_{0a} + \Phi_{0b} + \Phi_{0c} + \Phi_{0\text{СУ}} e^{j180} = 0,$$

где $\Phi_{0(a,b,c)}$ – магнитный поток нулевой последовательности в стержнях магнитопровода трансформатора от фазных обмоток низшего напряжения;

$\Phi_{0\text{СУ}}$ – магнитный поток нулевой последовательности от обмотки симметрирующего устройства.

Так как обмотка высшего напряжения соединена в «звезду» и не имеет нулевого провода, то по ней протекают только токи прямой и обратной последовательности. Токи нулевой последовательности в этой обмотке отсутствуют. В этом случае будут справедливы выражения (2.1) и (2.2), как и для трансформатора Y/Y_n –разомкнутый треугольник.

Вторичные токи трансформатора содержат составляющие всех последовательностей. Поэтому справедливо выражение (2.4).

Система токов нулевой последовательности не может трансформироваться в первичной обмотке трансформатора. Трансформируются только токи прямой и обратной последовательности. Поэтому справедливо выражение (2.6). С учетом равенства (2.2), будут также справедливы и выражения (2.7) и (2.8).

Обмотки высшего и низшего напряжения трансформатора будут содержать составляющие напряжения всех последовательностей. Поэтому для трансформатора со схемой соединения обмоток Y/Y_n СУ справедливы выражения (2.3) и (2.5), как и для трансформатора Y/Y_n –разомкнутый треугольник.

Схема замещения. На основании второго закона Кирхгофа для обмотки высшего напряжения трансформатора Y/Y_n СУ (рис. 1.3) напряжение фазы A равно

$$\underline{U}_A = -\underline{E}_a + \underline{I}_A Z_1, \quad (2.82)$$

где \underline{E}_a – ЭДС фазы a , создаваемая основным потоком трансформатора;
 \underline{I}_A – ток фазы A ;
 Z_1 – эквивалентное сопротивление обмотки высшего напряжения трансформатора.

Фазное напряжение обмотки низшего напряжения с учетом действия компенсирующей обмотки для фазы

$$\underline{U}_a = -\underline{E}_a + \underline{I}_a Z_2 - \underline{I}_{aCY0} Z_{CY}, \quad (2.83)$$

где Z_2 – эквивалентное сопротивление обмотки низшего напряжения;
 Z_{CY} – эквивалентное сопротивление симметрирующей обмотки;
 \underline{I}_{aCY0} – ток нулевой последовательности, протекающий по виткам симметрирующей обмотки от фазы a .

Эквивалентные сопротивления обмоток высшего, низшего напряжения и компенсирующих витков симметрирующего устройства определяются по формуле (2.11) с учетом соответствующих индексов обмоток данного трансформатора.

Обе части уравнений (2.82) и (2.83) разложим на симметричные составляющие.

Получим

$$\underline{U}_A = \underline{U}_{A1} + \underline{U}_{A2} + \underline{U}_{A0} = -\underline{E}_{a1} - \underline{E}_{a2} - \underline{E}_{a0} + \underline{I}_{A1} Z_1 + \underline{I}_{A2} Z_1, \quad (2.84)$$

$$\begin{aligned} \underline{U}_a &= \underline{U}_{a1} + \underline{U}_{a2} + \underline{U}_{a0} = \\ &= -\underline{E}_{a1} - \underline{E}_{a2} - \underline{E}_{a0} + \underline{I}_{a1} Z_2 + \underline{I}_{a2} Z_2 + \underline{I}_{a0} Z_2 - \underline{I}_{aCY0} Z_{CY}, \end{aligned} \quad (2.85)$$

где \underline{E}_{a1} , \underline{E}_{a2} , \underline{E}_{a0} – ЭДС фазы a , соответственно, прямой, обратной и нулевой последовательности;

\underline{I}_{a1} , \underline{I}_{a2} , \underline{I}_{a0} – токи прямой, обратной и нулевой последовательности, протекающие по обмотке низшего напряжения фазы a .

Из выражения (2.84) следует:

$$\underline{U}'_A = -\underline{E}'_a + \underline{I}'_A Z_1; \quad (2.86)$$

$$\underline{U}_{A0} = -\underline{E}_{a0}, \quad (2.87)$$

где $\underline{E}'_a = \underline{E}_{a1} + \underline{E}_{a2}$ – сумма ЭДС прямой и обратной последовательности обмотки низшего напряжения фазы a .

Аналогично из уравнения (2.85) следует:

$$\underline{U}'_{a2} = -\underline{E}'_a + \underline{I}'_{a2} Z_2, \quad (2.88)$$

где $\underline{U}'_{a2} = \underline{U}_{a1} + \underline{U}_{a2}$ – сумма фазных напряжений прямой и обратной последовательности обмотки низшего напряжения трансформатора фазы a ;

$$\underline{U}_{a0} = -\underline{E}_{a0} + \underline{I}_{a20} Z_2 - \underline{I}_{aCY0} Z_{CY}, \quad (2.89)$$

где \underline{I}_{a20} – ток нулевой последовательности, протекающий по обмотке фазы a .

Напряжение нулевой последовательности обмотки низшего напряжения трансформатора с учетом действия компенсирующих витков представим следующим образом:

$$\underline{U}_{a0} = \underline{U}_{a20} - \underline{U}_{aCY0},$$

где \underline{U}_{a20} – напряжение нулевой последовательности обмотки низшего напряжения фазы a без учета действия симметрирующей обмотки;

\underline{U}_{aCY0} – напряжение нулевой последовательности симметрирующей обмотки фазы a без учета влияния обмотки высшего напряжения.

Теперь уравнение (2.89) будет иметь следующий вид:

$$\underline{U}_{a20} - \underline{U}_{aCY0} = -\underline{E}_{a0} + \underline{I}_{a20}Z_2 - \underline{I}_{aCY0}Z_{CY}. \quad (2.90)$$

Преобразуя последнее выражение, получим

$$-\underline{E}_{a0} = -\underline{I}_{a20}Z_2 + \underline{U}_{a20} + \underline{I}_{aCY0}Z_{CY} - \underline{U}_{aCY0}. \quad (2.91)$$

На основании уравнений (2.86) и (2.88) построена схема замещения трансформатора со схемой соединения обмоток Y/Y_nCY для токов прямой и обратной последовательности (рис. 2.15, а), на основании уравнений (2.87) и (2.91) – для токов нулевой последовательности (рис. 2.15, б) [137].

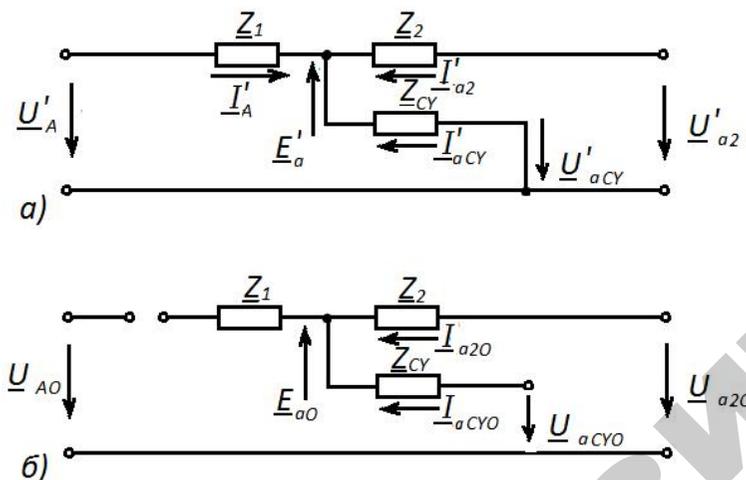


Рис. 2.15. Схемы замещения трансформатора Y/Y_nCY :
а – для токов прямой и обратной последовательности;
б – для токов нулевой последовательности

Фазные напряжения вторичной цепи трансформатора. Имея схемы замещения трансформатора Y/Y_nCY для токов прямой, обратной и нулевой последовательности, рассмотрим влияние симметрирующего устройства на фазные напряжения вторичной стороны трансформатора.

Для напряжений прямой и обратной последовательности обмоток высшего и низшего напряжения трансформатора фазы A , без учета действия симметрирующей обмотки, на основании схемы замещения (см. рис. 2.15, а) справедливо выражение

$$\underline{U}'_A - \underline{I}'_A Z_1 + \underline{I}'_{a2} Z_2 = \underline{U}'_{a2}. \quad (2.92)$$

Первичные и вторичные напряжения прямой и обратной последовательности обмотки высшего напряжения и симметрирующей обмотки (см. рис. 2.15, а) связаны следующим уравнением:

$$\underline{U}'_A - \underline{I}'_A Z_1 + \underline{I}'_{aCY} Z_{CY} = \underline{U}'_{aCY}, \quad (2.93)$$

где \underline{I}'_{aCY} – суммарный ток прямой и обратной последовательности фазы a , протекающий в витках симметрирующей обмотки;
 \underline{U}'_{aCY} – суммарное фазное напряжение прямой и обратной последовательности симметрирующей обмотки фазы a .

Так как по симметрирующей обмотке протекает только ток нулевой последовательности, то $\underline{I}'_{aCY} = 0$ и $\underline{U}'_{aCY} = 0$.

Принимая во внимание выражение (2.7) и то, что $Z_1 + Z_2 = Z_K$, уравнение (2.92) запишем в следующем виде:

$$\underline{U}'_A - \underline{I}'_A Z_K = \underline{U}'_{a2}. \quad (2.94)$$

Аналогично для фаз B и C :

$$\underline{U}'_B - \underline{I}'_B Z_K = \underline{U}'_{b2}; \quad (2.95)$$

$$\underline{U}'_C - \underline{I}'_C Z_K = \underline{U}'_{c2}, \quad (2.96)$$

где \underline{U}'_{b2} , \underline{U}'_{c2} – сумма фазных напряжений прямой и обратной последовательности обмоток низшего напряжения трансформатора соответственно фаз b и c .

На основании схемы замещения (см. рис. 2.15, б) запишем следующие выражения:

– для обмоток трансформатора без учета действия симметрирующей обмотки

$$\underline{U}_{A0} + \underline{I}_{a20} Z_2 = \underline{U}_{a20}; \quad (2.97)$$

– для обмотки высшего напряжения и симметрирующей обмотки

$$\underline{U}_{A0} + \underline{I}_{aCY0} Z_{CY} = \underline{U}_{aCY0}. \quad (2.98)$$

Аналогично уравнениям (2.97) и (2.98) имеем для фазы *B*:

$$\underline{U}_{B0} + \underline{I}_{b20} Z_2 = \underline{U}_{b20}; \quad (2.99)$$

$$\underline{U}_{B0} + \underline{I}_{bCY0} Z_{CY} = \underline{U}_{bCY0}, \quad (2.100)$$

для фазы *C*:

$$\underline{U}_{C0} + \underline{I}_{c20} Z_2 = \underline{U}_{c20}; \quad (2.101)$$

$$\underline{U}_{C0} + \underline{I}_{cCY0} Z_{CY} = \underline{U}_{cCY0}, \quad (2.102)$$

где $\underline{U}_{b20}, \underline{U}_{c20}$ – напряжение нулевой последовательности обмотки низшего напряжения без учета действия компенсирующих витков соответственно фаз *b* и *c*;

$\underline{U}_{bCY0}, \underline{U}_{cCY0}$ – напряжение нулевой последовательности симметрирующей обмотки без учета влияния обмотки высшего напряжения соответственно фаз *b* и *c*;

$\underline{I}_{bCY0}, \underline{I}_{cCY0}$ – ток нулевой последовательности, протекающий по виткам симметрирующей обмотки соответственно от фаз *b* и *c*.

Из формулы (2.97) следует, что напряжение нулевой последовательности трансформатора фазы *a*

$$\underline{U}_0 = \underline{U}_{A0} - \underline{U}_{a20} = -\underline{I}_{a20} Z_2$$

или

$$\underline{U}_0 = -\underline{I}_{a20} Z_2.$$

Обозначим ток нулевой последовательности каждой из фаз следующим образом:

$$\underline{I}_{a20} = \underline{I}_{b20} = \underline{I}_{c20} = \underline{I}_0.$$

Тогда $\underline{U}_0 = -\underline{I}_0 Z_2$.

Суммарный ток нулевой последовательности обмоток низшего напряжения протекает по обмотке симметрирующего устройства:

$$\underline{I}_{a20} + \underline{I}_{b20} + \underline{I}_{c20} = 3\underline{I}_0.$$

Он создает в этой обмотке напряжение нулевой последовательности

$$\underline{U}_{CY0} = -3\underline{I}_0 Z_{CY}.$$

Для того чтобы симметричная составляющая нулевой последовательности фазного напряжения вторичной обмотки трансформатора была компенсирована обмоткой симметрирующего устройства, необходимо выполнить условие:

$$\underline{U}_0 = \underline{U}_{\text{CV}0}$$

или

$$\underline{I}_0 Z_2 = 3\underline{I}_0 z_{\text{CV}}.$$

Отсюда условием полной компенсации будет

$$z_{\text{CV}} = \frac{z_2}{3}. \quad (2.103)$$

Таким образом, из формулы (2.103) следует: для компенсации напряжения нулевой последовательности обмотки низшего напряжения необходимо, чтобы сопротивление витков симметрирующего устройства было втрое меньше сопротивления одной из фаз обмотки низшего напряжения.

Сложив выражения (2.94) и (2.97), (2.95) и (2.99), (2.96) и (2.101), получим фазные напряжения вторичной обмотки трансформатора без учета действия симметрирующего устройства:

$$\left. \begin{aligned} \underline{U}'_A + \underline{U}_{A0} - \underline{I}_A Z_K + \underline{I}_0 Z_2 &= \underline{U}'_{a2} + \underline{U}_{a20}; \\ \underline{U}'_B + \underline{U}_{B0} - \underline{I}_B Z_K + \underline{I}_0 Z_2 &= \underline{U}'_{b2} + \underline{U}_{b20}; \\ \underline{U}'_C + \underline{U}_{C0} - \underline{I}_C Z_K + \underline{I}_0 Z_2 &= \underline{U}'_{c2} + \underline{U}_{c20}. \end{aligned} \right\} \quad (2.104)$$

Учитывая уравнения (2.3) и (2.5), получим:

$$\left. \begin{aligned} \underline{U}_A - \underline{I}_A Z_K + \underline{I}_0 Z_2 &= \underline{U}_{a2}; \\ \underline{U}_B - \underline{I}_B Z_K + \underline{I}_0 Z_2 &= \underline{U}_{b2}; \\ \underline{U}_C - \underline{I}_C Z_K + \underline{I}_0 Z_2 &= \underline{U}_{c2}. \end{aligned} \right\} \quad (2.105)$$

где $\underline{U}_{a2}, \underline{U}_{b2}, \underline{U}_{c2}$ – фазные напряжения вторичной обмотки трансформатора без учета действия компенсирующих витков.

Вычтя из правой и левой частей (2.105) одну и ту же величину $\underline{U}_{\text{CV}0} = -3\underline{I}_0 Z_{\text{CV}}$, получим фазные напряжения вторичной обмотки трансформатора с учетом действия компенсирующих витков:

$$\left. \begin{aligned} \underline{U}_{a2} - \underline{U}_{\text{CV}0} &= -\underline{U}_A + \underline{I}_A Z_K - \underline{I}_0 Z_2 + 3\underline{I}_0 Z_{\text{CV}} = \underline{U}_a; \\ \underline{U}_{b2} - \underline{U}_{\text{CV}0} &= -\underline{U}_B + \underline{I}_B Z_K - \underline{I}_0 Z_2 + 3\underline{I}_0 Z_{\text{CV}} = \underline{U}_b; \\ \underline{U}_{c2} - \underline{U}_{\text{CV}0} &= -\underline{U}_C + \underline{I}_C Z_K - \underline{I}_0 Z_2 + 3\underline{I}_0 Z_{\text{CV}} = \underline{U}_c. \end{aligned} \right\} \quad (2.106)$$

где $\underline{U}_a, \underline{U}_b, \underline{U}_c$ – фазные напряжения вторичной обмотки трансформатора с учетом компенсирующего воздействия витков симметрирующего устройства.

Вынесем \underline{I}_0 за скобку и получим уравнения (2.106) в следующем виде:

$$\left. \begin{aligned} \underline{U}_a &= -\underline{U}_A + \underline{I}_A Z_K - \underline{I}_0 (Z_2 - 3Z_{\text{CV}}); \\ \underline{U}_b &= -\underline{U}_B + \underline{I}_B Z_K - \underline{I}_0 (Z_2 - 3Z_{\text{CV}}); \\ \underline{U}_c &= -\underline{U}_C + \underline{I}_C Z_K - \underline{I}_0 (Z_2 - 3Z_{\text{CV}}). \end{aligned} \right\} \quad (2.107)$$

В уравнениях (2.107) обозначим $Z_2 - 3Z_{\text{CV}} = Z_0$. Тогда фазные напряжения вторичной обмотки трансформатора с учетом действия обмотки симметрирующего устройства будут равны:

$$\left. \begin{aligned} \underline{U}_a &= -\underline{U}_A + \underline{I}_A Z_K - \underline{I}_0 Z_0; \\ \underline{U}_b &= -\underline{U}_B + \underline{I}_B Z_K - \underline{I}_0 Z_0; \\ \underline{U}_c &= -\underline{U}_C + \underline{I}_C Z_K - \underline{I}_0 Z_0. \end{aligned} \right\} \quad (2.108)$$

где Z_0 – полное сопротивление нулевой последовательности рассматриваемого трансформатора.

Выполняя условие полной компенсации (2.103) и пренебрегая активной составляющей сопротивления нулевой последовательности ввиду его незначительной величины, можно считать $Z_0 = 0$.

В этом случае уравнения (2.108) примут вид:

$$\left. \begin{aligned} \underline{U}_a &= -\underline{U}_A + \underline{I}_A Z_K \\ \underline{U}_b &= -\underline{U}_B + \underline{I}_B Z_K \\ \underline{U}_c &= -\underline{U}_C + \underline{I}_C Z_K \end{aligned} \right\} \quad (2.109)$$

Из последних уравнений следует, что с применением у трансформатора со схемой соединения обмоток Y/Y_n симметрирующего устройства будет иметь место полная компенсация потоков нулевой последовательности, и система напряжений будет симметричной [138].

Линейные напряжения вторичной обмотки трансформатора Y/Y_n СУ определяются по тем же уравнениям (2.50), что и для трансформатора со схемой соединения обмоток Y/Y_n –разомкнутый треугольник.

2.3.3. Экспериментальные исследования симметрирующей способности трансформатора Y/Y_n СУ

Исследования несимметричных режимов работы трансформатора со схемой соединения обмоток Y/Y_n СУ производились методом симметричных составляющих. Цель, задачи, методика исследований и режимы работы трансформатора принимались такие же, как и при исследовании трансформатора Y/Y_n –разомкнутый треугольник.

Лабораторные исследования фазных напряжений трансформатора Y/Y_n СУ проводились на трансформаторах типа ТСЗ-2,5/0,38 с различными схемами соединения обмоток. Значения фазных напряжений трансформатора Y/Y_n СУ сравнивались с соответствующими напряжениями трансформаторов со схемами соединения обмоток Y/Z_n , Y/Y_n –разомкнутый треугольник и Y/Y_n для двух режимов: ($I_a = I_n \div 0$; $I_b = I_c = I_n$) и ($I_a = I_b = I_n \div 0$, $I_c = I_n$) [88].

По результатам измерений фазных напряжений низшей стороны трансформатора в зависимости от тока в нулевом проводе (табл. П5) построены кривые (рис. 2.16 и 2.17), в целях наглядности совмещенные для одинаковых режимов работы трансформаторов.

Кривые зависимости фазных напряжений в режиме ($I_a = I_n \div 0$, $I_b = I_c = I_n$) от тока в нулевом проводе (рис. 2.16) показывают, что при несимметричной нагрузке ($I_a = 0$) максимальное расхождение между фазными напряжениями для схемы Y/Y_n составляет 36 В, для трансформаторов со схемой Y/Z_n , Y/Y_n –разомкнутый треугольник, Y/Y_n СУ – 5 В.

При этом отклонения напряжений от номинального в процентном выражении составляет соответственно по фазам a , b , c для трансформаторов со схемой соединения обмоток Y/Y_n : 9,8 %; 9,8 %; –9 %; для трансформаторов Y/Y_n СУ и Y/Y_n –разомкнутый треугольник: 4 %; 0 %; 0 %; для трансформатора Y/Z_n : –3,3 %, 0,8 %, –0,8 %.

Расхождение между фазными напряжениями при глубокой несимметричной нагрузке в режиме ($I_a = I_b = I_n \div 0$, $I_c = I_n$) для трансформатора Y/Y_n составляет 31 В, а для трансформаторов Y/Z_n , Y/Y_n –разомкнутый треугольник, Y/Y_n СУ – 5 В (рис. 2.17).

Отклонение напряжения от номинального в процентном отношении составляет соответственно по фазам: для Y/Y_n – 20,5 %; –5,7 %; –4,9 %; для трансформаторов Y/Z_n , Y/Y_n –разомкнутый треугольник, Y/Y_n СУ : 3,3 %; 4,9 %; 0 %.

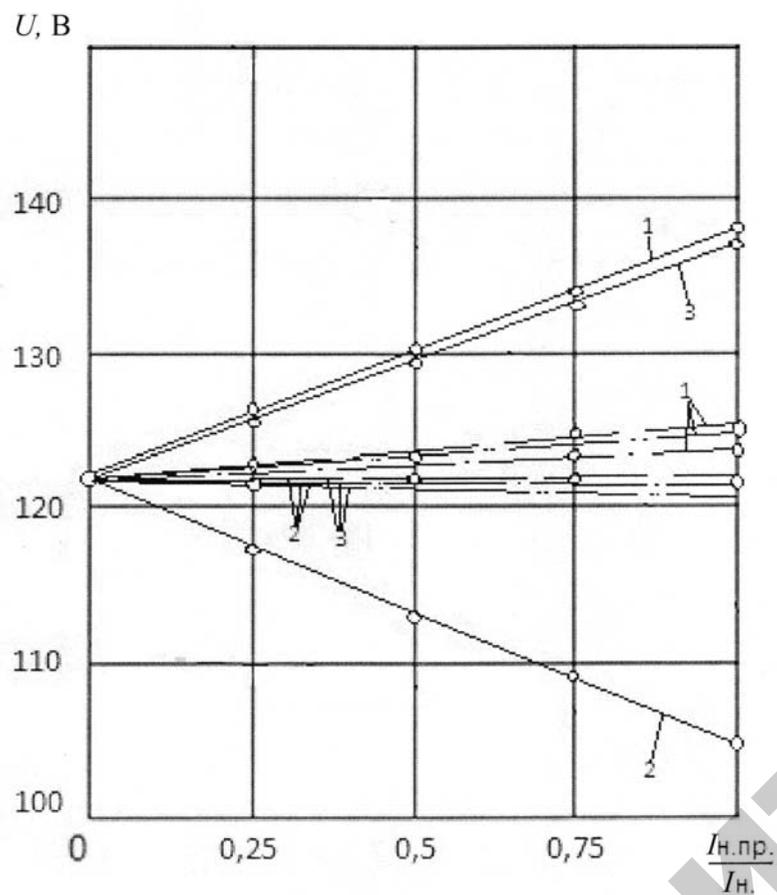


Рис. 2.16. Зависимость фазных напряжений на выводах с низшей стороны трансформаторов типа ТСЗ-2,5/0,38 от тока в нулевом проводе (режим $I_a = I_b = I_n \div 0$, $I_c = I_n$):

- Y/Y_n ;
 - Y/Z_n ;
 - · — · — Y/Y_n -разомкнутый треугольник;
 - · — · — Y/Y_nCY ;
- 1 – фаза *a*; 2 – фаза *b*; 3 – фаза *c*

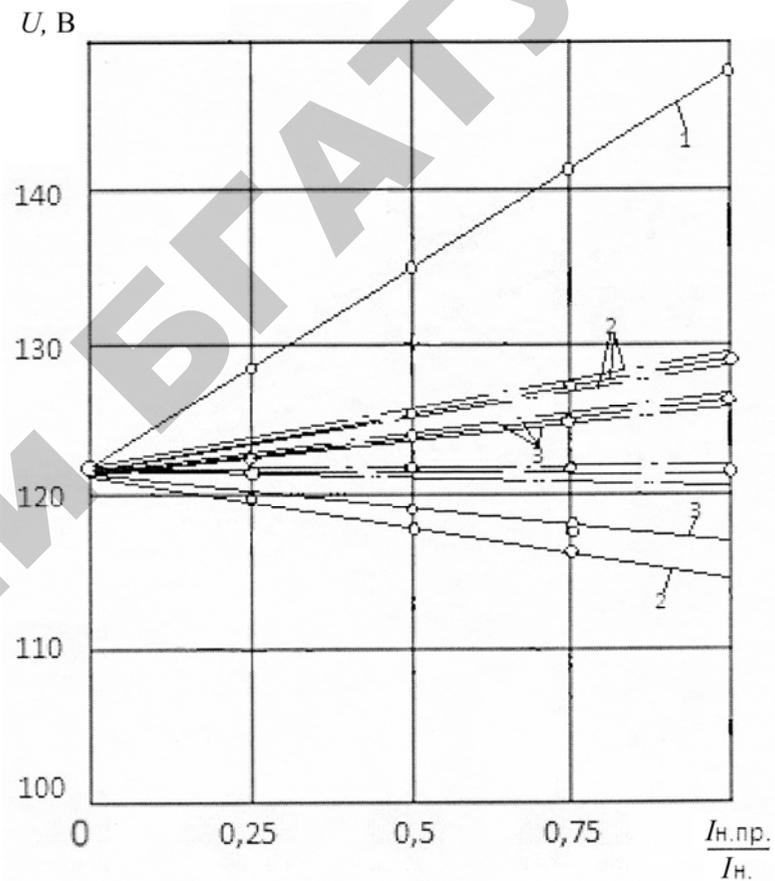


Рис. 2.17. Зависимость фазных напряжений на выводах с низшей стороны трансформаторов типа ТСЗ-2,5/0,38 от тока в нулевом проводе (режим $I_a = I_b = I_n \div 0$, $I_c = I_n$):

- Y/Y_n ;
 - Y/Z_n ;
 - · — · — Y/Y_n -разомкнутый треугольник;
 - · — · — Y/Y_nCY ;
- 1 – фаза *a*; 2 – фаза *b*; 3 – фаза *c*

2.3.4. Исследование зависимости коэффициентов несимметрии напряжений по обратной и нулевой последовательности трансформатора Y/Y_nCY

Количественная и качественная оценка несимметрии напряжений в соответствии с ГОСТ 13109–97 [1] в настоящее время должна производиться по двум показателям: коэффициенту несимметрии напряжений по обратной последовательности (K_{2U}) и коэффициенту несимметрии напряжений по нулевой последовательности (K_{0U}).

Расчет данных величин производился по формулам, приведенным в стандарте [1], и по методике для трансформатора Y/Y_n –разомкнутый треугольник. При этом определялись коэффициенты K_{2U} и K_{0U} в зависимости от тока в нулевом проводе для режимов ($I_a = I_n \div 0, I_b = I_c = I_n$) и ($I_a = I_b = I_n \div 0, I_c = I_n$) и различных схем соединения обмоток трансформаторов. По результатам расчетов (табл. П5) построены графики (рис. 2.18) [88].

Коэффициенты несимметрии напряжений по обратной последовательности (см. рис. 2.18) одинаковы для всех четырех схем соединения обмоток трансформаторов и при номинальном токе в нулевом проводе не превышают 0,9 %.

Значение коэффициента несимметрии напряжений по обратной последовательности практически не зависит от режима работы трансформаторов и схем соединения их обмоток.

Коэффициенты несимметрии напряжений по нулевой последовательности (см. рис. 2.18) у трансформаторов Y/Z_n , Y/Y_n –разомкнутый треугольник, Y/Y_nCY в 6 раз меньше, чем у трансформатора Y/Y_n . Следовательно, эти трансформаторы по симметрирующей способности равноценны.

$K_{2U}, K_{0U}, \%$

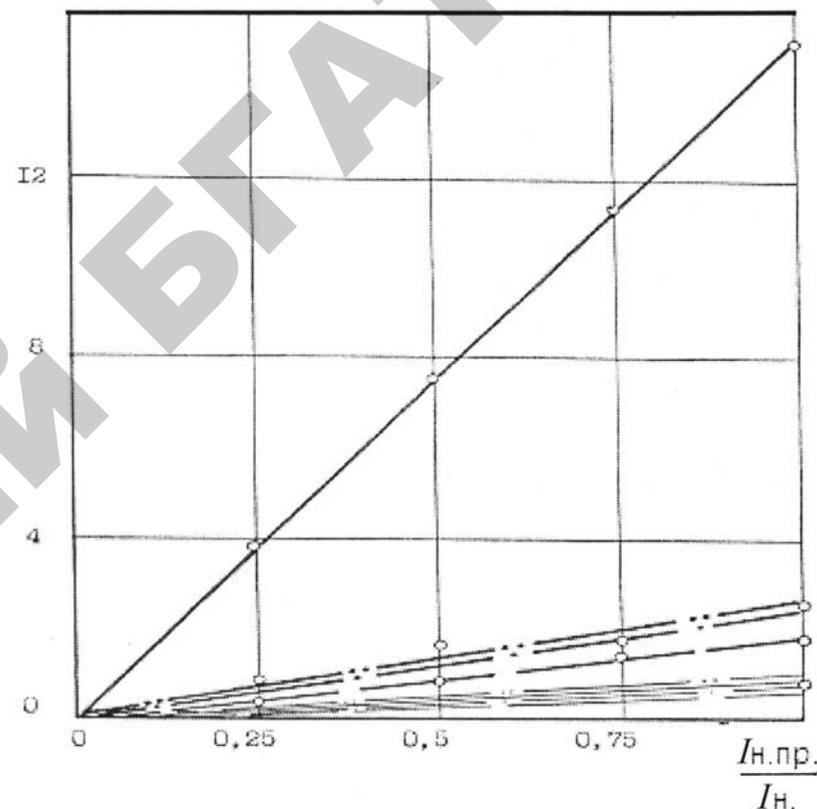


Рис. 2.18. Зависимость коэффициентов несимметрии напряжений по обратной и нулевой последовательностям на вводах нижней стороны трансформаторов типа ТСЗ-2,5/0,38 от тока в нулевом проводе:

- ===== Y/Y_n ;
- ===== Y/Z_n ;
- ===== Y/Y_n –разомкнутый треугольник;
- ===== Y/Y_nCY ;
- ===== K_{2U} – коэффициент напряжения обратной последовательности;
- ===== K_{0U} – коэффициент напряжения нулевой последовательности

2.3.5. Сопротивление нулевой последовательности трансформатора Y/Y_nCY

По величине сопротивления нулевой последовательности трансформатора судят о его работе при несимметричной нагрузке фаз. Параметры сопротивлений нулевой последовательности трансформаторов точно определить весьма трудно, так как у них сложная конфигурация полей нулевой последовательности. Формулы для определения сопротивления нулевой последовательности трансформатора сложны для инженерных расчетов [140]. В связи с этим на практике сопротивление нулевой последовательности трансформаторов определяют опытным путем.

Определить сопротивление нулевой последовательности возможно несколькими способами, но наиболее простым и точным является определение данного сопротивления при ненасыщенном магнитопроводе [136].

Для определения сопротивления нулевой последовательности трансформатора Y/Y_nCY воспользуемся методикой, разработанной для трансформатора Y/Y_n —разомкнутый треугольник и схемой соединения сопротивлений обмоток трансформатора Y/Y_nCY (рис. 2.19).

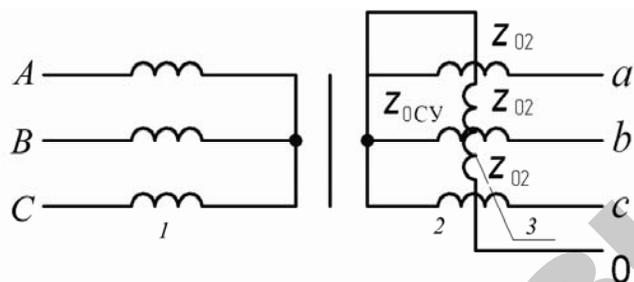


Рис. 2.19. Схема соединения сопротивлений нулевой последовательности трансформатора Y/Y_nCY :
1 – обмотка высшего напряжения; 2 – обмотка низшего напряжения;
3 – обмотка симметрирующего устройства

При определении сопротивления нулевой последовательности трансформатора выводы обмоток низшего напряжения закорачиваются. К ним и свободному концу симметрирующей обмотки подводится напряжение.

В этом случае общее сопротивление нулевой последовательности трансформатора будет равно

$$Z_0 = \frac{Z_{02}}{3} + Z_{0CY} \quad (2.110)$$

или

$$3Z_0 = Z_{02} + 3Z_{0CY}, \quad (2.111)$$

где Z_0 – общее полное сопротивление нулевой последовательности трансформатора, Ом;

Z_{02} – полное сопротивление нулевой последовательности вторичной обмотки трансформатора, Ом;

Z_{0CY} – полное сопротивление нулевой последовательности обмотки симметрирующего устройства, Ом.

При таком соединении обмотки низшего напряжения трансформатора будут соединены параллельно. Последовательно им включена симметрирующая обмотка. Для определения сопротивления нулевой последовательности преобразуем данную схему в эквивалентную ей (рис. 2.20).

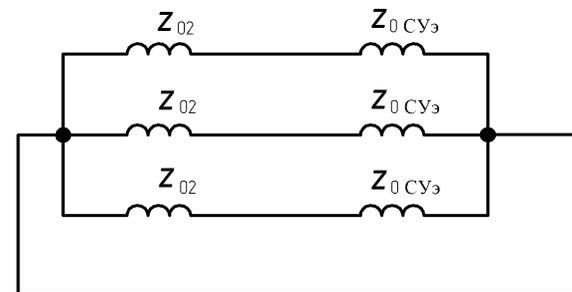


Рис. 2.20. Эквивалентная схема соединения сопротивлений нулевой последовательности обмоток трансформатора Y/Y_nCY

Общее сопротивление нулевой последовательности от этой замены не изменится, а останется постоянной величиной. В этом слу-

чае общее сопротивление нулевой последовательности, определенное по эквивалентной схеме, будет равно

$$\frac{1}{Z_0} = \frac{1}{Z_{02} + Z_{0CY3}} + \frac{1}{Z_{02} + Z_{0CY3}} + \frac{1}{Z_{02} + Z_{0CY3}} = \frac{3}{Z_{02} + Z_{0CY3}}, \quad (2.112)$$

где Z_{0CY3} – эквивалентное сопротивление нулевой последовательности компенсирующих витков.

После преобразования формулы (2.3) получим ее в следующем виде:

$$Z_0 = \frac{Z_{02} + Z_{0CY3}}{3}. \quad (2.113)$$

$$\text{Отсюда } 3Z_0 = Z_{02} + Z_{0CY3}. \quad (2.114)$$

Из выражений (2.111) и (2.114) имеем

$$Z_{02} + 3Z_{0CY} = Z_{02} + Z_{0CY3}.$$

Произведя сокращение, получим

$$Z_{0CY3} = 3Z_{0CY}. \quad (2.115)$$

Из равенства (2.115) следует, что эквивалентное сопротивление нулевой последовательности равно трехкратному значению действительного сопротивления той же последовательности симметрирующего устройства.

Согласно схеме (см. рис. 2.20) полное сопротивление нулевой последовательности трансформатора равно

$$Z_0 = Z_{02} + Z_{0CY3} = Z_{02} + 3Z_{0CY}. \quad (2.116)$$

Соответственно, активное и индуктивное сопротивления нулевой последовательности будут равны:

$$r_0 = r_{02} + 3r_{0CY}; \quad (2.117)$$

$$X_0 = \sqrt{Z_0^2 - r_0^2}. \quad (2.118)$$

Таким образом, для определения сопротивления нулевой последовательности трансформатора со схемой соединения Y/Y_n СУ необходимо пользоваться формулами (2.116)–(2.118).

По схеме (рис. 2.21) производилось определение сопротивлений нулевой последовательности трансформатора Y/Y_n СУ в сравнении со схемами Y/Y_n , Y/Z_n , Y/Y_n –разомкнутый треугольник [88].

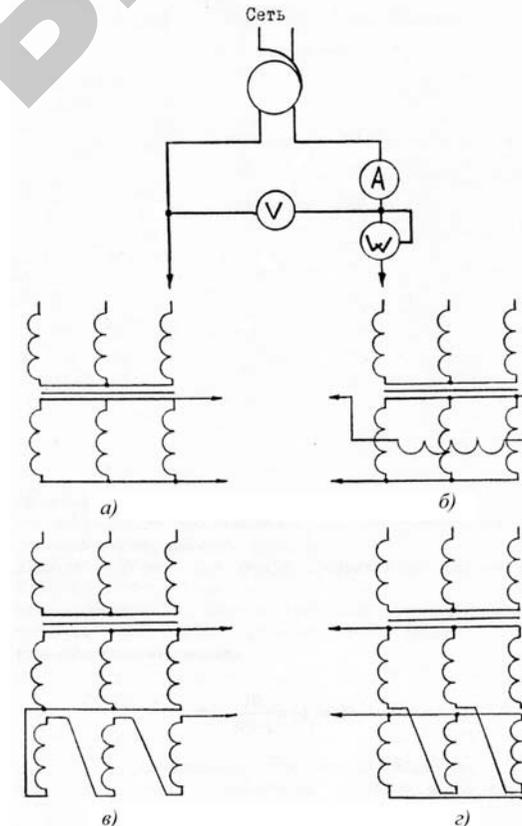


Рис. 2.21. Схема опытного определения сопротивлений нулевой последовательности трансформаторов со схемами соединения обмоток Y/Y_n (а), Y/Y_n СУ (б), Y/Y_n –разомкнутый треугольник (в) и Y/Z_n (г)

По результатам измерений и расчетов сопротивлений нулевой последовательности трансформаторов и их составляющих (табл. П6) построены кривые зависимостей сопротивлений нулевой последовательности трансформаторов и их составляющих от тока в нулевом проводе (рис. 2.22).

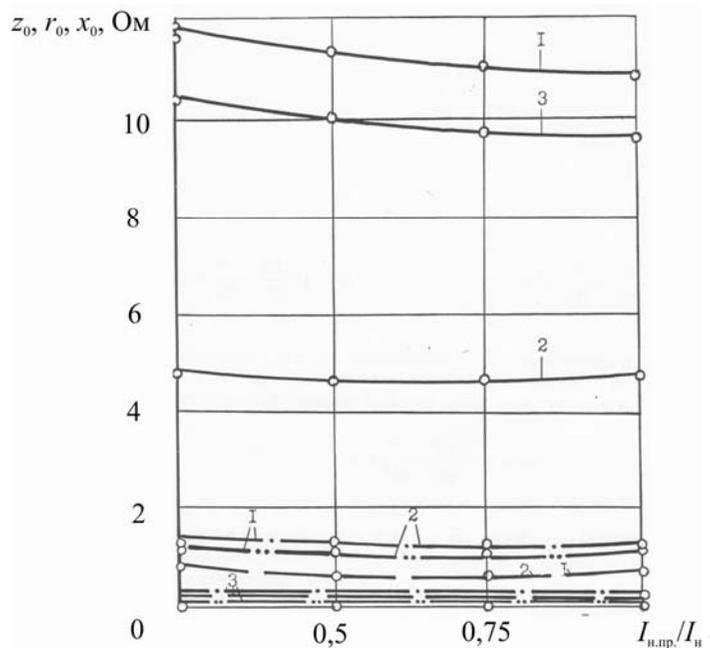


Рис. 2.22. Зависимость параметров сопротивления нулевой последовательности трансформаторов ТСЗ-2,5/0,38 от тока в нулевом проводе:
1 – полное сопротивление; 2 – активная составляющая;
3 – индуктивная составляющая

Анализ данных (табл. П6) и кривых (рис. 2.22) показывает, что у трансформаторов со схемами соединения обмоток Y/Z_n , Y/Y_n –разомкнутый треугольник, Y/Y_n – CU неуравновешенные потоки нулевой последовательности трансформаторов практически равны нулю. Это свидетельствует о том, что трансформатор со схемой соединения обмоток Y/Y_n – CU не уступает по симметрирующей способности системы фазных напряжений трансформаторам Y/Z_n и Y/Y_n –разомкнутый треугольник [88].

2.3.6. Исследование влияния симметрирующего устройства на нагрев трансформатора Y/Y_n – CU

Методика исследования. Симметрирующее устройство (CU) представляет собой обмотку, уложенную в виде банджа поверх обмоток трансформатора со схемой соединения обмоток Y/Y_n . При симметричном режиме работы трансформатора в ней тока нет. Однако при несимметричной нагрузке по ней протекает ток нулевого провода, равный утроенному току нулевой последовательности. В связи с этим представляет интерес влияние симметрирующего устройства на температурное поле трансформатора при различных режимах их работы.

Исследования проводились И. В. Протосовицким на трансформаторе ТМ-25/10 естественным масляным охлаждением, выполненным с симметрирующим устройством. При этом определялось температурное поле трансформатора в зависимости от тока в нулевом проводе как в симметричном, так и в несимметричном режимах, а также при перегрузках. Результаты исследований сравнивались с данными, полученными в результате исследований такого же трансформатора, но без симметрирующего устройства [88, 139].

При исследовании температурного поля трансформатора в зависимости от тока нулевого провода за расчетный режим был принят наиболее тяжелый: ток в одной из фаз изменяется от наибольшего значения до нуля, в двух других остается неизменным и равным наибольшему фазному току. Нагрев трансформатора проводился методом непосредственной нагрузки, в качестве которой использовались ползунковые реостаты. В результате экспериментальных исследований производились измерения токов во всех трех фазах и нулевом проводе и температуры обмоток, магнитопровода, масла и бака.

Измерение фазных токов и тока нулевого провода производилось амперметрами типа Э59, включенными через трансформаторы тока. Температура измерялась при помощи термпар «хромель–копель». Потенциометром типа ПП 60 класса точности 0.05 измерялась ЭДС. Затем по таблицам определялась температура.

Термпары были заложены в обмотки высшего напряжения фаз A и B в шести точках по их высоте. На магнитопроводе термпары размещены в нижнем и верхнем ярме в области фазы B .

Для измерения температуры масла термопары были заложены в пространстве между обмотками и баком в низшей, средней и верхней части (рис. 2.23). Температура бака измерялась в низшей и верхней точках (крышка, дно).

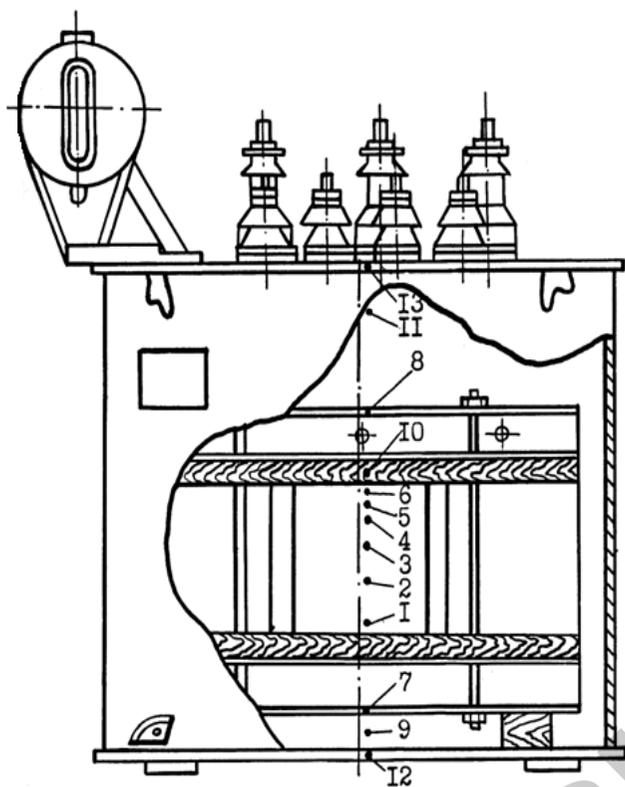


Рис. 2.23. Размещение термопар на трансформаторе ТМ-25/10:
1-6 – термопары в обмотке; 7, 8 – термопары в магнитопроводе;
9-11 – термопары в масле; 12, 13 – термопары в баке

Исследование температурного поля трансформатора в зависимости от тока в нулевом проводе. На основании данных экспериментальных исследований (табл. П7) построены зависимости температуры перегрева основных элементов трансформатора от тока в нулевом проводе для сравнения с СУ и без него (рис. 2.24–2.27).

На рис. 2.24 приведены зависимости температуры перегрева высших, наиболее нагретых точек трансформатора от тока в нулевом проводе с симметрирующим устройством и без него, на рис. 2.25 – для низших точек.

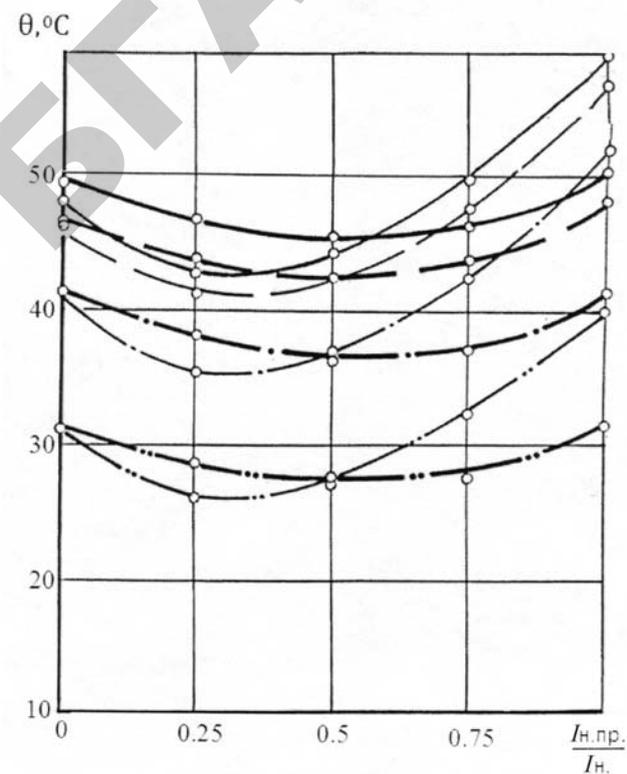


Рис. 2.24. Зависимость температуры перегрева трансформатора ТМ-25/10-0.4 от тока в нулевом проводе с выполненным симметрирующим устройством — и без него — для высших точек:

- — — — — обмотка;
- — — — — магнитовод;
- — — — — масло;
- — — — — бак

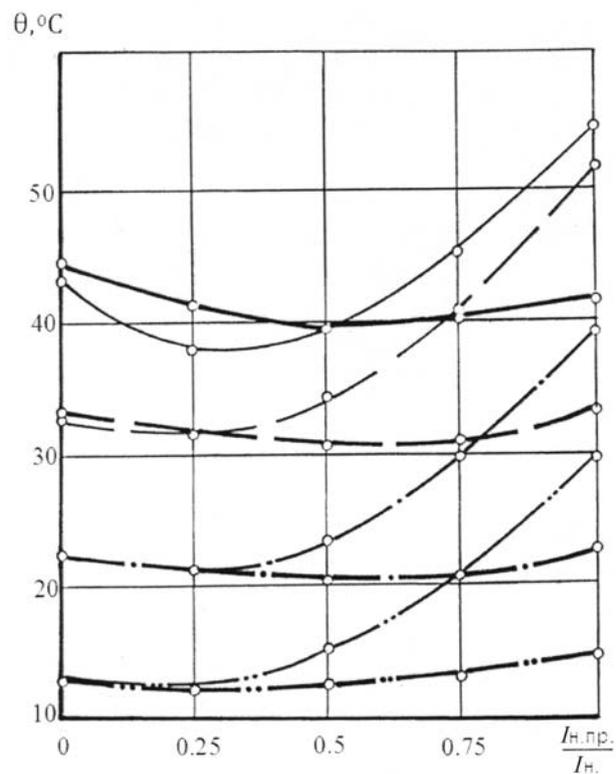


Рис. 2.25. Зависимость температуры перегрева трансформатора ТМ-25/10-0.4 от тока в нулевом проводе с выполненным симметрирующим устройством и без него — для низших точек:

- — — — — обмотка;
- == == == магнитовод;
- === === масло;
- ==== === бак

Распределение температуры перегрева по высоте обмоток, магнитопровода, масла и бака в симметричном режиме работы трансформатора как с симметрирующим устройством, так и без него приведено на рис. 2.26, на рис. 2.27 приведены такие же кривые для несимметричного режима.

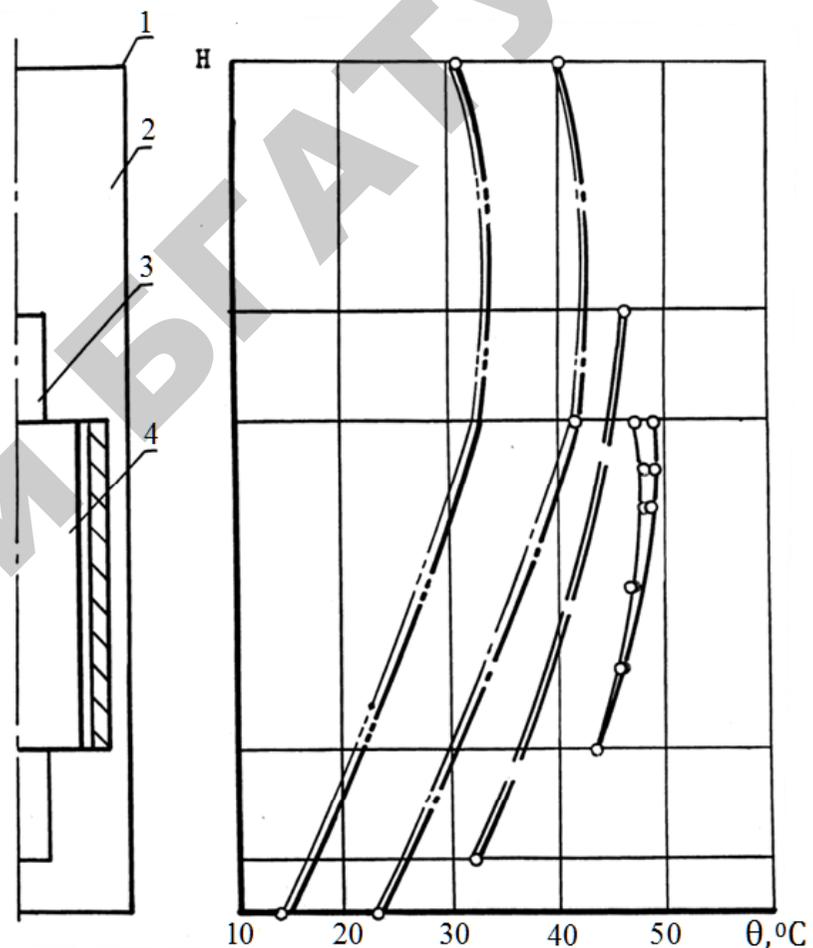


Рис. 2.26. Распределение температуры перегревов по высоте у трансформатора ТМ-25/10-0.4 для симметричного режима с выполненным СУ и без него:

- — — — — перегрев обмотки;
- == == == перегрев магнитовода;
- === === перегрев масла;
- ==== === перегрев бака

гревая ферромагнитные части трансформатора, особенно бака, резко снижают интенсивность охлаждения трансформатора.

Исследование температурного поля трансформатора при перегрузках. В лабораторных условиях были проведены исследования температурного поля трансформатора с симметрирующим устройством при перегрузках (табл. П8).

Из полученных данных следует, что при симметричном аварийном режиме встроенное симметричное устройство сильного влияния на температурное поле трансформатора не оказывает. Температура в верхней части обмотки трансформатора с симметрирующим устройством в симметричном режиме по сравнению с трансформатором без СУ повысилась всего лишь на 1,5 °С. На температуру перегрева магнитопровода, масла и бака симметрирующее устройство влияния не оказало.

При перегрузках трансформатора с симметрирующим устройством в несимметричном режиме температура обмотки повысилась на 0,5 °С при 100%-й перегрузке, а масла – на 0,5–1,0 °С при 75-, 100%-й перегрузках. Такое явление объясняется тем, что при несимметричной нагрузке по обмотке СУ протекает фазный ток.

Анализ результатов исследований показал, что при перегрузках трансформатора без симметрирующего устройства температура перегрева оказалась выше (по сравнению с трансформатором с СУ):

- обмотка: на 1,5–3,5 °С при 30-, 45-, 60-, 75%-й перегрузках;
- магнитопровод: 0–3,5 °С во всех режимах;
- масло: 0–1 °С при 30-, 45-, 75%-й перегрузках;
- бак: 0,5–1,5 °С во всех режимах.

Это объясняется тем, что магнитные потоки нулевой последовательности, замыкаясь через бак, разогревают его и влияют на интенсивность охлаждения трансформатора.

Таким образом, симметрирующее устройство в аварийных режимах при несимметричных нагрузках изменяет температурное поле трансформатора незначительно. В зависимости от величины перегрузки и элемента трансформатора температура перегрева изменяется в пределах от –3,5 до +1,0 °С.

2.4. Трансформатор со схемой соединения обмоток «звезда–треугольник с зигзагом» (Y/Δ с зигзагом)

2.4.1. Область применения трансформатора

Предложенная и исследованная на кафедре электроснабжения (БГАТУ) схема соединения обмоток трансформатора «звезда–треугольник с зигзагом» (Y/Δ с зигзагом) [120, 142] относится к одинадцатой группе соединения обмоток. Так как вторичная обмотка трансформатора не имеет нейтральной точки, то он может работать только в сетях с изолированной нейтралью [143]. Поскольку низковольтные электрические сети напряжением 0,38 кВ работают в режиме глухозаземленной нейтрали, то данный трансформатор не может быть использован в существующих распределительных сетях в качестве силового.

Вместе с тем в сельскохозяйственных электрических сетях имеется большое количество электроприемников с нелинейными характеристиками (выпрямительные схемы, полупроводниковые преобразователи); потребители, питаемые пониженным напряжением (электрический инструмент и приборы, лампы местного освещения и пр.). Для их питания используются трансформаторы со схемой соединения обмоток «звезда–звезда–нуль». Учитывая необходимость обеспечения пожарной безопасности, они применяются с естественным воздушным охлаждением, так как трансформаторное масло является горючим материалом.

Для этих целей промышленность выпускает трансформаторы типа ТС (трехфазные сухие), ТСЗ (трехфазные сухие защищенные), ТСМ (трехфазные сухие многоцелевые), ТСЗМ1 (трехфазные сухие защищенные многоцелевые), ТСП (трехфазные сухие разделительные), ТСЗР (трехфазные сухие защищенные разделительные), ТСП (трехфазные сухие преобразовательные), ТСЗП (трехфазные сухие защищенные преобразовательные) и другие [144, 145]. Трансформаторы серии ТС выпускаются мощностью от 16 до 100 кВ·А класса напряжения 0,66 кВ. Они предназначены для питания различных потребителей пониженным трехфазным напряжением (напряжение первичной обмотки – 380 В, вторичной – 115, 230 В) [145]. Трансформаторы серии ТСЗ мощностью от 6,3 до 100,0 кВ·А класса напряжения 0,66 кВ предназначены для питания различных потребителей пониженным трехфазным напряжением (напряжение первичной обмотки – 380 или 230 В, вторичной – 115, 230 В) [145]. Трансформаторы серии ТСМ выпускаются

мощностью от 0,16 до 4,0 кВ·А. Они предназначены для питания выпрямительных схем, полупроводниковых преобразователей станков, электрического инструмента и других устройств, требующих пониженного трехфазного напряжения (напряжение первичной обмотки – 380 или 220 В, вторичной – 19, 22, 36 В) [145]. Трансформаторы серии ТСЗМ1 мощностью 1,6; 2,5; 4,0 кВ·А предназначены для питания пониженным напряжением электроинструмента, электроприборов, ламп местного освещения и других нагрузок в промышленных установках или на строительных площадках (напряжение первичной обмотки – 380 или 220 В, вторичной – 36, 42, 220 В) [145]. Для питания выпрямительных схем, полупроводниковых преобразователей станков, электрического инструмента и других устройств трехфазным напряжением до 1000 В, если требуется разделение цепей с помощью усиленной изоляции [145], выпускаются трансформаторы серий ТСП и ТСЗР мощностью от 0,16 до 4,0 кВ·А. Трансформаторы класса напряжения 0,7 кВ серий ТС, ТСЗ, ТСП, ТСЗП выпускаются в диапазоне мощностей 6,3–250,0 кВ·А (напряжение питания – 380 В, выходное напряжение – 58–350 В) [144].

Вышеперечисленные серии трансформаторов применяются в выпускаемых промышленностью полупроводниковых преобразователях. Эти преобразователи генерируют в сеть широкий спектр высших гармоник токов и напряжений, для уменьшения которых требуется применение дорогостоящих фильтров. Поэтому для повышения качества электроэнергии и эффективности ее использования в таких электроустановках целесообразно применение трансформаторов со схемой соединения обмоток Y/Δ с зигзагом.

Схема соединения обмоток трансформатора Y/Δ с зигзагом может быть использована в серийно выпускаемых выпрямителях различного назначения [144–146]: ВАЗП, УЗА, В-ТПЕД, М-Т4ПЕ, В-ТПЕ, ВГ-ТПЕ, В-ТПП, КВП, ВАК, УП, УПМ, ТЕ, ТЕР, ТВ, ТВР, В-ТППД, ВАСТ и т. п.

Выпрямительные агрегаты серии ВАЗП [146] предназначены для зарядки кислотных аккумуляторных батарей, параллельной работы с аккумуляторными батареями на нагрузку, формовки отдельных аккумуляторов. Они необходимы на сельскохозяйственных предприятиях, где в большом количестве применяются дорогостоящие кислотные батареи, которые требуют постоянной подзарядки. Устройства зарядные автома-

тические серии УЗА [146] применяются для зарядки аккумуляторных батарей в составе передвижных ремонтных мастерских.

Выпрямители серии М-Т4ПЕ [146] предназначены для зарядки аккумуляторных батарей в условиях транспортных предприятий и станций технического обслуживания. Выпрямители серии ВГ-ТПЕ [146] используются для питания технологическим током гальванических ванн. Кроме того, могут использоваться для питания установок очистки сточных вод и другого оборудования. Все типы выпрямителей имеют встроенный силовой трансформатор с естественным воздушным охлаждением. Выпрямители серии В-ТПП [146] предназначены для питания установки получения водорода методом электролиза воды. Конструктивно выпрямитель выполнен в виде шкафа выпрямительного и отдельного согласующего трансформатора.

Комплектные выпрямительные полупроводниковые подстанции типа КВП [146] предназначены для питания постоянным током сетей электропривода. Имеют встроенный силовой трансформатор с воздушным охлаждением. Устройства пусковые серии УП-Р-12/24, УПМ-ЗР-12/24, В-ТППД, В-ТПЕД [145] применяются для облегчения запуска двигателей внутреннего сгорания грузовых автомобилей, тракторов и другой сельскохозяйственной техники в холодное время года или при слабо заряженной батарее. Они позволяют значительно экономить топливно-энергетические ресурсы: зарядки-разрядки аккумуляторных батарей при их формировании; групповой и одиночной подзарядки и контроля состояния аккумуляторных батарей при их формировании; проведения сварочных работ постоянным током электродом любого диаметра; сушки обмоток электрических машин; питания ручного инструмента напряжением переменного тока. Рекомендуются для применения на сельхозпредприятиях, в фермерских хозяйствах, на предприятиях АПК, в гаражах, ремонтных мастерских.

Выпрямительные агрегаты серий ТЕ, ТЕР, ТВ, ТВР [144] используются для питания постоянным током оборудования для обеззараживания, очистки сточных вод, зарядки аккумуляторных батарей и других потребителей.

В качестве примера представлена схема (рис. 2.28) трехфазного выпрямителя [144], который содержит вентили, соединенные в трехфазную мостовую схему и подключенные к вторичной обмотке трансформатора со схемой соединения Y/Δ с зигзагом. Трансформатор компенсирует вынужденные потоки 3-й и кратных ей гармонических составляющих, а также подавляет потоки вынужденного намагничива-

ния других гармоник спектра, что приводит к уменьшению высших гармоник в кривых напряжений.

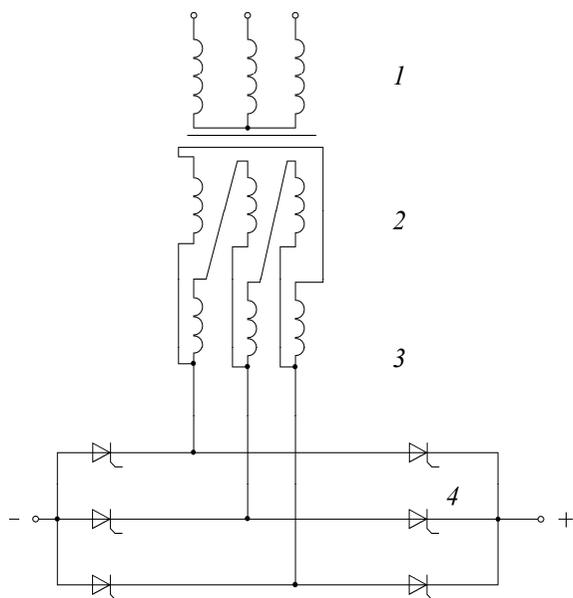


Рис. 2.28. Трехфазный полупроводниковый выпрямитель:
1 – обмотки первичного напряжения трансформатора;
2, 3 – обмотки вторичного напряжения; 4 – вентили

Широко применяется в современных электроустановках частотное регулирование электроприводов переменного тока. Оно позволяет снизить расход электроэнергии на 30–50 %, увеличить срок службы электродвигателя и приводимых механизмов, экономить воду и исключить гидроудары в системах водоснабжения, сократить эксплуатационные расходы, управлять электроприводом в соответствии с требуемым технологическим процессом. Частотно регулируемый электропривод в сельском хозяйстве применяется в животноводстве, растениеводстве, деревообработке, подсобном производстве (электропривод насосов, компрессоров, вентиляторов, воздуходувок, дымососов, конвейеров, транспортеров, центрифуг, дробильного оборудования и других механизмов). Промышленность выпускает для этих целей множество серий преобразователей частоты, например, ПЧ-ТТПТ «ОМЕГА» [144].

При работе преобразователя частоты генерируется ряд гармоник напряжений и токов. С целью их компенсации преобразователи частоты подключаются к питающей сети через сетевые дроссели. Однако полной отфильтровки в большинстве случаев достигнуть не удастся: высшие гармоники проникают в сеть [148]. Для более эффективного подавления высших гармоник целесообразно сетевые дроссели заменить трансформатором со схемой соединения обмоток Y/Δ с зигзагом с коэффициентом трансформации, равным единице (рис. 2.29). Благодаря компенсации гармоник в магнитопроводе трансформатора будет обеспечена синусоидальная форма напряжений.

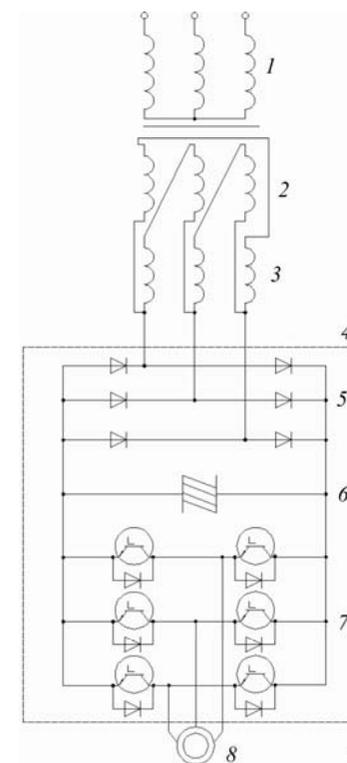


Рис. 2.29. Трехфазный преобразователь частоты:
1 – обмотки первичного напряжения; 2, 3 – обмотки вторичного напряжения;
4 – преобразовательная часть; 5 – выпрямитель; 6 – фильтр; 7 – инвертор;
8 – нагрузка (электродвигатель переменного тока)

Устройство содержит трехфазный трансформатор со схемой соединения обмоток Y/Δ с зигзагом и преобразовательную часть, включающую в себя выпрямитель, инвертор и фильтр высших гармоник. Нагрузкой является электродвигатель переменного тока. Нами предложена также схема трехфазного преобразователя частоты, которая содержит трехфазный трансформатор со схемой соединения обмоток Y/Δ с зигзагом [149, 150].

Для плавного пуска механизмов с приводными трехфазными асинхронными двигателями напряжением 380 В мощностью от 4 до 375 кВт применяется устройство плавного пуска (УПП) [144]. Оно представляет собой реверсивный (нереверсивный) трехфазный тиристорный коммутатор с многофункциональной системой управления на базе микропроцессорного контроллера и развитым пользовательским интерфейсом.

Применение устройств плавного пуска позволяет ограничить пусковой ток двигателя на заданном уровне, исключить механические ударные нагрузки на оборудование, задать требуемый темп разгона механизма до установившейся скорости, осуществить реверс электродвигателя, обеспечить защиту электродвигателя от аварийных токов, предотвратить недопустимые снижения напряжения в питающей сети при пуске. Для компенсации высших гармоник целесообразно подключить данное устройство к питающей сети через согласующий трансформатор со схемой соединения обмоток Y/Δ с зигзагом.

Для обеспечения электробезопасности в сельскохозяйственных электроустановках трансформатор со схемой соединения обмоток Y/Δ с зигзагом может также применяться в сетях с глухозаземленной нейтралью в качестве разделительного.

Для электроснабжения потребителей, насыщенных нелинейными и несимметричными электроприемниками, электроустановки которых работают в режиме изолированной нейтрали, исходя из требований электробезопасности, может быть использован трансформатор со схемой соединения обмоток Y/Δ с зигзагом в режиме силового. К ним относятся мобильные электроустановки, электроустановки предприятий торфоразработки и аналогичные им.

2.4.2. Работа трансформатора при несимметричной нагрузке фаз

2.4.2.1. Общий случай несимметрии

Соотношение токов и напряжений. Обмотка высшего напряжения трансформатора со схемой соединения обмоток Y/Δ с зигзагом соединена в «звезду» без нулевого провода. Поэтому в ней нет пути для протекания токов нулевой последовательности. В этой обмотке они отсутствуют. Система фазных токов обмотки высшего напряжения является уравновешенной. В этом случае будут справедливы выражения (2.1) и (2.2), как и для трансформаторов Y/Y_n –разомкнутый треугольник или Y/Y_n СУ.

Система токов нулевой последовательности не может трансформироваться в первичной обмотке трансформатора. Трансформируются только токи прямой и обратной последовательности. Поэтому справедливо выражение (2.6). Учитывая равенство (2.2), будут также справедливы и выражения (2.7) и (2.8).

Фазные напряжения высшей обмотки трансформатора могут содержать составляющие всех последовательностей, поэтому справедливо выражение (2.3), как и для трансформаторов Y/Y_n –разомкнутый треугольник или Y/Y_n СУ.

По вторичной обмотке трансформатора, соединенной в треугольник, токи нулевой последовательности могут протекать, не выходя в линии. Следовательно, фазные токи вторичной обмотки могут содержать составляющие всех последовательностей. Поэтому справедливо выражение (2.4).

Фазные напряжения вторичной обмотки трансформатора, соединенной треугольником, не содержат составляющих нулевой последовательности:

$$\begin{aligned} \underline{U}_a &= \underline{U}_{a1} + \underline{U}_{a2} = \underline{U}'_a ; \\ \underline{U}_b &= \underline{U}_{b1} + \underline{U}_{b2} = \underline{U}'_b ; \\ \underline{U}_c &= \underline{U}_{c1} + \underline{U}_{c2} = \underline{U}'_c , \end{aligned} \quad (2.119)$$

где $\underline{U}_a, \underline{U}_b, \underline{U}_c$ – фазные напряжения низшей обмотки трансформатора соответственно фаз a, b, c ;

$\underline{U}_{a1}, \underline{U}_{b1}, \underline{U}_{c1}$ – напряжения прямой последовательности обмотки низшего напряжения трансформатора соответственно фаз a, b, c ;

$\underline{U}_{a2}, \underline{U}_{b2}, \underline{U}_{c2}$ – напряжения обратной последовательности обмотки низшего напряжения трансформатора соответственно фаз a, b, c ;

$\underline{U}'_a, \underline{U}'_b, \underline{U}'_c$ – сумма напряжений прямой и обратной последовательности обмотки низшего напряжения трансформатора соответственно фаз a, b, c .

Схема замещения. Для получения схемы замещения трансформатора со схемой соединения обмоток Y/Δ с зигзагом (см. рис. 1.4) согласно законам Кирхгофа запишем уравнения:

1) для обмотки высшего напряжения фазы A

$$\underline{U}_A = -\underline{E}_A + \underline{I}_A \underline{Z}_1, \quad (2.120)$$

где \underline{E}_A – ЭДС первичной обмотки фазы A , создаваемая основным магнитным потоком трансформатора;

\underline{Z}_1 – эквивалентное полное сопротивление обмотки высшего напряжения трансформатора;

2) для полуобмоток низкого напряжения a_2 и a_3 , находящихся на одном и том же стержне магнитопровода, что и обмотка высшего напряжения фазы A , и принадлежащих разным фазам:

$$\underline{U}_{a2} = \underline{E}_A - \underline{I}_{a2} \underline{Z}_2; \quad (2.121)$$

$$\underline{U}_{a3} = \underline{E}_A - \underline{I}_{a3} \underline{Z}_3,$$

где $\underline{U}_{a2}, \underline{U}_{a3}$ – напряжения полуобмоток фаз a_2 и a_3 вторичной стороны;

$\underline{I}_{a2}, \underline{I}_{a3}$ – токи, протекающие по полуобмоткам 2 и 3;

$\underline{Z}_2, \underline{Z}_3$ – эквивалентное сопротивление полуобмоток 2 и 3.

Эквивалентные полные сопротивления обмоток высшего напряжения и полуобмоток низшего напряжения можно определить по формулам:

$$\underline{Z}_1 = r_1 + jx_1 = r_1 + j\omega(L_1 - M_{12} - M_{13} + M_{23});$$

$$\underline{Z}_2 = r_2 + jx_2 = r_2 + j\omega(L_2 - M_{12} - M_{23} + M_{13}); \quad (2.122)$$

$$\underline{Z}_3 = r_3 + jx_3 = r_3 + j\omega(L_3 - M_{13} - M_{23} + M_{12}),$$

где r_1, r_2, r_3 – активные сопротивления обмоток высшего напряжения полуобмоток 2 и 3 низшего напряжения;

x_1, x_2, x_3 – реактивные сопротивления вышеуказанных обмоток;

L_1, L_2, L_3 – индуктивность обмотки высшего напряжения и полуобмоток 2 и 3 низшего напряжения;

M_{12}, M_{13}, M_{23} – взаимная индуктивность пары обмоток.

Разложив обе части уравнений (2.120) и (2.121) на симметричные составляющие, получим:

$$\underline{U}_A = \underline{U}_{A1} + \underline{U}_{A2} + \underline{U}_{A0} = -\underline{E}_{A1} - \underline{E}_{A2} - \underline{E}_{A0} + \underline{I}_{A1} \underline{Z}_1 + \underline{I}_{A2} \underline{Z}_1; \quad (2.123)$$

$$\underline{U}_{a2} = \underline{U}_{a21} + \underline{U}_{a22} = \underline{E}_{A1} + \underline{E}_{A2} + \underline{E}_{A0} - \underline{I}_{a21} \underline{Z}_2 - \underline{I}_{a22} \underline{Z}_2 - \underline{I}_{a20} \underline{Z}_2; \quad (2.124)$$

$$\underline{U}_{a3} = \underline{U}_{a31} + \underline{U}_{a32} = \underline{E}_{A1} + \underline{E}_{A2} + \underline{E}_{A0} - \underline{I}_{a31} \underline{Z}_3 - \underline{I}_{a32} \underline{Z}_3 - \underline{I}_{a30} \underline{Z}_3, \quad (2.125)$$

где $\underline{E}_{A1}, \underline{E}_{A2}, \underline{E}_{A0}$ – ЭДС прямой, обратной и нулевой последовательности фазы A ;

$\underline{U}_{a21}, \underline{U}_{a31}$ – напряжения прямой последовательности полуобмоток a_2 и a_3 соответственно;

$\underline{U}_{a22}, \underline{U}_{a32}$ – напряжения обратной последовательности полуобмоток a_2 и a_3 соответственно;

$\underline{I}_{a21}, \underline{I}_{a31}$ – токи прямой последовательности полуобмоток a_2 и a_3 соответственно;

$\underline{I}_{a22}, \underline{I}_{a32}$ – токи обратной последовательности полуобмоток a_2 и a_3 соответственно;

$\underline{I}_{a20}, \underline{I}_{a30}$ – токи нулевой последовательности полуобмоток a_2 и a_3 соответственно.

Из выражения (2.123) следует:

$$\underline{U}'_A = -\underline{E}'_A + \underline{I}'_A \underline{Z}_1; \quad (2.126)$$

$$\underline{U}_{A0} = -\underline{E}_{A0}, \quad (2.127)$$

где \underline{E}'_A – сумма ЭДС прямой и обратной последовательности обмотки высшего напряжения фазы A .

Из выражения (2.124) следует:

$$\underline{U}''_{a2} = \underline{E}'_A - \underline{I}''_{a2} \underline{Z}_2; \quad (2.128)$$

$$\underline{U}_{a20} = 0 = \underline{E}_{A0} - \underline{I}_{a20} \underline{Z}_2, \quad (2.129)$$

где \underline{U}''_{a2} – сумма напряжений прямой и обратной последовательности полуобмотки a_2 ;

\underline{I}''_{a2} – сумма токов прямой и обратной последовательности полуобмотки a_2 ;

\underline{U}_{a20} – напряжение нулевой последовательности полуобмотки a_2 .

Из выражения (2.125) получим

$$\underline{U}''_{a3} = \underline{E}'_A - \underline{I}''_{a3} \underline{Z}_3; \quad (2.130)$$

$$\underline{U}_{a30} = 0 = \underline{E}_{A0} - \underline{I}_{a30} \underline{Z}_3, \quad (2.131)$$

где \underline{U}''_{a3} – сумма напряжений прямой и обратной последовательности полуобмотки a_3 ;

\underline{I}''_{a3} – сумма токов прямой и обратной последовательности полуобмотки a_3 ;

\underline{U}_{a30} – напряжение нулевой последовательности полуобмотки a_3 .

На основании выражений (2.126), (2.128), (2.130) получена схема замещения трансформатора для токов прямой и обратной последовательности (рис. 2.30, а). На основании выражений (2.127), (2.129), (2.131) получена схема замещения трансформатора для токов нулевой последовательности (рис. 2.30, б). Стрелками на схеме показаны положительные направления токов, напряжений и ЭДС [142].

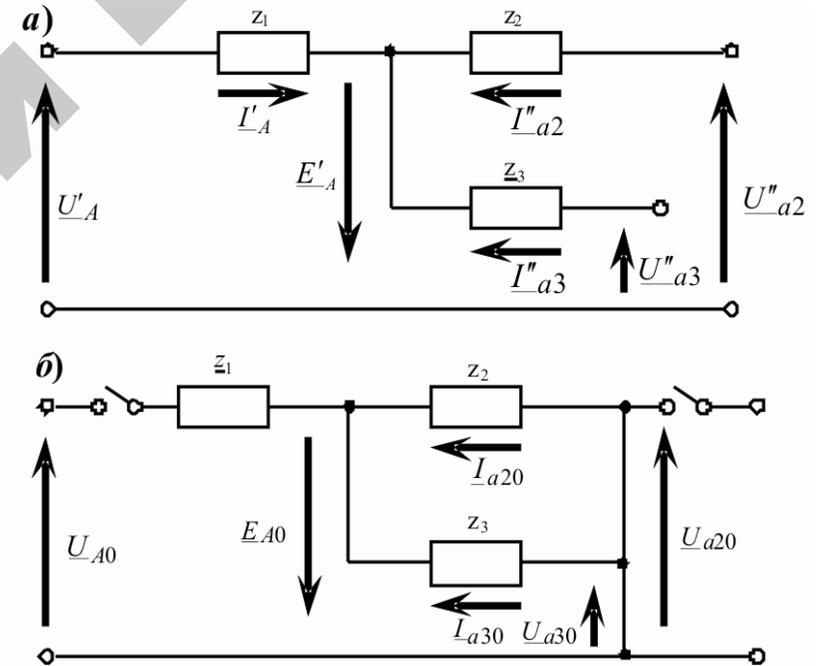


Рис. 2.30. Схемы замещения трансформатора со схемой соединения обмоток Y/Δ с зигзагом:
а) схемы замещения для токов прямой и обратной последовательности;
б) схема замещения для токов нулевой последовательности

Напряжения вторичной цепи трансформатора. Из схемы замещения для токов прямой и обратной последовательности

(рис. 2.30, а) справедлива следующая взаимосвязь между первичными и вторичными напряжениями прямой и обратной последовательности:

$$\underline{U}'_A - \underline{I}'_A \underline{Z}_1 + \underline{I}''_{a2} \underline{Z}_2 = \underline{U}''_{a2}; \quad (2.132)$$

$$\underline{U}'_A - \underline{I}'_A \underline{Z}_1 + \underline{I}''_{a3} \underline{Z}_3 = \underline{U}''_{a3}. \quad (2.133)$$

Для составляющих нулевой последовательности (рис. 2.30, б) получим

$$\underline{U}_{A0} + \underline{I}_{a20} \underline{Z}_2 = \underline{U}_{a20}; \quad (2.134)$$

$$\underline{U}_{A0} + \underline{I}_{a30} \underline{Z}_3 = \underline{U}_{a30}. \quad (2.135)$$

Токи нулевой последовательности протекают по полуфазам вторичных обмоток, расположенных на каждом из стержней магнитопровода, в противоположных направлениях. Сумма магнитодвижущих сил, создаваемых этими токами, в каждом из стержней магнитопровода при условии симметричного выполнения полуфаз будет равна нулю. Следовательно, магнитные потоки нулевой последовательности в каждом из стержней магнитопровода также будут равны нулю. Соответственно ЭДС, создаваемые потоками нулевой последовательности в обмотках трансформатора, также будут равны нулю:

$$\underline{E}_{A0} = 0;$$

$$\underline{E}_{B0} = 0; \quad (2.136)$$

$$\underline{E}_{C0} = 0.$$

Учитывая выражение (2.127), получим

$$\underline{U}_{A0} = 0, \quad (2.137)$$

а с учетом выражения (2.129) получим $-\underline{I}_{a20} \underline{Z}_2 = 0$.

Откуда

$$\underline{I}_{a20} = 0. \quad (2.138)$$

С учетом выражения (2.131) получим $-\underline{I}_{a30} \underline{Z}_3 = 0$.

Тогда

$$\underline{I}_{a30} = 0. \quad (2.139)$$

Из выражения (2.137) следует, что система фазных напряжений первичной стороны не содержит составляющих нулевой последовательности и является уравновешенной.

Из выражений (2.138) и (2.139) следует, что фазные токи вторичной обмотки трансформатора не содержат составляющих нулевой последовательности. Следовательно, система фазных токов является уравновешенной:

$$\underline{I}_a + \underline{I}_b + \underline{I}_c = 0. \quad (2.140)$$

Анализируя выражения (2.129), (2.131), (2.137), (2.138) и (2.139), видим, что составляющие нулевой последовательности отсутствуют и токах, и в напряжениях как первичной, так и вторичной стороны трансформатора. Тогда выражения (2.132) и (2.133) примут вид:

$$\underline{U}_A - \underline{I}_A \underline{Z}_1 + \underline{I}_{a2} \underline{Z}_2 = \underline{U}_{a2}; \quad (2.141)$$

$$\underline{U}_A - \underline{I}_A \underline{Z}_1 + \underline{I}_{a3} \underline{Z}_3 = \underline{U}_{a3}. \quad (2.142)$$

Аналогично получим для фаз B и C:

$$\underline{U}_B - \underline{I}_B \underline{Z}_1 + \underline{I}_{b2} \underline{Z}_2 = \underline{U}_{b2}; \quad (2.143)$$

$$\underline{U}_B - \underline{I}_B \underline{Z}_1 + \underline{I}_{b3} \underline{Z}_3 = \underline{U}_{b3}; \quad (2.144)$$

$$\underline{U}_C - \underline{I}_C \underline{Z}_1 + \underline{I}_{c2} \underline{Z}_2 = \underline{U}_{c2}; \quad (2.145)$$

$$\underline{U}_C - \underline{I}_C \underline{Z}_1 + \underline{I}_{c3} \underline{Z}_3 = \underline{U}_{c3}. \quad (2.146)$$

Напряжения вторичных обмоток трансформатора равны геометрической сумме напряжений полуобмоток каждой фазы:

$$\begin{aligned} \underline{U}_a &= \underline{U}_{a3} - \underline{U}_{b2} = \underline{U}_{ab}; \\ \underline{U}_b &= \underline{U}_{b3} - \underline{U}_{c2} = \underline{U}_{bc}; \\ \underline{U}_c &= \underline{U}_{c3} - \underline{U}_{a2} = \underline{U}_{ac}, \end{aligned} \quad (2.147)$$

где $\underline{U}_a, \underline{U}_b, \underline{U}_c$ – вторичные фазные напряжения трансформатора;
 $\underline{U}_{ab}, \underline{U}_{ac}, \underline{U}_{bc}$ – вторичные линейные напряжения трансформатора.

Так как вторичные обмотки трансформатора соединены в треугольник, то вторичные фазные напряжения равны линейным.

Токи в полуобмотках вторичной цепи трансформатора будут равны:

$$\begin{aligned} \underline{I}_{a3} &= -\underline{I}_{b2} = \underline{I}_a; \\ \underline{I}_{b3} &= -\underline{I}_{c2} = \underline{I}_b; \\ \underline{I}_{c3} &= -\underline{I}_{a2} = \underline{I}_c. \end{aligned} \quad (2.148)$$

Вычтем выражение (2.143) из (2.142), (2.145) из (2.144), (2.141) из (2.146). Принимая $\underline{Z}_2 + \underline{Z}_3 = \underline{Z}_{2-3}$, с учетом выражений (2.147) и (2.148), получим:

$$\begin{aligned} \underline{U}_A - \underline{I}_A \underline{Z}_1 + \underline{I}_{a3} \underline{Z}_3 - (\underline{U}_B - \underline{I}_B \underline{Z}_1 + \underline{I}_{b2} \underline{Z}_2) &= \underline{U}_{a3} - \underline{U}_{b2}; \\ \underline{U}_{BA} - (\underline{I}_A - \underline{I}_B) \underline{Z}_1 + \underline{I}_a \underline{Z}_{2-3} &= \underline{U}_a; \end{aligned} \quad (2.149)$$

$$\begin{aligned} \underline{U}_B - \underline{I}_B \underline{Z}_1 + \underline{I}_{b3} \underline{Z}_3 - (\underline{U}_C - \underline{I}_C \underline{Z}_1 + \underline{I}_{c2} \underline{Z}_2) &= \underline{U}_{b3} - \underline{U}_{c2}; \\ \underline{U}_{CB} - (\underline{I}_B - \underline{I}_C) \underline{Z}_1 + \underline{I}_b \underline{Z}_{2-3} &= \underline{U}_b; \end{aligned} \quad (2.150)$$

$$\begin{aligned} \underline{U}_C - \underline{I}_C \underline{Z}_1 + \underline{I}_{c3} \underline{Z}_3 - (\underline{U}_A - \underline{I}_A \underline{Z}_1 + \underline{I}_{a2} \underline{Z}_2) &= \underline{U}_{c3} - \underline{U}_{a2}; \\ \underline{U}_{AC} - (\underline{I}_C - \underline{I}_A) \underline{Z}_1 + \underline{I}_c \underline{Z}_{2-3} &= \underline{U}_c. \end{aligned} \quad (2.151)$$

Токи в линиях вторичной цепи равны геометрическим разностям фазных токов вторичной обмотки. На основании рис. 2.31 будут справедливы следующие уравнения:

$$\begin{aligned} \underline{U}_a &= -(\underline{I}_a - \underline{I}_c) \underline{Z}_a + (\underline{I}_b - \underline{I}_a) \underline{Z}_b; \\ \underline{U}_b &= -(\underline{I}_b - \underline{I}_a) \underline{Z}_b + (\underline{I}_c - \underline{I}_b) \underline{Z}_c; \\ \underline{U}_c &= -(\underline{I}_c - \underline{I}_b) \underline{Z}_c + (\underline{I}_a - \underline{I}_c) \underline{Z}_a, \end{aligned} \quad (2.152)$$

где $\underline{Z}_a, \underline{Z}_b, \underline{Z}_c$ – сопротивления нагрузки в фазах a, b, c соответственно.

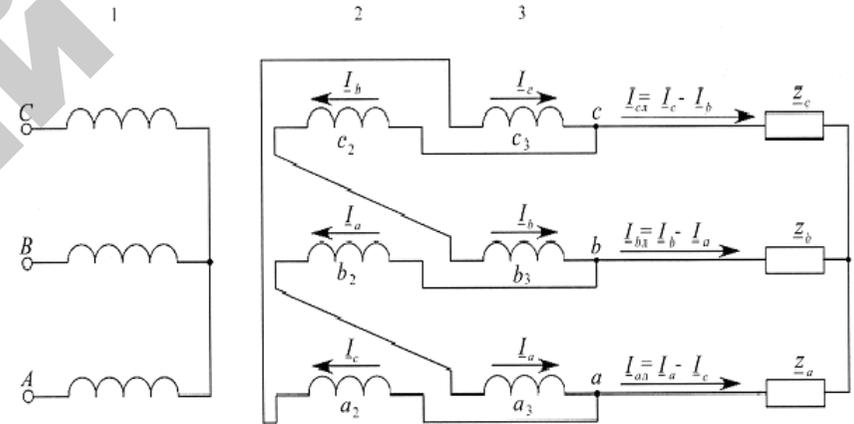


Рис. 2.31. Общий случай несимметричной работы трансформатора:
 1 – первичная обмотка трансформатора; 2 и 3 – вторичные обмотки, состоящие из двух одинаковых половин; Z_a, Z_b, Z_c – нагрузки, соответственно, в фазах a, b, c

Подставив выражения (2.152) в (2.149) и (2.150) в (2.151), получим:

$$\begin{aligned} \underline{U}_{BA} - (\underline{I}_A - \underline{I}_B) \underline{Z}_1 + \underline{I}_a \underline{Z}_{2-3} &= -(\underline{I}_a - \underline{I}_c) \underline{Z}_a + (\underline{I}_b - \underline{I}_a) \underline{Z}_b; \\ \underline{U}_{BA} - (\underline{I}_A - \underline{I}_B) \underline{Z}_1 + \underline{I}_a (\underline{Z}_{2-3} + \underline{Z}_a + \underline{Z}_b) - \underline{I}_b \underline{Z}_b - \underline{I}_c \underline{Z}_a &= 0; \end{aligned} \quad (2.153)$$

$$\begin{aligned} \underline{U}_{CB} - (\underline{I}_B - \underline{I}_C)\underline{Z}_1 + \underline{I}_b\underline{Z}_{2-3} &= -(\underline{I}_b - \underline{I}_a)\underline{Z}_b + (\underline{I}_c - \underline{I}_b)\underline{Z}_c; \\ \underline{U}_{CB} - (\underline{I}_B - \underline{I}_C)\underline{Z}_1 + \underline{I}_b(\underline{Z}_{2-3} + \underline{Z}_b + \underline{Z}_c) - \underline{I}_c\underline{Z}_c - \underline{I}_a\underline{Z}_b &= 0; \end{aligned} \quad (2.154)$$

$$\begin{aligned} \underline{U}_{AC} - (\underline{I}_C - \underline{I}_A)\underline{Z}_1 + \underline{I}_c\underline{Z}_{2-3} &= -(\underline{I}_c - \underline{I}_b)\underline{Z}_c + (\underline{I}_a - \underline{I}_c)\underline{Z}_a; \\ \underline{U}_{AC} - (\underline{I}_C - \underline{I}_A)\underline{Z}_1 + \underline{I}_c(\underline{Z}_{2-3} + \underline{Z}_a + \underline{Z}_c) - \underline{I}_a\underline{Z}_a - \underline{I}_b\underline{Z}_c &= 0. \end{aligned} \quad (2.155)$$

Из схемы замещения трансформатора (см. рис. 2.30) видно, что первичные и вторичные токи трансформатора связаны соотношениями:

$$\begin{aligned} \underline{I}_A + \underline{I}_{a2} + \underline{I}_{a3} &= \underline{I}_A + \underline{I}_a - \underline{I}_c = 0; \\ \underline{I}_B + \underline{I}_{b2} + \underline{I}_{b3} &= \underline{I}_B + \underline{I}_b - \underline{I}_a = 0; \\ \underline{I}_C + \underline{I}_{c2} + \underline{I}_{c3} &= \underline{I}_C + \underline{I}_c - \underline{I}_b = 0, \end{aligned} \quad (2.156)$$

откуда

$$\begin{aligned} \underline{I}_A &= \underline{I}_c - \underline{I}_a; \\ \underline{I}_B &= \underline{I}_a - \underline{I}_b; \\ \underline{I}_C &= \underline{I}_b - \underline{I}_c. \end{aligned} \quad (2.157)$$

Подставим выражения (2.157) в выражения (2.153)–(2.155). Получим окончательно

$$\begin{aligned} \underline{U}_{BA} - (\underline{I}_c - \underline{I}_a - \underline{I}_a + \underline{I}_b)\underline{Z}_1 + \underline{I}_a(\underline{Z}_{2-3} + \underline{Z}_a + \underline{Z}_b) - \underline{I}_b\underline{Z}_b - \underline{I}_c\underline{Z}_a &= 0; \\ \underline{I}_a(2\underline{Z}_1 + \underline{Z}_{2-3} + \underline{Z}_a + \underline{Z}_b) - \underline{I}_b(\underline{Z}_1 + \underline{Z}_b) - \underline{I}_c(\underline{Z}_1 + \underline{Z}_a) &= \underline{U}_{AB}; \end{aligned} \quad (2.158)$$

$$\begin{aligned} \underline{U}_{CB} - (\underline{I}_a - \underline{I}_b - \underline{I}_b + \underline{I}_c)\underline{Z}_1 + \underline{I}_b(\underline{Z}_{2-3} + \underline{Z}_b + \underline{Z}_c) - \underline{I}_c\underline{Z}_c - \underline{I}_a\underline{Z}_b &= 0; \\ -\underline{I}_a(\underline{Z}_1 + \underline{Z}_b) + \underline{I}_b(2\underline{Z}_1 + \underline{Z}_{2-3} + \underline{Z}_b + \underline{Z}_c) - \underline{I}_c(\underline{Z}_1 + \underline{Z}_c) &= \underline{U}_{BC}; \end{aligned} \quad (2.159)$$

$$\begin{aligned} \underline{U}_{AC} - (\underline{I}_b - \underline{I}_c - \underline{I}_c + \underline{I}_a)\underline{Z}_1 + \underline{I}_c(\underline{Z}_{2-3} + \underline{Z}_a + \underline{Z}_c) - \underline{I}_a\underline{Z}_a - \underline{I}_b\underline{Z}_c &= 0; \\ -\underline{I}_a(\underline{Z}_1 + \underline{Z}_a) - \underline{I}_b(\underline{Z}_1 + \underline{Z}_c) + \underline{I}_c(2\underline{Z}_1 + \underline{Z}_{2-3} + \underline{Z}_a + \underline{Z}_c) &= \underline{U}_{CA}. \end{aligned} \quad (2.160)$$

Токи вторичной стороны трансформатора. Для нахождения токов, протекающих по фазным обмоткам вторичной стороны трансформатора, решим методом Крамера уравнения (2.158), (2.159), (2.160):

$$\underline{I}_a = \frac{\Delta_1}{\Delta}; \quad (2.161)$$

$$\underline{I}_b = \frac{\Delta_2}{\Delta}; \quad (2.162)$$

$$\underline{I}_c = \frac{\Delta_3}{\Delta}; \quad (2.163)$$

где

$$\begin{aligned} \Delta &= (2\underline{Z}_1 + \underline{Z}_{2-3} + \underline{Z}_a + \underline{Z}_b)(2\underline{Z}_1 + \underline{Z}_{2-3} + \underline{Z}_b + \underline{Z}_c)(2\underline{Z}_1 + \underline{Z}_{2-3} + \underline{Z}_a + \underline{Z}_c) - \\ &- 2(\underline{Z}_1 + \underline{Z}_a)(\underline{Z}_1 + \underline{Z}_b)(\underline{Z}_1 + \underline{Z}_c) - (2\underline{Z}_1 + \underline{Z}_{2-3} + \underline{Z}_b + \underline{Z}_c)(\underline{Z}_1 + \underline{Z}_a)^2 - \\ &- (2\underline{Z}_1 + \underline{Z}_{2-3} + \underline{Z}_a + \underline{Z}_c)(\underline{Z}_1 + \underline{Z}_b)^2 - (2\underline{Z}_1 + \underline{Z}_{2-3} + \underline{Z}_a + \underline{Z}_b)(\underline{Z}_1 + \underline{Z}_c)^2; \end{aligned} \quad (2.164)$$

$$\begin{aligned} \Delta_1 &= \underline{U}_{AB}[(2\underline{Z}_1 + \underline{Z}_{2-3} + \underline{Z}_b + \underline{Z}_c)(2\underline{Z}_1 + \underline{Z}_{2-3} + \underline{Z}_a + \underline{Z}_c) - \\ &- (\underline{Z}_1 + \underline{Z}_c)^2] + \underline{U}_{CA}[(\underline{Z}_1 + \underline{Z}_b)(\underline{Z}_1 + \underline{Z}_c) + \\ &+ (\underline{Z}_1 + \underline{Z}_a)(2\underline{Z}_1 + \underline{Z}_{2-3} + \underline{Z}_b + \underline{Z}_c)] + \underline{U}_{BC}[(\underline{Z}_1 + \underline{Z}_a)(\underline{Z}_1 + \underline{Z}_c) + \\ &+ (\underline{Z}_1 + \underline{Z}_b)(2\underline{Z}_1 + \underline{Z}_{2-3} + \underline{Z}_c + \underline{Z}_a)]; \end{aligned} \quad (2.165)$$

$$\begin{aligned} \Delta_2 &= \underline{U}_{BC}[(2\underline{Z}_1 + \underline{Z}_{2-3} + \underline{Z}_a + \underline{Z}_b)(2\underline{Z}_1 + \underline{Z}_{2-3} + \underline{Z}_a + \underline{Z}_c) - \\ &- (\underline{Z}_1 + \underline{Z}_a)^2] + \underline{U}_{AB}[(\underline{Z}_1 + \underline{Z}_a)(\underline{Z}_1 + \underline{Z}_c) + \\ &+ (\underline{Z}_1 + \underline{Z}_b)(2\underline{Z}_1 + \underline{Z}_{2-3} + \underline{Z}_a + \underline{Z}_c)] + \underline{U}_{CA}[(\underline{Z}_1 + \underline{Z}_a)(\underline{Z}_1 + \underline{Z}_b) + \\ &+ (\underline{Z}_1 + \underline{Z}_c)(2\underline{Z}_1 + \underline{Z}_{2-3} + \underline{Z}_a + \underline{Z}_b)]; \end{aligned} \quad (2.166)$$

$$\begin{aligned} \Delta_3 &= \underline{U}_{CA}[(2\underline{Z}_1 + \underline{Z}_{2-3} + \underline{Z}_a + \underline{Z}_b)(2\underline{Z}_1 + \underline{Z}_{2-3} + \underline{Z}_b + \underline{Z}_c) - \\ &- (\underline{Z}_1 + \underline{Z}_b)^2] + \underline{U}_{BC}[(\underline{Z}_1 + \underline{Z}_a)(\underline{Z}_1 + \underline{Z}_b) + \\ &+ (\underline{Z}_1 + \underline{Z}_c)(2\underline{Z}_1 + \underline{Z}_{2-3} + \underline{Z}_a + \underline{Z}_b)] + \underline{U}_{AB}[(\underline{Z}_1 + \underline{Z}_b)(\underline{Z}_1 + \underline{Z}_c) + \\ &+ (\underline{Z}_1 + \underline{Z}_a)(2\underline{Z}_1 + \underline{Z}_{2-3} + \underline{Z}_b + \underline{Z}_c)]. \end{aligned} \quad (2.167)$$

Вторичные линейные токи находятся из фазных с помощью первого закона Кирхгофа (см. рис. 2.31).

Вычтя из выражения (2.161) выражение (2.163), получим линейный ток фазы a :

$$\underline{I}_{aл} = \underline{I}_a - \underline{I}_c. \quad (2.168)$$

Вычтя из выражения (2.162) выражение (2.161), получим линейный ток фазы b :

$$\underline{I}_{bл} = \underline{I}_b - \underline{I}_a. \quad (2.169)$$

Вычтя из выражения (2.163) выражение (2.162), получим линейный ток фазы c :

$$\underline{I}_{cл} = \underline{I}_c - \underline{I}_b. \quad (2.170)$$

Первичные фазные токи, с учетом выражений (2.157), будут равны:

$$\underline{I}_A = \underline{I}_c - \underline{I}_a; \quad (2.171)$$

$$\underline{I}_B = \underline{I}_a - \underline{I}_b; \quad (2.172)$$

$$\underline{I}_C = \underline{I}_b - \underline{I}_c. \quad (2.173)$$

Первичные фазные напряжения и первичные фазные токи, определенные из выражений (2.171)–(2.173), взаимосвязаны между собой:

$$\underline{U}_A - \underline{I}_A \underline{Z}_1 = -\underline{E}_A;$$

$$\underline{U}_B - \underline{I}_B \underline{Z}_1 = -\underline{E}_B; \quad (2.174)$$

$$\underline{U}_C - \underline{I}_C \underline{Z}_1 = -\underline{E}_C,$$

где $\underline{E}_A, \underline{E}_B, \underline{E}_C$ – ЭДС первичных обмоток фаз A, B, C соответственно.

Сложим соответственно левые и правые части выражений (2.174):

$$\underline{U}_A + \underline{U}_B + \underline{U}_C - (\underline{I}_A + \underline{I}_B + \underline{I}_C) \underline{Z}_1 = -(\underline{E}_A + \underline{E}_B + \underline{E}_C). \quad (2.175)$$

Так как ЭДС пропорциональны вызывающим их магнитным потокам, сумма которых в стержнях магнитопровода равна нулю, то $\underline{E}_A + \underline{E}_B + \underline{E}_C = 0$.

С учетом выражения (2.1), $(\underline{I}_A + \underline{I}_B + \underline{I}_C) \underline{Z}_1 = 0$.

Тогда выражение (2.175) примет вид:

$$\underline{U}_A + \underline{U}_B + \underline{U}_C = 0. \quad (2.176)$$

Линейные напряжения есть разность соответствующих фазных напряжений:

$$\underline{U}_{AB} = \underline{U}_A - \underline{U}_B;$$

$$\underline{U}_{BC} = \underline{U}_B - \underline{U}_C; \quad (2.177)$$

$$\underline{U}_{CA} = \underline{U}_C - \underline{U}_A.$$

Вычитая из стоящего слева выражения предыдущее, с учетом выражения (2.163), получим

$$\underline{U}_{AB} - \underline{U}_{CA} = 3\underline{U}_A;$$

$$\underline{U}_{BC} - \underline{U}_{AB} = 3\underline{U}_B; \quad (2.178)$$

$$\underline{U}_{CA} - \underline{U}_{BC} = 3\underline{U}_C,$$

откуда

$$\underline{U}_A = \frac{\underline{U}_{AB} - \underline{U}_{CA}}{3};$$

$$\underline{U}_B = \frac{\underline{U}_{BC} - \underline{U}_{AB}}{3}; \quad (2.179)$$

$$\underline{U}_C = \frac{\underline{U}_{CA} - \underline{U}_{BC}}{3}.$$

Из выражения (2.179) следует, что центр «звезды» фазных напряжений первичной обмотки лежит в центре тяжести треугольника линейных напряжений. При симметрии подведенных линейных напряжений фазные напряжения будут симметричны независимо от несимметрии нагрузки. Несимметрия вторичных напряжений возникает вследствие различных падений напряжения в отдельных фазах при несимметричной нагрузке фаз.

2.4.2.2. Экспериментальные исследования симметрирующей способности трансформатора Y/Δ с зигзагом

Методика исследований. Исследования трансформатора со схемой соединения обмоток Y/Δ с зигзагом при несимметричной нагрузке фаз проводились В. М. Збрадыгой с использованием трансформатора типа ТСЗ-1,6/0,38, изготовленного в лабораторных условиях [142]. Для сравнительной оценки были взяты рекомендованные к применению в сельских электросетях схемы соединения обмоток трансформаторов с нулевым проводом Y/Y_n , Δ/Y_n , Y/Z_n , а также схема без нулевого провода Y/Δ . Схемы получались путем смены обмоток на одном и том же магнитопроводе. В результате исследований определялись напряжения первичной и вторичной сторон трансформаторов и коэффициенты несимметрии напряжений.

При проведении эксперимента были приняты следующие режимы нагрузки:

1. Для схем с нулевым проводом ток в одной из фаз изменялся в пределах от $0,1 I_n$ до $1,2 I_n$, а в двух других фазах был равен нулю. Для схем без нулевого провода нагрузка включалась только на одно из трех линейных напряжений и изменялась от $0,1 I_n$ до $1,2 I_n$.

2. Для схем с нулевым проводом ток нагрузки в двух фазах изменялся от $0,1 I_n$ до $1,2 I_n$, а в третьей фазе он был равен нулю. Для схем без нулевого провода нагрузка включалась на два из трех линейных напряжений и изменялась от $0,1 I_n$ до $1,2 I_n$.

В указанных режимах работы измерялись линейные и фазные напряжения трансформаторов высшей и низшей сторон при по-

мощи вольтметров, токи низшей стороны – при помощи амперметров, коэффициенты несимметрии напряжений – по обратной и нулевой последовательности при помощи устройства контроля параметров качества электроэнергии УК-1 для всех вышеназванных схем соединения обмоток.

Работа трансформатора при несимметричной нагрузке.

Экспериментальные исследования подтвердили теоретические выводы о том, что у трансформатора со схемой соединения обмоток Y/Δ с зигзагом не наблюдается искажения системы фазных и линейных напряжений первичной стороны даже при глубокой несимметрии нагрузки [144, 151].

На вторичной стороне имеется искажение симметрии напряжений, различное для разных схем соединения обмоток, величина которой возрастает с ростом несимметрии нагрузки. Одновременно происходит уменьшение вторичных напряжений трансформаторов.

При номинальной величине нагрузки искажения вторичных напряжений имеют следующие значения.

Для схемы соединения обмоток Y/Δ с зигзагом максимальное расхождение между напряжениями вторичной стороны в режиме $I_{ab} = I_n$, $I_{bc} = 0$, $I_{ac} = 0$ составляет 3,1 %; в режиме $I_{ab} = I_n$, $I_{bc} = I_n$, $I_{ac} = 0-3,6$ %. При этом отклонение напряжений U_{ab} , U_{bc} , U_{ac} от напряжения холостого хода в режиме $I_{ab} = I_n$, $I_{bc} = 0$, $I_{ac} = 0$ составляет соответственно -1,6 %, -0,5 %, -3,6 %; в режиме $I_{ab} = I_n$, $I_{bc} = I_n$, $I_{ac} = 0$ составляет -5,4 %, -1,8 %, -4,0 %.

При соединении обмоток по схеме Y/Δ максимальное расхождение между напряжениями вторичной стороны в режиме $I_{ab} = I_n$, $I_{bc} = 0$, $I_{ac} = 0$ составляет 3,1 %; в режиме $I_{ab} = I_n$, $I_{bc} = I_n$, $I_{ac} = 0$ составляет 3,6 %. При этом отклонение напряжений U_{ab} , U_{bc} , U_{ac} от напряжения холостого хода в режиме $I_{ab} = I_n$, $I_{bc} = 0$, $I_{ac} = 0$ составляет соответственно -1,7 %, -0,8 %, -3,9 %; в режиме $I_{ab} = I_n$, $I_{bc} = I_n$, $I_{ac} = 0$ составляет -5,6 %, -2,0 %, -4,6 %.

В схемах с нулевым проводом нагрузка может быть включена как на фазные, так и на линейные напряжения. Поэтому в этих схемах имеет большое значение симметрия и уровни как линейных, так и фазных напряжений при несимметричной нагрузке.

Так, для схемы соединения обмоток Y/Y_n в режиме $I_a = I_n$, $I_b = 0$, $I_c = 0$ максимальное расхождение между линейными напря-

жениями вторичной стороны составляет 5,2 %; между фазными напряжениями – 17,7 %. Отклонение линейных напряжений U_{ab} , U_{bc} , U_{ac} от напряжения холостого хода составляет соответственно –4,3 %, +0,9 %, –3,8 %; отклонение фазных напряжений U_a , U_b , U_c составляет –8,7 %, –3,5 %, +9,0 %. В режиме $I_a = I_b = I_c = 0$ максимальное расхождение между линейными напряжениями вторичной стороны составляет 4,8 %; между фазными напряжениями – 17,1 %. Отклонение линейных напряжений U_{ab} , U_{bc} , U_{ac} от напряжения холостого хода составляет соответственно –7,0 %, –2,2 %, –2,6 %; отклонение фазных напряжений U_a , U_b , U_c составляет +1,1 %, –14,4 %, +2,7 % соответственно.

Для схемы соединения обмоток Δ/Y_H в режиме $I_a = I_b = 0$, $I_c = 0$ максимальное расхождение между линейными напряжениями вторичной стороны составляет 3,8 %; между фазными напряжениями – 7,5 %. Отклонение линейных напряжений U_{ab} , U_{bc} , U_{ac} от напряжения холостого хода составляет соответственно –3,5 %, 0 %, –3,8 %; отклонение фазных напряжений U_a , U_b , U_c составляет –7,5 %, 0 %, 0 %. В режиме $I_a = I_b = I_c = 0$ максимальное расхождение между линейными напряжениями вторичной стороны составляет 4,4 %, между фазными напряжениями – 7,5 %. Отклонение линейных напряжений U_{ab} , U_{bc} , U_{ac} от напряжения холостого хода составляет соответственно –6,6 %, –2,2 %, –3,1 %; отклонение фазных напряжений U_a , U_b , U_c составляет –6,8 %, –7,5 %, 0 % соответственно.

Для схемы соединения обмоток Y/Z_H в режиме $I_a = I_b = 0$, $I_c = 0$ максимальное расхождение между линейными напряжениями вторичной стороны составляет 3,2 %; между фазными напряжениями – 6,0 %. Отклонение линейных напряжений U_{ab} , U_{bc} , U_{ac} от напряжения холостого хода составляет соответственно –3,2 %, 0 %, –3,2 %; отклонение фазных напряжений U_a , U_b , U_c составляет –6,0 %, 0 %, 0 % соответственно. В режиме $I_a = I_b = I_c = 0$ максимальное расхождение между линейными напряжениями вторичной стороны составляет 4,2 %; между фазными напряжениями – 6,9 %. Отклонение линейных напряжений U_{ab} , U_{bc} , U_{ac} от напряжения холостого хода составляет соответственно

–6,9 %, –2,7 %, –2,7 %; отклонение фазных напряжений U_a , U_b , U_c составляет –6,9 %, –4,2 %, 0 % соответственно.

Несимметрия напряжений для схем без нулевого провода характеризуется коэффициентом несимметрии по обратной последовательности, а для схем с нулевым проводом – коэффициентами несимметрии по обратной и по нулевой последовательности [1]. Результаты исследований зависимости этих коэффициентов схем (рис. 2.32, 2.33) показывают, что рост несимметрии нагрузки вызывает увеличение коэффициентов несимметрии напряжений.

Схема соединения обмоток Y/Δ с зигзагом обеспечивает наиболее низкий уровень несимметрии вторичных напряжений по сравнению с другими исследованными схемами.

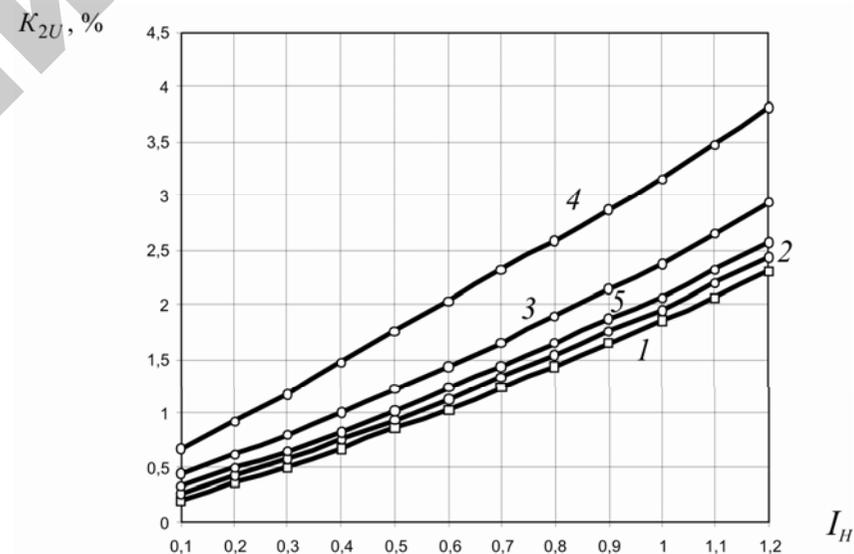


Рис. 2.32. Зависимости $K_{2U} = f(I)$ при работе трансформатора на однофазную нагрузку:
 1 – схема Y/Δ с зигзагом; 2 – схема Y/Δ ; 3 – схема Δ/Y_H ;
 4 – схема Y/Y_H ; 5 – схема Y/Z_H

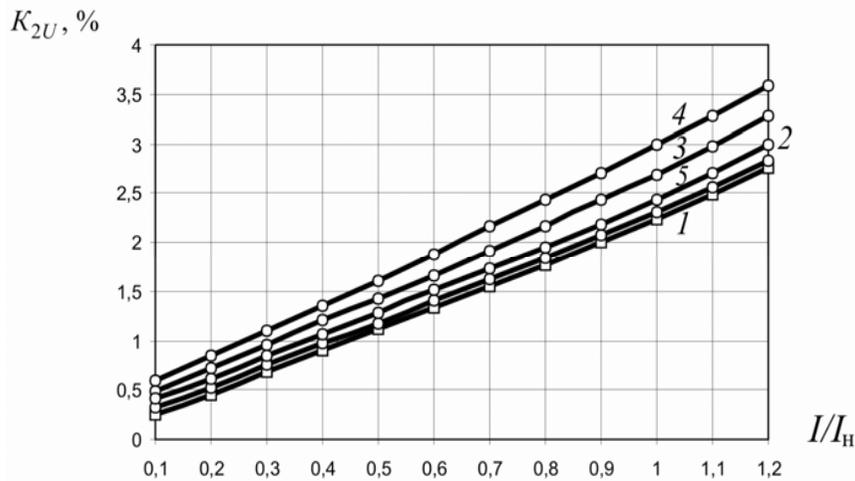


Рис. 2.33. Зависимости $K_{2U} = f(I)$ при работе трансформатора на двухфазную нагрузку:
 1 – схема Y/Δ с зигзагом; 2 – схема Y/Δ ;
 3 – схема Δ/Y_H ; 4 – схема Y/Y_H ; 5 – схема Y/Z_H

При номинальном значении однофазной нагрузки коэффициент несимметрии напряжений по обратной последовательности равен 1,91 %, что не превышает нормально допустимого стандартом значения [1]. При номинальном значении двухфазной нагрузки он равен 2,24 %, что на 0,24 % выше нормально допустимого, но ниже предельно допустимого значения [1].

В реальных электроустановках маловероятно возникновение такой глубокой несимметрии нагрузки, которая создавалась при проведении эксперимента в лабораторных условиях. Поэтому можно утверждать, что схема соединения обмоток трансформатора Y/Δ с зигзагом обеспечивает симметрию напряжений в допустимых стандартом пределах значений и может успешно применяться в электроустановках сельскохозяйственных потребителей при несимметрии нагрузки.

3. ПАРАЛЛЕЛЬНАЯ РАБОТА СИММЕТРИРУЮЩИХ ТРАНСФОРМАТОРОВ С ТРАНСФОРМАТОРОМ Y/Y_H

3.1. Задачи и методика исследования

Технические характеристики трансформаторов со схемами соединения обмоток Y/Y_H –разомкнутый треугольник и Y/Y_H СУ (напряжения высшей и низшей сторон, коэффициенты трансформации, группы соединения) практически одинаковые. Поэтому условия параллельной работы этих трансформаторов с трансформаторами Y/Y_H не будут отличаться. Это теоретически и экспериментально доказано исследованиями Н. Е. Шевчика [89]. Трансформатор со схемой соединения обмоток Y/Δ с зигзагом имеет одиннадцатую группу соединения обмоток. Он не может работать в параллель с трансформатором Y/Y_H . Поэтому в качестве примера приведем результаты экспериментальных исследований возможности параллельной работы только трансформатора Y/Y_H –разомкнутый треугольник с трансформатором Y/Y_H .

В результате экспериментальных исследований решались следующие задачи:

1. Экспериментальное определение напряжений и токов с первичной и вторичной сторон параллельно работающих пар трансформаторов Y/Y_H –разомкнутый треугольник и Y/Y_H , а также Y/Y_H и Y/Y_H при несимметричной нагрузке фаз.
2. Исследование влияния трансформатора Y/Y_H –разомкнутый треугольник на симметрирование напряжений с первичной и вторичной сторон при параллельной работе его с трансформатором Y/Y_H в несимметричных режимах.
3. Исследование распределения нагрузки между трансформаторами Y/Y_H –разомкнутый треугольник и Y/Y_H при их параллельной работе в несимметричных режимах.

Целью исследования являлась проверка возможности параллельной работы указанных трансформаторов при несимметричной нагрузке фаз. Эксперименты проводились в лабораторных

условиях на трансформаторах одного и того же типа ТС-1,5/0,38, на одном из которых были наложены компенсирующие витки. Последние в процессе эксперимента либо подключались, либо отключались в зависимости от того, какие схемы соединения обмоток трансформаторов должны были работать в параллель.

Для выявления возможности работы трансформатора Y/Y_n -разомкнутый треугольник в сетях с трансформаторами Y/Y_n исследования проводились методом сравнения указанных выше величин при параллельной работе двух трансформаторов с одинаковой схемой Y/Y_n и двух трансформаторов с разными схемами – Y/Y_n -разомкнутый треугольник и Y/Y_n .

Режимы работы пар трансформаторов принимались одинаковыми:

1) в одной из фаз ток равнялся номинальному и оставался неизменным, в двух других фазах ток изменялся от номинального значения до нуля на одну и ту же величину;

2) в двух фазах ток равнялся номинальному и оставался неизменным, в третьей – изменялся от номинального значения до нуля на одну и ту же величину.

Нужные несимметричные режимы устанавливались по величине тока в цепи нагрузки.

Расчетным путем по полученным данным найдены коэффициенты несимметрии напряжений по обратной и нулевой последовательности.

3.2. Экспериментальное определение параметров и исследование их зависимостей при параллельной работе трансформаторов на несимметричную нагрузку

При экспериментальной проверке возможностей параллельной работы трансформаторов Y/Y_n -разомкнутый треугольник и Y/Y_n замерялись токи и напряжение с высшей и низшей стороны параллельно работающих пар трансформаторов Y/Y_n , Y/Y_n и Y/Y_n , Y/Y_n -разомкнутый треугольник. По результатам экспериментов (табл. П7–П10) для наглядности построены зависимости фазных напряжений питающей сети (рис. 3.1, 3.2) и нагрузки от тока нагрузки (рис. 3.3, 3.4) [71]. Для удобства сравнения параллельной работы соответствующих пар трансформаторов кривые напряжений приведены на одном рисунке для одного и того же режима.

Анализ кривых напряжений (рис. 3.1) работы пар трансформаторов в режиме $I_a = I_n \div 0$, $I_b = I_c = I_n = \text{const}$ показывает, что при работе пары трансформаторов Y/Y_n -разомкнутый треугольник и Y/Y_n даже при глубокой несимметрии (работа в неполнофазном режиме $I_a = 0$) расхождение фазных напряжений сети значительно меньше, чем при параллельной работе пары трансформаторов Y/Y_n и Y/Y_n и составляет 5,7 % против 19,4 %. Максимальное отклонение фазного напряжения от номинального значения для пары Y/Y_n -разомкнутый треугольник и Y/Y_n составляет 3,5 %, в то время как для пары Y/Y_n и Y/Y_n – 13,7 %, то есть почти в 4 раза меньше.

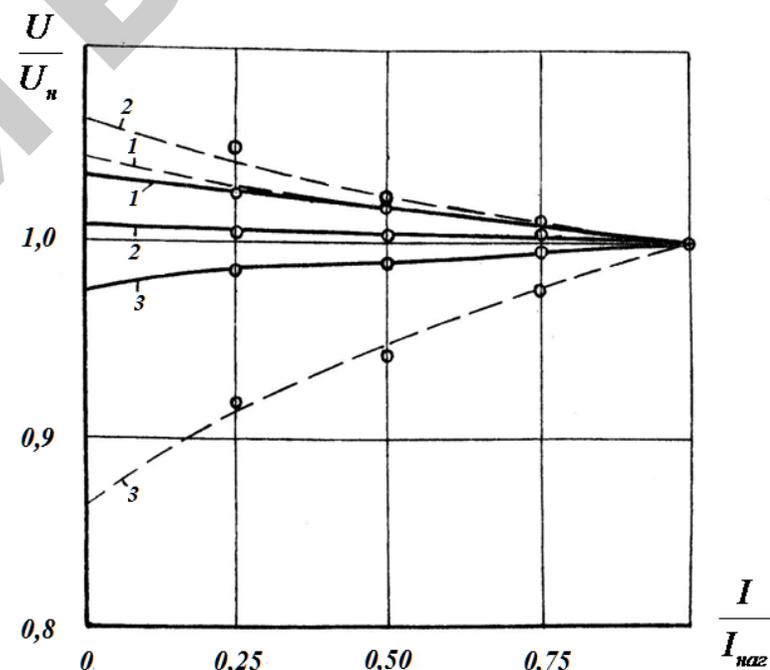


Рис. 3.1. Зависимость фазных напряжений питающей сети от тока нагрузки при параллельной работе пар трансформаторов Y/Y_n -разомкнутый треугольник, Y/Y_n и Y/Y_n , Y/Y_n (режим $I_a = I_n \div 0$, $I_b = I_c = I_n = \text{const}$):

- параллельная работа трансформаторов Y/Y_n -разомкнутый треугольник и Y/Y_n ;
- - - параллельная работа трансформаторов Y/Y_n и Y/Y_n ;
- 1 – фаза A; 2 – фаза B; 3 – фаза C

Подобный анализ кривых фазных напряжений (рис. 3.2) для режима $I_a = I_b = I_n \div 0$, $I_c = I_n = \text{const}$ показывает, что расхождение их и максимальное отклонение от номинального напряжения приблизительно в тех же пределах, что и для первого режима.

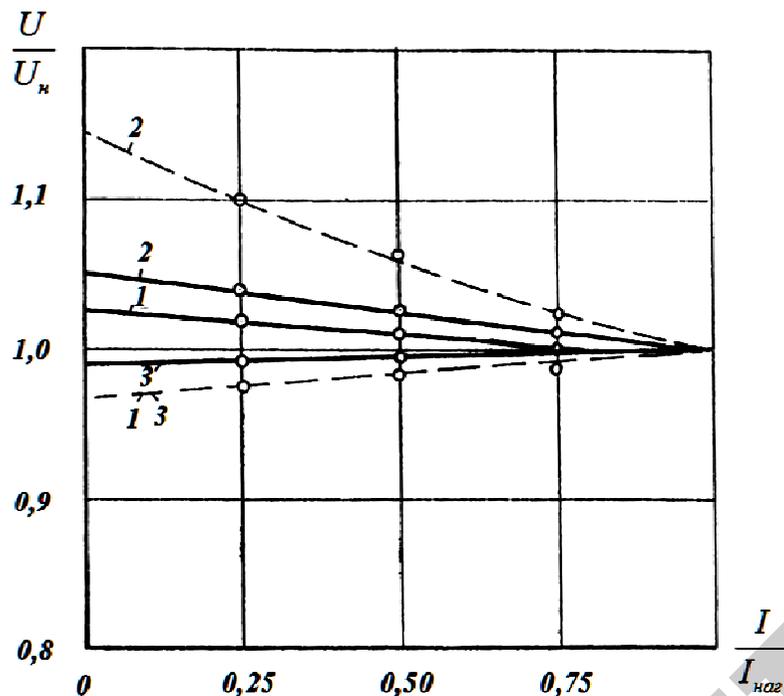


Рис. 3.2. Зависимость фазных напряжений питающей сети от тока нагрузки при параллельной работе

пар трансформаторов Y/Y_n –разомкнутый треугольник, Y/Y_n и Y/Y_n , Y/Y_n (режим $I_a = I_b = I_n \div 0$, $I_c = I_n = \text{const}$):

- параллельная работа трансформаторов Y/Y_n –разомкнутый треугольник, Y/Y_n ;
 - - - параллельная работа трансформаторов Y/Y_n и Y/Y_n ;
- 1 – фаза A; 2 – фаза B; 3 – фаза C

На рис. 3.3 приведены кривые зависимости фазных напряжений на нагрузке, питающейся от параллельно работающих пар трансформаторов со схемами соединения обмоток Y/Y_n –разомкнутый треугольник и Y/Y_n , а также Y/Y_n и Y/Y_n для режима работы $I_a = I_n \div 0$, $I_b = I_c = I_n = \text{const}$.

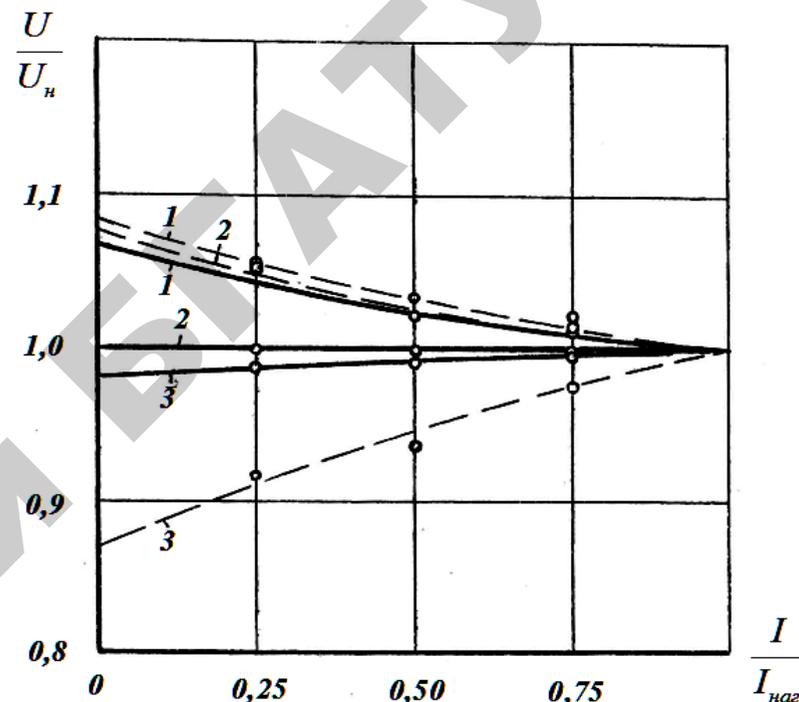


Рис. 3.3. Зависимость фазных напряжений на нагрузке от тока при параллельной работе пар трансформаторов Y/Y_n –разомкнутый треугольник, Y/Y_n и Y/Y_n , Y/Y_n (режим $I_a = I_n \div 0$, $I_b = I_c = I_n = \text{const}$):

- параллельная работа трансформаторов Y/Y_n –разомкнутый треугольник и Y/Y_n ;
 - - - параллельная работа трансформаторов Y/Y_n и Y/Y_n ;
- 1 – фаза a; 2 – фаза b; 3 – фаза c

Как видно из рис. 3.3, при параллельной работе пары трансформаторов Y/Y_n –разомкнутый треугольник и Y/Y_n максимальное расхождение фазных напряжений меньше, чем при параллельной работе пары трансформаторов Y/Y_n и Y/Y_n , и в процентном отношении соответственно составляет 8,1 и 21,9. Максимальное отклонение напряжения от номинального значения в первом случае равно 6,8 %, а при работе пары трансформаторов Y/Y_n и Y/Y_n – 13,8 %, то есть в 2 раза больше.

Кривые (рис. 3.4) характеризуют зависимость фазных напряжений нагрузки при питании ее от параллельно работающих пар

трансформаторов в режиме $I_a = I_b = I_n \div 0$, $I_c = I_n = \text{const}$ и показывают, что расхождение этих напряжений и их отклонение от номинального значения и по характеру и по величине практически соответствуют режиму $I_a = I_n \div 0$, $I_b = I_c = I_n = \text{const}$.

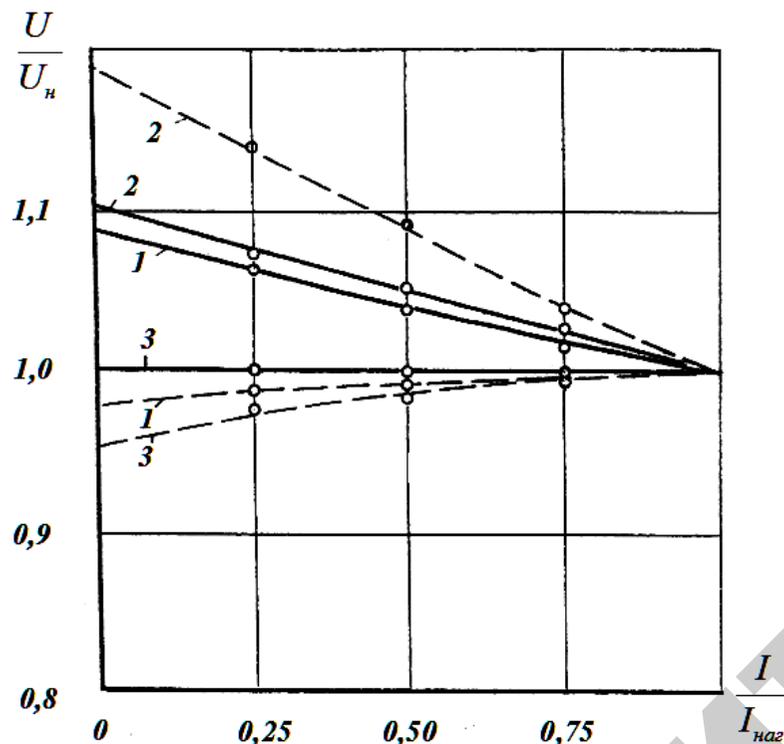


Рис. 3.4. Зависимость фазных напряжений на нагрузке от тока нагрузки при параллельной работе пар трансформаторов Y/Y_n –разомкнутый треугольник, Y/Y_n и Y/Y_n , Y/Y_n (режим $I_a = I_b = I_n \div 0$, $I_c = I_n = \text{const}$):
 ———— — параллельная работа трансформаторов Y/Y_n –разомкнутый треугольник и Y/Y_n ;
 - - - - - — параллельная работа трансформаторов Y/Y_n и Y/Y_n ;
 1 — фаза a; 2 — фаза b; 3 — фаза c

Следовательно, использование трансформатора Y/Y_n –разомкнутый треугольник при параллельной работе с трансформатором Y/Y_n дает возможность значительно снизить несимметрию фазных напряжений не только у потребителя, но и в сети, питающей трансформаторы.

Определенный интерес представляют данные замеров фазных напряжений на вводах параллельно работающих пар трансформаторов (табл. П9 и П10).

При параллельной работе двух трансформаторов со схемами соединения Y/Y_n на несимметричную нагрузку фазные напряжения обоих трансформаторов с высшей и низшей сторон одинаковы и соответствуют по характеру и величине работе одиночного трансформатора с такой же схемой.

Работа на ту же нагрузку двух трансформаторов, в которой один из них имеет схему Y/Y_n –разомкнутый треугольник, а другой — Y/Y_n , приводит к изменению картины напряжений на тех же выводах. Например, у трансформатора со схемой соединения обмоток Y/Y_n расхождение фазных напряжений и отклонение их от номинального значения значительно уменьшается по сравнению с работой пары трансформаторов с одинаковой схемой Y/Y_n . Однако у трансформатора Y/Y_n –разомкнутый треугольник эти величины несколько увеличиваются по сравнению с отдельно работающим трансформатором той же схемы. Это объясняется появлением уравнивающего тока, вызванного разностью потенциалов, обусловленных разницей смещения нулевых точек параллельно работающих трансформаторов.

3.3. Коэффициенты несимметрии напряжений по обратной и нулевой последовательности при параллельной работе пар трансформаторов Y/Y_n , Y/Y_n и Y/Y_n , Y/Y_n –разомкнутый треугольник

Способность трансформатора Y/Y_n –разомкнутый треугольник симметризовать напряжение, работая в параллель с трансформатором Y/Y_n при несимметричной нагрузке, определяется также по значению коэффициентов несимметрии напряжений по обратной и нулевой последовательности. Значения этих коэффициентов получены по формулам, приведенным в ГОСТ 13109–97. По результатам расчетов (табл. П11) построены зависимости коэффициентов K_{2U} и K_{0U} от изменяющегося тока нагрузки (рис. 3.5 и 3.6).

Зависимость коэффициента несимметрии напряжений по нулевой последовательности при работе трансформатора Y/Y_n –разомкнутый треугольник в параллель с трансформатором Y/Y_n в режиме $I_a = I_n \div 0$,

$I_b = I_c = I_n = \text{const}$ показывает уменьшение его величины и на нагрузке, и в сети по сравнению с параллельной работой пары трансформаторов Y/Y_n и Y/Y_n . Так, при глубокой несимметрии, когда $I_a = 0$ (рис. 3.5), значение этого коэффициента на нагрузке равно 5,3 %, в то время как во втором случае при тех же условиях $K_{0U} = 13,8$ %. В сети этот коэффициент соответственно равен 3,9 % и 12,0 %.

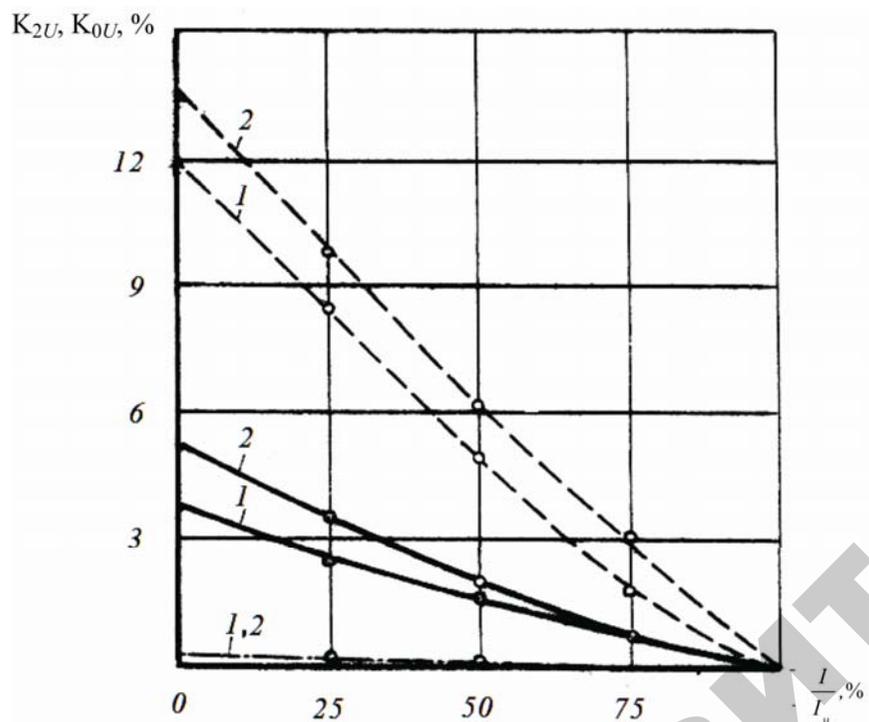


Рис. 3.5. Зависимость коэффициентов несимметрии напряжений по обратной и нулевой последовательности от тока нагрузки при параллельной работе пар трансформаторов Y/Y_n —разомкнутый треугольник, Y/Y_n и Y/Y_n , Y/Y_n (режим $I_a = I_n \neq 0$, $I_b = I_c = I_n = \text{const}$):

- — — — — K_{0U} при параллельной работе трансформаторов Y/Y_n —разомкнутый треугольник и Y/Y_n ;
 - — — — — K_{0U} при параллельной работе трансформаторов Y/Y_n и Y/Y_n ;
 - · — · — K_{2U} при параллельной работе трансформаторов;
- 1 — сеть; 2 — нагрузка

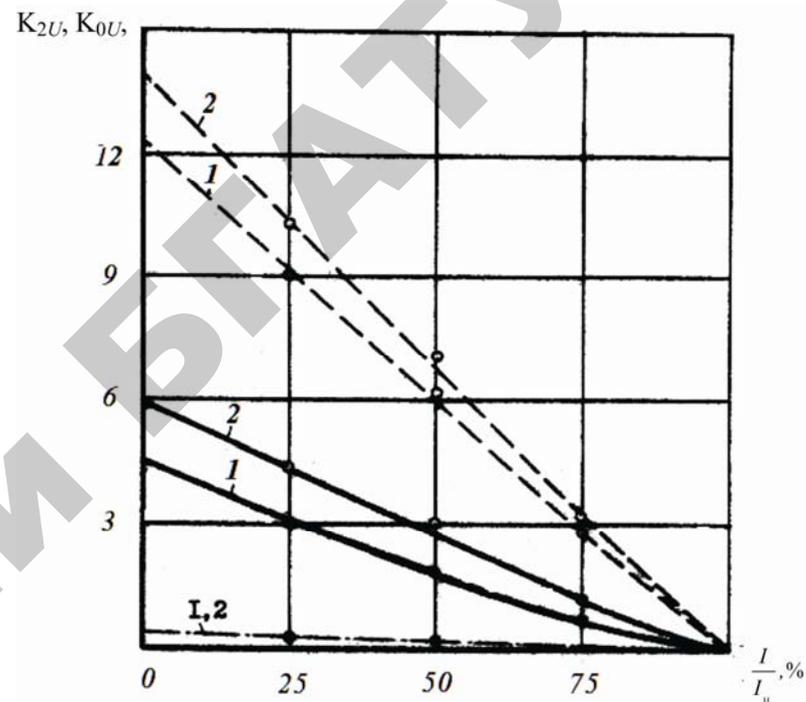


Рис. 3.6. Зависимость коэффициентов несимметрии напряжений по обратной и нулевой последовательности от тока нагрузки при параллельной работе пар трансформаторов Y/Y_n —разомкнутый треугольник, Y/Y_n и Y/Y_n , Y/Y_n (режим $I_a = I_b = I_n \neq 0$, $I_c = I_n = \text{const}$):

- — — — — K_{0U} при параллельной работе трансформаторов Y/Y_n —разомкнутый треугольник и Y/Y_n ;
 - — — — — K_{0U} при параллельной работе трансформаторов Y/Y_n и Y/Y_n ;
 - · — · — K_{2U} при параллельной работе трансформаторов;
- 1 — сеть; 2 — нагрузка

Картина работы указанных пар трансформаторов в режиме $I_a = I_b = I_n \neq 0$, $I_c = I_n = \text{const}$ по существу мало отличается от ранее рассмотренной (рис. 3.6).

Значения коэффициентов несимметрии напряжений, как и следовало ожидать, не изменяются независимо от схемы соединения параллельно работающих пар трансформаторов.

3.4. Распределение нагрузки между параллельно работающими трансформаторами со схемами соединения обмоток Y/Y_n -разомкнутый треугольник и Y/Y_n при несимметричной нагрузке

Вследствие того, что смещение нулевых точек параллельно работающих трансформаторов Y/Y_n -разомкнутый треугольник и Y/Y_n при несимметричной нагрузке фаз не одинаковое, создается разность потенциалов между одноименными фазами этих трансформаторов. Это вызывает появление одноименного тока, который тем выше, чем больше несимметрия нагрузки. При работе тех же трансформаторов в симметричном режиме уравнивающий ток отсутствует.

Определение уравнивающего тока производилось по следующей формуле:

$$I_{ур(a)} = \frac{I_{T1(a)} - I_{T2(a)}}{2},$$

где $I_{ур(a)}$ – уравнивающий ток в обмотках низшего напряжения фазы a ;

$I_{T1(a)}$ – ток в цепи обмотки низшего напряжения трансформатора Y/Y_n -разомкнутый треугольник фазы a ;

$I_{T2(a)}$ – ток в цепи обмотки низшего напряжения трансформатора Y/Y_n фазы a .

Как показали результаты расчетов, величина уравнивающих токов по фазам не одинакова. При глубокой несимметрии (работа в неполнофазных режимах, когда $I_a = 0$, $I_b = I_c = \text{const}$) величина уравнивающего тока достигает в одной из фаз 25 % номинального, а в режиме, когда $I_a = I_b = 0$, $I_c = I_n - 37,5\%$. Однако такие режимы соответствуют аварийному состоянию сети и в расчет не должны приниматься. Для реальных режимов работы трансформаторов в сельских электрических сетях величины уравнивающих токов находятся в допустимых пределах.

Величины уравнивающих токов с высшей стороны параллельно работающих трансформаторов (как показали эксперименты) незначительны.

Как известно, нагрузка электрических машин и аппаратов определяется силой тока, протекающего по обмоткам. Экспериментальные исследования параллельно работающих трансформаторов Y/Y_n -разомкнутый треугольник и Y/Y_n на несимметричную нагрузку показали, что появление уравнивающих токов вызывает, в свою очередь, перераспределение нагрузки между фазами трансформаторов и самими трансформаторами.

В табл. П12 приведены значения фазных токов в обмотках трансформаторов Y/Y_n -разомкнутый треугольник и Y/Y_n при их параллельной работе.

Анализ данных таблицы показывает, что распределение нагрузки между трансформаторами происходит практически одинаково. Незначительные отклонения в загрузке трансформаторов зависят от характера несимметрии (режима работы) и ее величины.

Перераспределение нагрузки по фазам каждого трансформатора в отдельности в реальных условиях не представляет опасности, так как при высокой загрузке одних фаз происходит разгрузка других. Следовательно, тепловой режим трансформаторов от номинального будет отличаться незначительно. Кроме того, следует учитывать высокую нагрузочную способность трансформаторов I и II габаритов в сельских электрических сетях.

4. РАБОТА ТРАНСФОРМАТОРОВ ПРИ НЕЛИНЕЙНОЙ НАГРУЗКЕ

4.1. Общие замечания

Трансформаторы со схемами соединения обмоток Y/Y_n -разомкнутый треугольник и Y/Y_n СУ имеют конструктивные отличия. Однако физические условия их работы одинаковы. При работе этих трансформаторов на несимметричную нагрузку происходит компенсация потоков нулевой последовательности, и напряжение с низкой стороны трансформаторов будет симметричное. При питании этих трансформаторов потребителей с нелинейной нагрузкой на стороне высшего и низшего напряжения возникнет широкий спектр гармоник тока и напряжения. Токи и напряжения 1, 4, 7-й (и так далее) гармоник являются токами и напряжениями прямой последовательности, и сдвиг между фазами у них равен 120° . Токи и напряжения 2, 5, 8-й (и так далее) гармоник будут токами и напряжениями обратной последовательности. Сдвиг между фазами у них составляет 240° . 3-я и кратные трем гармоники относятся к нулевой последовательности, так как угол сдвига по фазам у них равен 360° .

Гармоники тока и напряжения прямой и обратной последовательностей трех фаз образуют симметричную трехфазную систему, поэтому сумма их равна нулю. 3-я и кратные трем высшие гармоники тока и напряжения во всех трех фазах в каждый момент времени имеют одинаковое направление. Они суммируются и создают утроенный ток, который через нагрузку поступает в компенсирующую обмотку. Так как компенсирующая обмотка намотана встречно обмоткам низшего напряжения трансформатора, то в ней создается магнитный поток, который направлен встречно потокам, создаваемым аналогичными токами, протекающими в обмотках низшего напряжения. В результате происходит компенсация данных гармоник, что ведет к улучшению несинусоидальности формы кривой напряжения.

4.2. Характеристика спектра фазных напряжений вторичной стороны трансформаторов Y/Y_n -разомкнутый треугольник и Y/Y_n СУ при работе их на нелинейную нагрузку

Первичные обмотки обоих трансформаторов соединены в «звезду» без нулевого провода. Поэтому в них отсутствуют токи 3-й и кратных трем гармоник [69]. Фазные токи равны сумме основных гармоник и высших гармонических составляющих прямой и обратной последовательности. Токи трех фаз каждой из этих гармоник создают симметричную трехфазную систему. Их сумма в обмотке высшего напряжения равна нулю:

$$\begin{aligned} & \sum I_{mA(3n+1)} \sin[(3n+1)\omega_1 t + \varphi_{(3n+1)}] + \\ & + \sum I_{mA(3n+2)} \sin[(3n+2)\omega_1 t + \varphi_{(3n+2)}] + \\ & + \sum I_{mB(3n+1)} \sin[(3n+1)\omega_1 t - 120^\circ + \varphi_{(3n+1)}] + \\ & + \sum I_{mB(3n+2)} \sin[(3n+2)\omega_1 t + 120^\circ + \varphi_{(3n+2)}] + \\ & + \sum I_{mC(3n+1)} \sin[(3n+1)\omega_1 t + 120^\circ + \varphi_{(3n+1)}] + \\ & + \sum I_{mC(3n+2)} \sin[(3n+2)\omega_1 t - 120^\circ + \varphi_{(3n+2)}] = 0, \end{aligned} \quad (4.1)$$

где I_{mA} , I_{mB} , I_{mC} – амплитуды гармоник тока фаз A , B , C соответственно;

ω_1 – угловая частота основной гармоники;

φ – угол смещения гармоники по отношению к началу отсчета;

$n = 0, 1, 2, 3, \dots$

Фазные напряжения первичной обмотки трансформатора могут содержать все гармоники, включая 3-ю и кратные трем [69]:

$$\begin{aligned} u_A = & \sum U_{mA(3n+1)} \sin[(3n+1)\omega_1 t + \varphi_{(3n+1)}] + \\ & + \sum U_{mA(3n+2)} \sin[(3n+2)\omega_1 t + \varphi_{(3n+2)}] + \\ & + \sum U_{mA(3n+3)} \sin[(3n+3)\omega_1 t + \varphi_{(3n+3)}]; \end{aligned}$$

$$\begin{aligned}
u_B &= \sum U_{mB(3n+1)} \sin[(3n+1)\omega_1 t - 120^\circ + \varphi_{(3n+1)}] + \\
&+ \sum U_{mB(3n+2)} \sin[(3n+2)\omega_1 t + 120^\circ + \varphi_{(3n+2)}] + \\
&+ \sum U_{mB(3n+3)} \sin[(3n+3)\omega_1 t + \varphi_{(3n+3)}]; \\
u_C &= \sum U_{mC(3n+1)} \sin[(3n+1)\omega_1 t + 120^\circ + \varphi_{(3n+1)}] + \\
&+ \sum U_{mC(3n+2)} \sin[(3n+2)\omega_1 t - 120^\circ + \varphi_{(3n+2)}] + \\
&+ \sum U_{mC(3n+3)} \sin[(3n+3)\omega_1 t + \varphi_{(3n+3)}],
\end{aligned} \tag{4.2}$$

где U_{mA}, U_{mB}, U_{mC} – амплитудные значения гармоник напряжения фаз A, B, C соответственно.

Обмотки низшего напряжения трансформаторов соединены в «звезду» с нулевым проводом. В этом случае в фазных токах и напряжениях могут присутствовать все гармоники:

$$\begin{aligned}
i_a &= \sum I_{ma(3n+1)} \sin[(3n+1)\omega_1 t + \varphi_{(3n+1)}] + \\
&+ \sum I_{ma(3n+2)} \sin[(3n+2)\omega_1 t + \varphi_{(3n+2)}] + \\
&+ \sum I_{ma(3n+3)} \sin[(3n+3)\omega_1 t + \varphi_{(3n+3)}]; \\
i_b &= \sum I_{mb(3n+1)} \sin[(3n+1)\omega_1 t - 120^\circ + \varphi_{(3n+1)}] + \\
&+ \sum I_{mb(3n+2)} \sin[(3n+2)\omega_1 t + 120^\circ + \varphi_{(3n+2)}] + \\
&+ \sum I_{mb(3n+3)} \sin[(3n+3)\omega_1 t + \varphi_{(3n+3)}];
\end{aligned} \tag{4.3}$$

$$\begin{aligned}
i_c &= \sum I_{mc(3n+1)} \sin[(3n+1)\omega_1 t + 120^\circ + \varphi_{(3n+1)}] + \\
&+ \sum I_{mc(3n+2)} \sin[(3n+2)\omega_1 t - 120^\circ + \varphi_{(3n+2)}] + \\
&+ \sum I_{mc(3n+3)} \sin[(3n+3)\omega_1 t + \varphi_{(3n+3)}]; \\
u_a &= \sum U_{ma(3n+1)} \sin[(3n+1)\omega_1 t + \varphi_{(3n+1)}] + \\
&+ \sum U_{ma(3n+2)} \sin[(3n+2)\omega_1 t + \varphi_{(3n+2)}] + \\
&+ \sum U_{ma(3n+3)} \sin[(3n+3)\omega_1 t + \varphi_{(3n+3)}]; \\
u_b &= \sum U_{mb(3n+1)} \sin[(3n+1)\omega_1 t - 120^\circ + \varphi_{(3n+1)}] + \\
&+ \sum U_{mb(3n+2)} \sin[(3n+2)\omega_1 t + 120^\circ + \varphi_{(3n+2)}] + \\
&+ \sum U_{mb(3n+3)} \sin[(3n+3)\omega_1 t + \varphi_{(3n+3)}]; \\
u_c &= \sum U_{mc(3n+1)} \sin[(3n+1)\omega_1 t + 120^\circ + \varphi_{(3n+1)}] + \\
&+ \sum U_{mc(3n+2)} \sin[(3n+2)\omega_1 t - 120^\circ + \varphi_{(3n+2)}] + \\
&+ \sum U_{mc(3n+3)} \sin[(3n+3)\omega_1 t + \varphi_{(3n+3)}].
\end{aligned} \tag{4.4}$$

Постоянные составляющие тока и напряжения в приведенных формулах не показаны.

Первые гармоники и все высшие гармоники тока трех фаз вторичной обмотки, кроме 3-й и кратных трем, образуют симметричную трехфазную систему. Поэтому их сумма будет равна нулю:

$$\begin{aligned}
 & \sum I_{ma(3n+1)} \sin[(3n+1)\omega_1 t + \varphi_{(3n+1)}] + \\
 & + \sum I_{ma(3n+2)} \sin[(3n+2)\omega_1 t + \varphi_{(3n+2)}] + \\
 & + \sum I_{mb(3n+1)} \sin[(3n+1)\omega_1 t - 120^\circ + \varphi_{(3n+1)}] + \\
 & + \sum I_{mb(3n+2)} \sin[(3n+2)\omega_1 t + 120^\circ + \varphi_{(3n+2)}] + \\
 & + \sum I_{mc(3n+1)} \sin[(3n+1)\omega_1 t + 120^\circ + \varphi_{(3n+1)}] + \\
 & + \sum I_{mc(3n+2)} \sin[(3n+2)\omega_1 t - 120^\circ + \varphi_{(3n+2)}] = 0.
 \end{aligned} \tag{4.5}$$

Фазные токи 3-й и кратных трем гармоник во всех трех фазах равны и имеют одинаковое направление в каждый момент времени. Поэтому они суммируются и протекают по компенсирующей обмотке:

$$\begin{aligned}
 & \sum I_{ma(3n+3)} \sin[(3n+3)\omega_1 t + \varphi_{(3n+3)}] + \\
 & + \sum I_{mb(3n+3)} \sin[(3n+3)\omega_1 t + \varphi_{(3n+3)}] + \\
 & + \sum I_{mc(3n+3)} \sin[(3n+3)\omega_1 t + \varphi_{(3n+3)}] = \\
 & = 3 \sum I_{ma(3n+3)} \sin[(3n+3)\omega_1 t + \varphi_{(3n+3)}].
 \end{aligned} \tag{4.6}$$

В этом случае напряжение обмотки низшего напряжения фазы a с учетом действия компенсирующей обмотки будет равно:

$$\begin{aligned}
 U_a = & - \sum E_{ma(3n+1)} \sin[(3n+1)\omega_1 t + \varphi_{(3n+1)}] + \\
 & + \sum E_{ma(3n+2)} \sin[(3n+2)\omega_1 t + \varphi_{(3n+2)}] + \\
 & + \sum E_{ma(3n+3)} \sin[(3n+3)\omega_1 t + \varphi_{(3n+3)}] - \\
 & - \sum I_{ma(3n+1)} \sin[(3n+1)\omega_1 t + \varphi_{(3n+1)}] Z_{н(3n+1)} - \\
 & - \sum I_{ma(3n+2)} \sin[(3n+2)\omega_1 t + \varphi_{(3n+2)}] Z_{н(3n+2)} - \\
 & - \sum I_{ma(3n+3)} \sin[(3n+3)\omega_1 t + \varphi_{(3n+3)}] Z_{н(3n+3)} + \\
 & + \sum 3 I_{ma(3n+3)} \sin[(3n+3)\omega_1 t + \varphi_{(3n+3)}] Z_{к(3n+3)},
 \end{aligned} \tag{4.7}$$

где $Z_{н(3n+1)}$, $Z_{к(3n+3)}$ – эквивалентные сопротивления обмоток низшего напряжения и компенсирующей для каждой из гармоник.

Эквивалентные сопротивления обмоток высшего, низшего напряжения и компенсирующей для каждой из гармоник определяются по следующим выражениям:

$$\left. \begin{aligned}
 Z_{в(3n+e)} &= r_{в(3n+e)} + jx_{в(3n+e)} = r_{в(3n+e)} + j2\pi f_{(3n+e)} (L_{в} - M_{вн} - M_{вк} + M_{нк}); \\
 Z_{н(3n+e)} &= r_{н(3n+e)} + jx_{н(3n+e)} = r_{н(3n+e)} + j2\pi f_{(3n+e)} (L_{н} - M_{нв} - M_{нк} + M_{вк}); \\
 Z_{к(3n+e)} &= r_{к(3n+e)} + jx_{к(3n+e)} = r_{к(3n+e)} + j2\pi f_{(3n+e)} (L_{к} - M_{кв} - M_{нк} + M_{нв}).
 \end{aligned} \right\} \tag{4.8}$$

где $e = 1, 2, 3$ – соответственно для гармоник прямой, обратной и нулевой последовательностей;

$r_{в}$, $r_{н}$, $r_{к}$ – активное сопротивление обмоток высшего, низшего напряжения и компенсирующей обмотки;

$L_{в}$, $L_{н}$, $L_{к}$ – индуктивность обмоток;

$M_{нв}$, $M_{вк}$, $M_{нк}$ – взаимная индукция пары обмоток.

Из выражения (4.7) следует, что для того, чтобы 3-я и кратные трем высшие гармонические напряжения были компенсированы дополнительной компенсирующей обмоткой необходимо, чтобы напряжение этих гармоник в обмотке низшего напряжения было равно напряжению в компенсирующей обмотке:

$$\begin{aligned} \sum I_{ma(3n+3)} \sin[(3n+3)\omega_1 t + \varphi_{(3n+3)}] Z_{n(3n+3)} = \\ = \sum 3I_{ma(3n+3)} \sin[(3n+3)\omega_1 t + \varphi_{(3n+3)}] Z_{к(3n+3)}. \end{aligned} \quad (4.9)$$

Это условие будет выполнено, если

$$Z_{к(3n+3)} = \frac{Z_{n(3n+3)}}{3}. \quad (4.10)$$

Выполнение условия (4.10) достигается конструктивным исполнением компенсирующих обмоток трансформаторов Y/Y_n –разомкнутый треугольник и Y/Y_n СУ.

4.3. Экспериментальные исследования способности трансформаторов Y/Y_n –разомкнутый треугольник и Y/Y_n СУ улучшать форму кривой напряжения

Исследования проводились в лабораторных условиях на трансформаторе типа ТС-1,5/0,38 с различными схемами соединения обмоток [71]. Источником высших гармоник служил электропривод, работающий по схеме асинхронного вентильного каскада со статическим преобразователем частоты на тиристорах (АВК). Он является потребителем электроэнергии данных трансформаторов. Мощность электропривода и трансформатора были соизмеримы. Состав искажающих высших гармоник напряжения и их величина определялись анализатором качества напряжения типа УК-1. Осциллографирование выполнялось шлейфовым осциллографом типа Н-102.

Исследование проводилось методом сравнения результатов измерений для схем соединения обмоток исследуемых транс-

форматоров с трансформатором Y/Y_n при одном и том же угле управления тиристора β .

На рис. 4.1, б приведена осциллограмма вторичного напряжения трансформатора Y/Y_n при питании тиристорного электропривода с трехфазнулевой схемой зависимого инвертора.

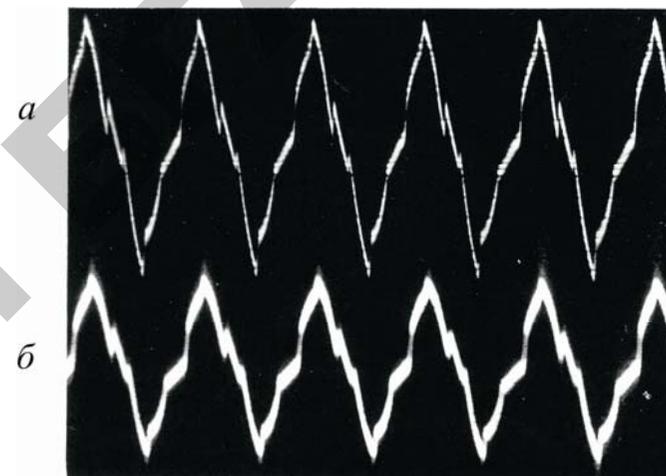


Рис. 4.1. Осциллограммы фазных напряжений трансформатора со схемой соединения обмоток Y/Y_n при питании АВК: а – высшая сторона; б – низшая сторона

Как показали исследования [152], тиристорный электропривод генерирует в сеть широкий спектр гармоник, в том числе и четные. При соединении обмоток трансформатора Y/Y_n наибольшее значение имеют гармоники напряжения, кратные трем, имеющие нулевую последовательность. Так, значение напряжения 3-й гармоники по отношению к 1-й составляет 27,8 %; 6-й – 5,2; 9-й – 7; 12-й – 3,5 %. Нечетные гармоники: 5, 7, 11 и 13-я имеют незначительную величину, порядка 0,4 – 1,1 %. Примерно такую же величину имеют гармоники четные, не кратные трем.

При питании тиристорного электропривода от трансформаторов Y/Y_n –разомкнутый треугольник или Y/Y_n СУ (рис. 4.2) гармоники напряжения, кратные трем, практически отсутствуют, что значительно улучшает форму кривой напряжения (рис. 4.3, б).

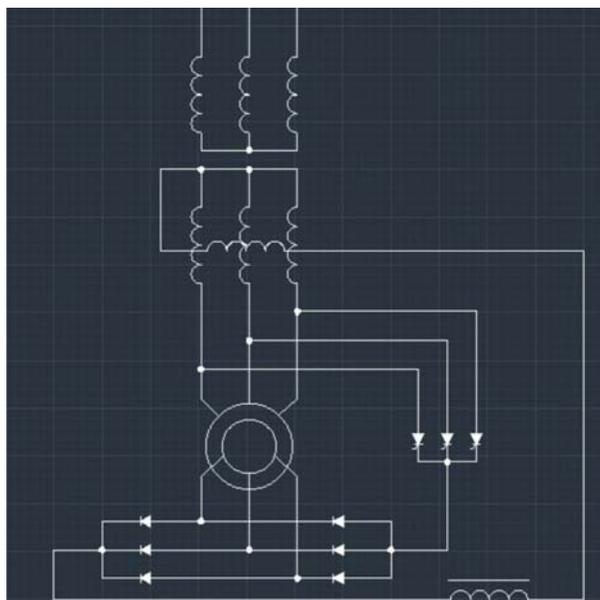


Рис. 4.2. Схема работы трансформатора Y/Y_nCU в качестве питающего АВК

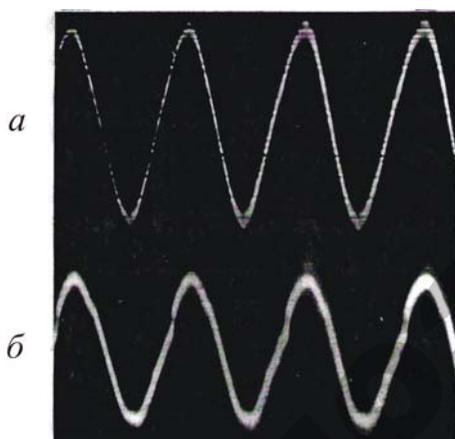


Рис. 4.3. Осциллограммы фазных напряжений трансформатора со схемой соединения обмоток Y/Y_n –разомкнутый треугольник при питании АВК: *a* – высшая сторона; *б* – низшая сторона

Другие гармоники имеют некоторое увеличение по амплитуде. Но значение их по абсолютной величине не велико, около 2 %. Тем не менее, коэффициент несинусоидальности напряжения, рассчитанный по выражению, приведенному по ГОСТ [1], значительно уменьшается. Если при соединении обмоток Y/Y_n он составлял 30 %, то при соединении обмоток Y/Y_n –разомкнутый треугольник или Y/Y_nCU он уменьшился в 3,5 раза [4].

Наличие высших гармоник напряжения и их величина определялись и с высшей стороны трансформаторов.

Как показывают результаты измерений, при схеме соединения обмоток Y/Y_n спектр гармоник с высшей стороны трансформатора практически примерно такой же, как и с низшей (см. рис. 4.1, *a*). Наибольшее значение имеют гармоники напряжений 3-я и 9-я – 26,4 % и 7,6 % соответственно. Значение остальных гармоник небольшое, порядка 0,5 %, за исключением 5-й, которая составляет по отношению к 1-й 4,6 %.

При соединении обмоток Y/Y_n –разомкнутый треугольник или Y/Y_nCU значение всех высших гармоник напряжения с высшей стороны трансформатора ослабляется в 2–3 раза. Так, при использовании таких схем коэффициент несинусоидальности с высшей стороны по сравнению со схемой Y/Y_n уменьшается с 28,1 % до 1,45 %, то есть в 19,4 раза (рис. 4.3, *a*).

Существуют схемы управления тиристорными электроприводами, когда необходимо согласовывать стандартное напряжение сети и нестандартное напряжение ротора. Для согласования этих напряжений используются трансформаторы.

Нами была исследована способность трансформаторов улучшать форму кривой напряжения, работая в качестве согласующего [71].

Так, при работе трансформатора Y/Y_n в этом режиме наибольшее значение с высшей стороны имеют гармоники напряжений, кратные трем, как и в режиме, когда трансформатор питает электропривод. Однако в согласующем режиме действующее значение напряжений этих гармоник больше, чем в питающем, и форма кривой напряжения (рис. 4.4, *a*), имеет большее искажение. По отношению к 1-й гармонике 3-я составляет 31 %; 6-я – 4,5; 9-я – 7,85; 12-я – 5,1 %. Значения напряжений других гармоник незначительны и составляют (каждая из них) менее 1 %.

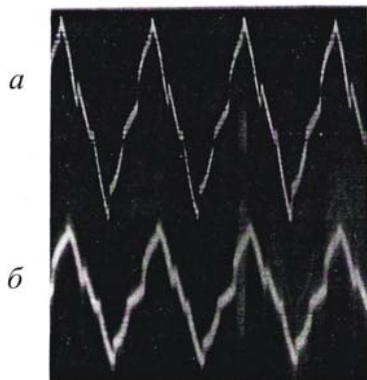


Рис. 4.4. Осциллограммы фазных напряжений трансформатора со схемой соединения обмоток Y/Y_n при работе в качестве согласующего в АВК:
a – высшая сторона; *б* – низшая сторона

При соединении обмоток трансформатора по схеме Y/Y_n –разомкнутый треугольник или Y/Y_n СУ величина напряжения высших гармоник с первичной стороны трансформатора значительно уменьшается. Гармоники, кратные трем, компенсируются практически полностью, и форма кривой напряжения улучшается. Коэффициент несинусоидальности при этом уменьшается с 33 % при схеме Y/Y_n до 7,3 % при симметрирующих схемах, то есть в 4,5 раза (рис. 4.5, *a*).

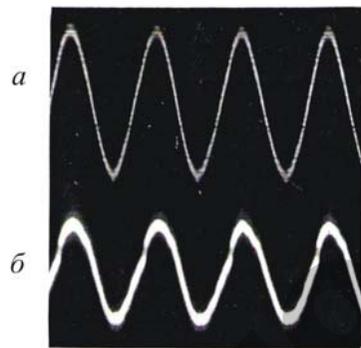


Рис. 4.5. Осциллограммы фазных напряжений трансформатора со схемой соединения обмоток Y/Y_n –разомкнутый треугольник при работе в качестве согласующего в АВК:
a – высшая сторона; *б* – низшая сторона

С низшей стороны трансформаторов форма кривых напряжения практически такая же, как и с высшей стороны соответствующих трансформаторов, о чем свидетельствуют осциллограммы фазных напряжений (рис. 4.4, *б* и 4.5, *б*).

При исследовании формы кривой напряжения трансформаторов со схемами соединения обмоток Y/Y_n и симметрирующих трансформаторов было определено влияние на нее величины загрузки трансформаторов. Для этой цели электродвигатель тиристорного электропривода нагружался. Трансформаторы питали симметричную, но не линейную нагрузку. Так, у трансформатора Y/Y_n , работающего в качестве согласующего, при увеличении нагрузки значительно возрастают гармоники напряжения, кратные трем. Амплитуда 3-й гармоники напряжения, например, при увеличении нагрузки на 50,0 % возрастает на 30,5 %.

При соединении трансформатора по схеме Y/Y_n –разомкнутый треугольник или Y/Y_n СУ влияние нагрузки на амплитуду гармоник напряжения сказывается незначительно. Если при схеме Y/Y_n в данном режиме коэффициент несинусоидальности возрос на 13 %, то при схеме Y/Y_n –разомкнутый треугольник – на 1,7 %. При этом необходимо иметь в виду, что лабораторный образец трансформатора и в первом и во втором случаях работал со значительной перегрузкой.

На рис. 4.6 и 4.7 приведены осциллограммы фазных напряжений соответственно трансформаторов Y/Y_n и трансформаторов с дополнительными обмотками при углах управления тиристорами 0° , 30° и 90° .

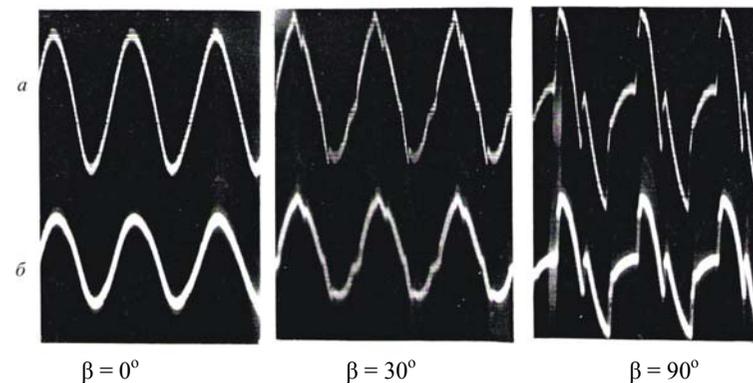


Рис. 4.6. Осциллограммы фазных напряжений трансформатора Y/Y_n в режиме питающего АВК при углах управления тиристорами 0° , 30° и 90° :
a – высшая сторона; *б* – низшая сторона

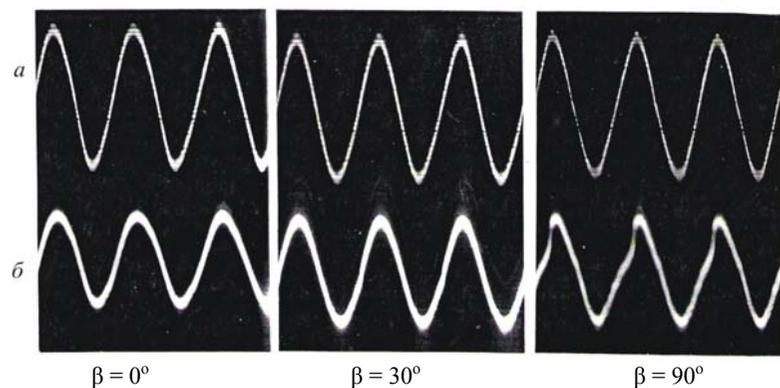


Рис. 4.7. Осциллограммы фазных напряжений трансформатора Y/Y_n -разомкнутый треугольник в режиме питающего АВК при углах управления тиристорами 0° , 30° и 90° :
a – высшая сторона; *б* – низшая сторона

Определенный интерес представляет исследование формы кривой напряжения симметрирующих трансформаторов в режиме холостого хода и несимметричной нагрузки.

Анализ данных эксперимента показывает, что в трансформаторах с дополнительными обмотками в режиме холостого хода напряжение третьей гармоники по сравнению со схемой Y/Y_n настолько незначительно, что им можно пренебречь.

Несимметрия нагрузки по фазам симметрирующих трансформаторов практически не вызывает искажения формы кривой напряжения. В трансформаторе Y/Y_n при токе однофазной нагрузки $I_{\text{наг}} = 1,25I_n$ значение 3-й гармоники возрастает до 47 % по сравнению с режимом холостого хода.

Улучшение формы кривой напряжения трансформаторами Y/Y_n -разомкнутый треугольник и Y/Y_n СУ объясняется наличием компенсирующих витков. При работе электропривода с асинхронно-вентильным каскадом тиристоры зажигаются поочередно в каждой фазе, создавая, таким образом, однофазную нагрузку, перемежающуюся от фазы к фазе. По нулевому проводу проходит ток нулевой последовательности. Поток гармоник, кратных трем, имеющий нулевую последовательность, компенсируется дополнительными витками, что приводит, в конечном счете, к улучшению формы кривой напряжения.

5. ТЕХНИКО-ЭКОНОМИЧЕСКАЯ ОПТИМИЗАЦИЯ ПАРАМЕТРОВ ТРАНСФОРМАТОРОВ

5.1. Конструктивное исполнение трансформаторов

Трансформатор со схемой соединения обмоток Y/Y_n -разомкнутый треугольник. Конструкция и техническая документация данного трансформатора разработана на базе типового трансформатора со схемой соединения обмоток Y/Y_n Минского электротехнического завода им. В. И. Козлова. В основу расчетов и конструирования была положена задача максимальной унификации всех деталей трансформатора Y/Y_n . Это дало возможность, не меняя схемы технологического процесса производства трансформаторов Y/Y_n введением двух дополнительных операций (намотка на тех же станках компенсирующих витков и сварка их в разомкнутый треугольник), изготавливать трансформаторы со схемой соединения обмоток Y/Y_n -разомкнутый треугольник.

На изготовление компенсирующих витков в данном трансформаторе требуется дополнительный расход проводникового материала и увеличение просвета окна. Чтобы не менять размеры магнитопровода и не увеличивать расход проводникового материала, несколько увеличивали плотность тока в обмотке низшего напряжения. В результате этого сечение провода обмотки низшего напряжения незначительно уменьшено и обмотки свободно входят в окна магнитопровода. Общий расход провода остается прежним. Число витков в фазе обмотки низшего напряжения трансформатора типа ТМ-100/0,4 равно 70, компенсирующих витков на одном стержне – 23. Компенсирующая обмотка укладывается на стержень магнитопровода, поверх нее – обмотка низшего напряжения, а на нее наматывают обмотку высшего напряжения. Обмотки высшего и низшего напряжения соединяются в «звезду». Катушки компенсирующей обмотки, расположенные на трех стержнях магнитопровода, соединены в разомкнутый треугольник. Один из свободных

концов разомкнутого треугольника подключен к нейтрали обмотки низшего напряжения, другой (через фарфоровый ввод, закрепленный на крышке трансформатора) выведен наружу. Компенсирующая обмотка включена встречно обмотке низшего напряжения, чтобы магнитные потоки нулевой последовательности обеих обмоток в стержнях трансформатора компенсировали друг друга.

Трансформатор со схемой соединения обмоток Y/Y_n СУ. Конструктивное исполнение трансформатора с данной схемой соединения обмоток значительно проще, чем трансформатора со схемой соединения обмоток Y/Y_n –разомкнутый треугольник. В этом случае используется обычный типовой трансформатор со схемой соединения обмоток Y/Y_n . На верх трех обмоток наматывается общая компенсирующая обмотка. Число витков дополнительной обмотки рассчитывается точно так же, как и обмотки со схемой соединения Y/Y_n –разомкнутый треугольник. Данный трансформатор можно изготавливать не только на заводе, но в ремонтных условиях.

Трансформатор со схемой соединения обмоток «звезда–треугольник с зигзагом» (Y/Δ с зигзагом). Конструктивное исполнение трансформатора со схемой соединения обмоток «звезда–треугольник с зигзагом» зависит от области его применения. При использовании такого трансформатора в электроустановках сельскохозяйственных потребителей в качестве преобразовательного его рекомендуется выполнять с естественным воздушным охлаждением. Отсутствие в системе охлаждения масла, которое является горючим материалом, в значительной мере повышает пожарную безопасность. Применение в качестве твердой изоляции обмоток стекловолокна и кремнийорганических материалов позволяет получить практически пожаробезопасную электроустановку, что дает возможность использовать сухой трансформатор в тех случаях, когда обеспечение пожарной безопасности является решающим обстоятельством. При использовании такого трансформатора в качестве питающего он может быть выполнен масляным.

Трансформатор состоит из магнитной системы и обмоток. Магнитная система включает стержни и ярма. По схеме их взаимного расположения наиболее распространен в практике трансформаторостроения плоский трехстержневой тип магнитной системы со ступенчатой формой поперечного сечения стержня, вписанной в окружность, и с обмотками в виде круговых цилиндров. Форма

и размеры поперечного сечения ярма равны форме и размерам стержней. Стержни и ярма могут быть выполнены из изолированных пластин холоднокатаной текстурованной электротехнической стали (толщиной 0,30 мм или 0,35 мм), обладающей анизотропией магнитных свойств. Ступенчатое сечение стержня и ярма образуется сечениями пакетов пластин. Число ступеней равно числу пакетов. С целью снижения потерь и намагничивающей мощности из-за анизотропии магнитных свойств стали применяется косой стык пластин в углах магнитной системы. Для стяжки ярм используются прессующие балки, опрессовка стержней осуществляется после насадки обмоток путем расклинивания с внутренней обмоткой.

Система обмоток трансформатора предназначена для преобразования электрической энергии. Она включает в себя первичные обмотки трех фаз, которые присоединяются к питающей сети системы электроснабжения, вторичные обмотки, к которым подключается нагрузка, а также главную и продольную изоляцию обмоток. Вторичные обмотки состоят из двух одинаковых половин, соединенных последовательно. Причем на каждой из стержней магнитопровода размещены половины вторичных обмоток двух разных фаз. Первичные и вторичные обмотки могут быть выполнены изолированным медным либо алюминиевым проводом круглого или прямоугольного сечения в виде цилиндров и расположены на стержнях концентрически относительно друг друга (вторичные обмотки – внутри, первичные – снаружи). Высоты обеих обмоток должны быть одинаковыми. По форме выполнения приняты круглые обмотки, являющиеся более простыми в конструктивном отношении и более прочными в механическом и электрическом отношении по сравнению с обмотками прямоугольной формы. Первичные фазные обмотки трансформатора соединены в «звезду» без нулевого провода, вторичные – в «треугольник».

Обмотки изолированы одна от другой и от всех заземленных частей конструкции трансформатора – магнитной системы, деталей крепления, защитного кожуха. Эта изоляция является главной и создается путем сочетания изоляционных деталей, изготовленных из твердых диэлектриков, с воздушными изоляционными промежутками. Изоляция между различными точками одной обмотки является продольной и включает в себя изоляцию между витками, слоями обмотки, катушками.

5.2. Методика расчета конструктивных параметров и технических характеристик трансформаторов

Расчет конструктивных параметров и технических характеристик трансформаторов со схемами соединения обмоток Y/Y_n –разомкнутый треугольник и Y/Y_n СУ производился по методике, изложенной П. М. Тихомировым [153]. Трансформатор со схемой соединения обмоток «звезда–треугольник с зигзагом» может работать в существующих распределительных электрических сетях как в качестве силового трансформатора для электроснабжения сельскохозяйственных потребителей, так и в качестве специального для питания различных нелинейных электроприемников пониженным трехфазным напряжением. Поэтому расчет силового трансформатора со схемой соединения обмоток «звезда–треугольник с зигзагом» производится по общей методике, как и трансформаторов со схемами соединения обмоток Y/Y_n –разомкнутый треугольник и Y/Y_n СУ. Для расчета специального трансформатора составлена блок-схема алгоритма и разработаны программы расчета на ЭВМ конструктивных параметров и технических характеристик трансформатора [154–159], а так же расчет оптимальных параметров трансформатора различной мощности и напряжения с учетом типа и материала обмоточного провода, марки и толщины пластин электротехнической стали. Программа [155] позволяет определять оптимальные технико-экономические показатели: потери холостого хода и короткого замыкания, капитальные вложения в активную часть трансформатора, амортизационные отчисления, стоимость потерь энергии, совокупные дисконтированные затраты за расчетный период трансформаторной установки в соответствии с конструктивными размерами активной части трансформатора.

Расчеты показали, что на параметры со схемой соединения обмоток «звезда–треугольник с зигзагом» значительное влияние оказывает соотношение средней длины витка и высоты обмоток β . С ростом β увеличивается расход электротехнической стали. Материалоемкость обмоток и потери короткого замыкания при этом снижаются. Оптимальные конструктивные параметры данного трансформатора определяются соотношением стоимости обмоточного провода и тарифа на электроэнергию. С ростом

стоимости обмоточного провода при действующем тарифе на электроэнергию снижается оптимальная масса обмоток и магнитопровода. Потери холостого хода и короткого замыкания возрастают. Применение алюминиевого провода по сравнению с медным приводит к увеличению металлоемкости обмоток и магнитопровода. При этом снижаются капитальные вложения и совокупные дисконтированные затраты на трансформацию электроэнергии [158, 159, 169].

Выпуск симметрирующих трансформаторов освоен на Минском электротехническом заводе им. В. И. Козлова. Первый трансформатор со схемой соединения обмоток Y/Y_n –разомкнутый треугольник был выпущен в 1974 г. С 1994 г. началось серийное производство трансформаторов со схемой соединения обмоток Y/Y_n СУ. Решением концерна «Белэнерго» от 25.05.2001 года (Протокол № 25/УЭС), а так же ТКП 45-4.04-149–2009 (п. 7.13) [160] рекомендовано в целях снижения потерь электроэнергии и стабилизации напряжения в распределительных сетях 0,4 кВ при выборе трансформаторов для потребителей с коммунально-бытовой нагрузкой применять трансформаторы со схемой соединения обмоток Y/Y_n с симметрирующим устройством (Y/Y_n СУ), мощностью 25–250 кВ·А.

5.3. Заводские и производственные испытания промышленных образцов симметрирующих трансформаторов

Испытания промышленных образцов симметрирующих трансформаторов со схемами соединения обмоток Y/Y_n –разомкнутый треугольник и Y/Y_n СУ проводились в условиях центральной заводской лаборатории Минского электротехнического завода им. В. И. Козлова по методике, установленной ГОСТ 3484–65 (в настоящее время – ГОСТ 3484.1–88) [161]. Результаты испытаний приведены в протоколах [71, 88, 89]. Как следует из протоколов испытаний, все параметры трансформаторов находятся в допустимых пределах, трансформаторы удовлетворяют требованиям ГОСТ 11677–65 и ГОСТ 12022–66.

В лаборатории завода проведены также сравнительные испытания производственных образцов трансформаторов мощностью 25 кВ·А с симметрирующим устройством (ТМГСУ-25/10-У1) и без него (ТМГ-25/10-У1) в режиме однофазной и двухфазной нагрузки. На основании данных таблиц построены зависимости фазных напряжений этих трансформаторов от тока нагрузки (табл. П13–П16). На рис. 5.1 эти зависимости приведены для трансформатора с симметрирующим устройством при однофазной нагрузке, на рис. 5.2 – для трансформатора без симметрирующего устройства.

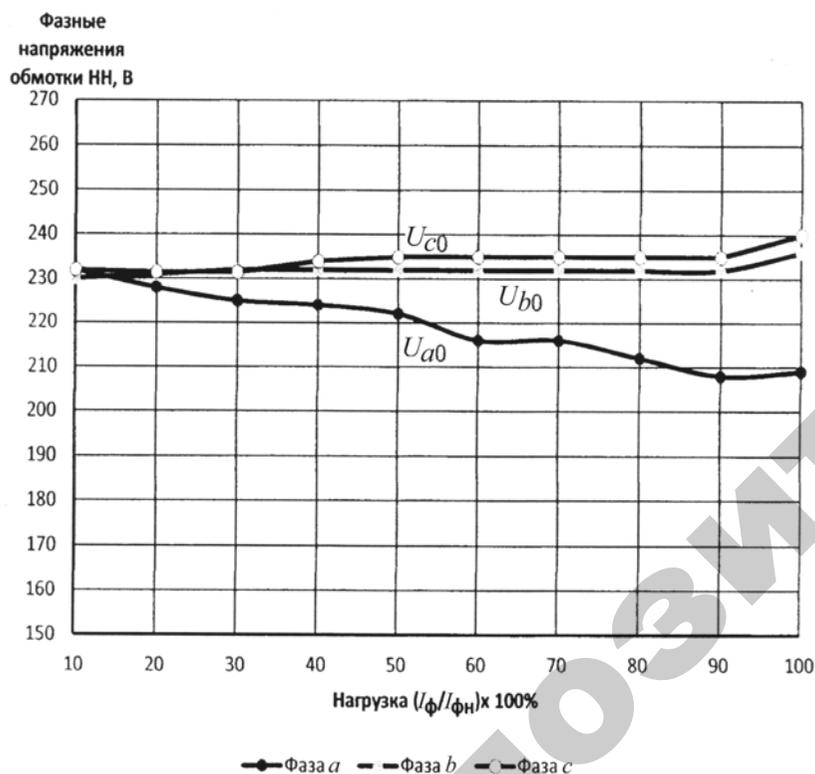


Рис. 5.1. Зависимость фазных напряжений трансформатора типа ТМГСУ-25/10-У1 напряжением 10/0,4 кВ при однофазной нагрузке (a – 0)

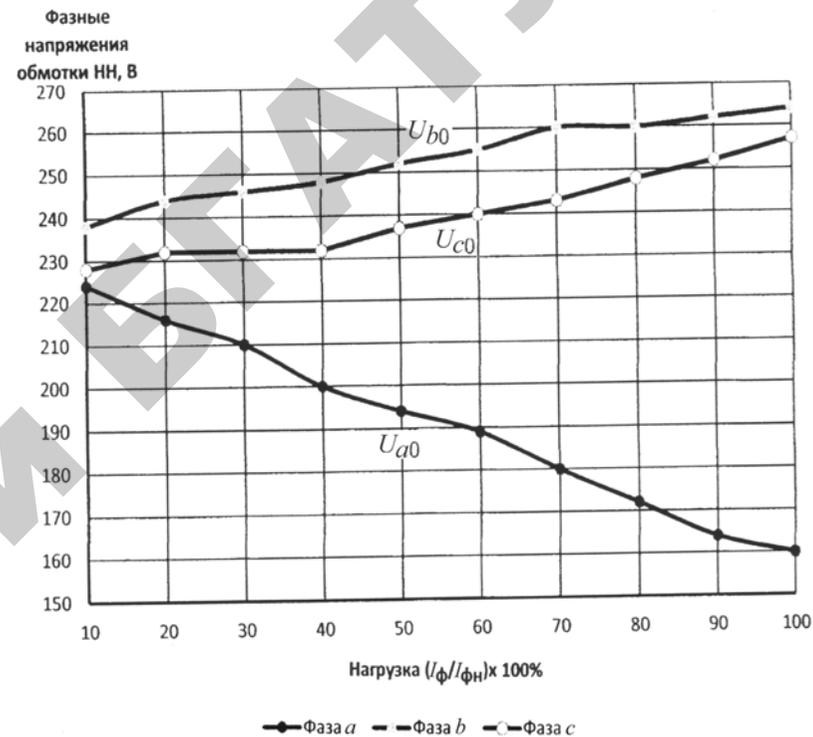


Рис. 5.2. Зависимость фазных напряжений трансформатора типа ТМГ-25/10-У1 напряжением 10/0,4 кВ при однофазной нагрузке (a – 0)

На основании результатов испытаний (табл. П15) построены зависимости (рис. 5.3) фазных напряжений трансформатора типа ТМГСУ-25/10-У1 напряжением 10/0,4 кВ при двухфазной нагрузке (a – 0, b – 0), а на основании данных табл. П16 построены зависимости (рис. 5.4) фазных напряжений трансформатора типа ТМГ-25/10-У1 напряжением 10/0,4 кВ при двухфазной нагрузке (a – 0, b – 0).

В центральной заводской лаборатории были сняты сравнительные характеристики трансформаторов ТМГ и ТМГСУ напряжением 10/0,4 кВ различных мощностей (табл. П17). Как следует из данных таблицы, симметрирующее устройство на потери холостого хода и короткого замыкания не влияет.

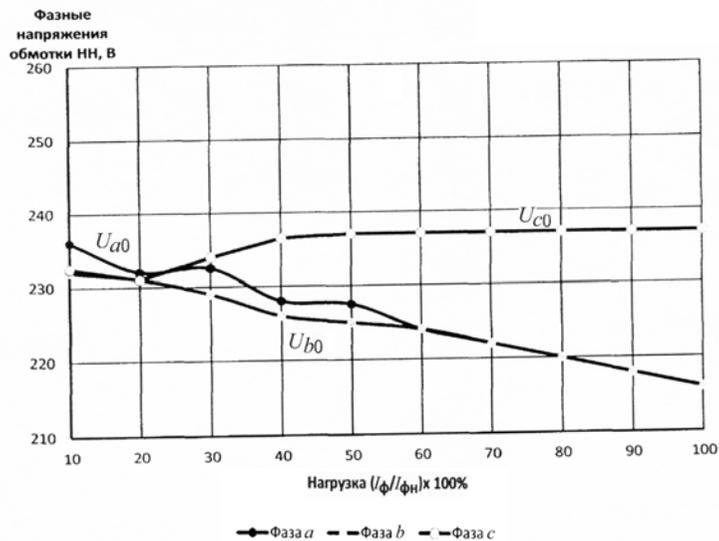


Рис. 5.3. Зависимость фазных напряжений трансформатора типа ТМГСУ-25/10-У1 напряжением 10/0,4 кВ при двухфазной нагрузке ($a - 0, b - 0$)

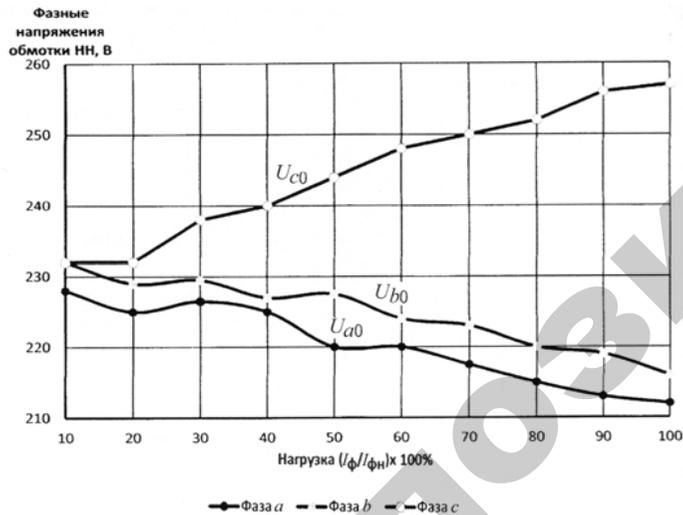


Рис. 5.4. Зависимость фазных напряжений трансформатора типа ТМГ-25/10-У1 напряжением 10/0,4 кВ при двухфазной нагрузке ($a - 0, b - 0$)

Исследования зависимости потерь короткого замыкания от величины тока в нулевом проводе, проведенные в условиях завода для различных схем соединения обмоток трансформаторов мощностью 100 кВ·А, показали, что они у трансформатора со схемой соединения обмоток $Y/Y_n C U$ ниже, чем у трансформатора Y/Y_n (рис. 5.5).

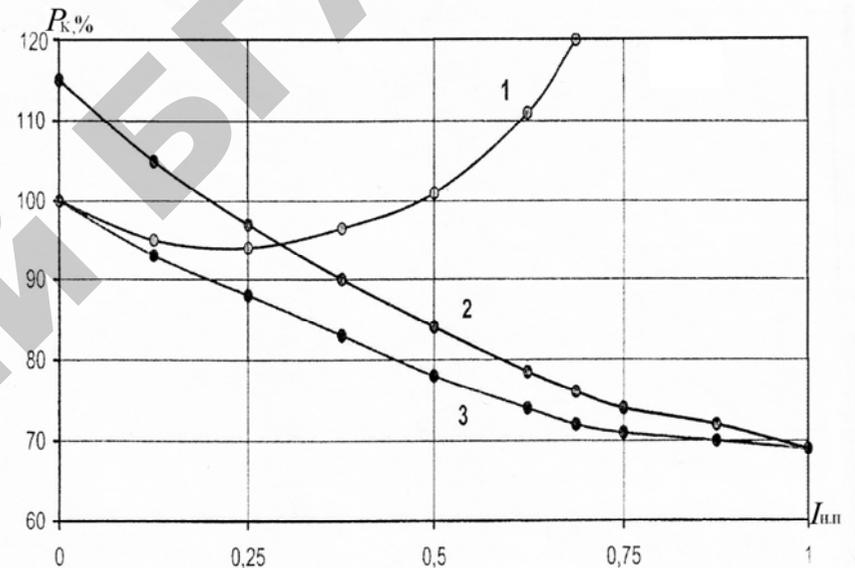


Рис. 5.5. Зависимость потерь короткого замыкания ($P_k, \%$) трансформатора ТМ-100/10 от схем соединения обмоток и величины тока в нулевом проводе ($I_{н.п}$): 1 — трансформатор Y/Y_n ; 2 — трансформатор Y/Z_n ; 3 — трансформатор $Y/Y_n C U$

В Боровлянах Острошицкого РЭС, в Березино Березинского РЭС на трансформаторе со схемой соединения обмоток Y/Y_n —разомкнутый треугольник мощностью 100 кВ·А [71, 89] и в Заречье Смоленвичского РЭС на трансформаторе со схемой соединения обмоток $Y/Y_n C U$ мощностью 160 кВ·А [88] были проведены производственные исследования симметрирующей способности трансформаторов. Заводские, а также производственные исследования трансформаторов подтвердили лабораторные опыты и показали высокую симметрирующую способность предлагаемых трансформаторов.

5.4. Технико-экономическая оценка эффективности применения трансформаторов для улучшения показателей несимметрии и несинусоидальности напряжения в сельскохозяйственных электроустановках

Экономия электроэнергии в сельских электрических сетях при использовании симметрирующих трансформаторов будет складываться из снижения потерь мощности от токов нулевой последовательности в трансформаторах и линиях электропередачи и компенсации токов высших гармонических:

$$W = (\Delta P_T + \Delta P_L + \Delta P_r) \tau, \quad (5.1)$$

где ΔP_T – дополнительные потери активной мощности от токов нулевой последовательности в трансформаторе;

ΔP_L – дополнительные потери активной мощности от токов нулевой последовательности в линии;

ΔP_r – дополнительные потери активной мощности от несинусоидальности напряжения в трансформаторе и линии;

τ – время потерь.

Снижение потерь мощности в трансформаторе при использовании СУ:

$$\Delta P_T = \Delta P_{T1} - \Delta P_{T2}, \quad (5.2)$$

где ΔP_{T1} – потери активной мощности в трансформаторе Y/Y_н от несимметрии напряжений;

ΔP_{T2} – потери активной мощности в трансформаторе Y/Y_нСУ от несимметрии напряжений.

Потери активной мощности в трансформаторе Y/Y_н от несимметрии напряжений определяются следующим образом:

$$\Delta P_{T1} = 3I_{01}^2 r_{01}, \quad (5.3)$$

где I_{01} – ток нулевой последовательности трансформатора Y/Y_н;

r_{01} – активное сопротивление нулевой последовательности трансформатора Y/Y_н.

Используя закон Ома, преобразуем это выражение:

$$\Delta P_{T1} = 3 \frac{U_{01}^2}{Z_{01}^2} r_{01}, \quad (5.4)$$

где Z_{01} – полные сопротивления обратной и нулевой последовательности трансформатора Y/Y_н.

Разделив и умножив слагаемые на квадрат напряжения прямой последовательности (U_1^2), получим

$$\Delta P_{T1} = 3 \frac{U_{01}^2 U_1^2}{U_1^2 Z_{01}^2} r_{01}. \quad (5.5)$$

Так как $\frac{U_{01}}{U_1} = K_{2U}$ – есть коэффициент несимметрии напряжений по нулевой последовательности, то

$$\Delta P_{T1} = 3K_{0U1}^2 U_1^2 \frac{r_{01}}{Z_{01}^2}. \quad (5.6)$$

Аналогично определяются потери активной мощности от несимметрии напряжений в трансформаторе Y/Y_нСУ:

$$\Delta P_{T2} = 3K_{0U2}^2 U_1^2 \frac{r_{02}}{z_{02}^2}, \quad (5.7)$$

где r_{02} – активное сопротивление нулевой последовательности трансформатора Y/Y_нСУ;

Z_{02} – полное сопротивление нулевой последовательное трансформатора Y/Y_нСУ.

Подставив значения выражений из формул (5.6) и (5.7) в формулу (5.2), получим окончательно выражение для определения снижения потерь мощности в трансформаторе через коэффициент несимметрии напряжений по нулевой последовательности при использовании симметрирующего устройства:

$$\Delta P_T = 3U_1^2 \left(K_{0U1}^2 \frac{r_{01}}{Z_{01}^2} - K_{0U2}^2 \frac{r_{01}}{Z_{02}^2} \right), \quad (5.8)$$

где K_{0U1} – коэффициент несимметрии напряжений по нулевой последовательности на вводах трансформатора Y/Y_H ;

K_{0U2} – коэффициент несимметрии напряжений по нулевой последовательности на вводах трансформатора Y/Y_H СУ.

Снижение потерь мощности в линии определяется по формуле

$$\Delta P_L = 3(I_{01}^2 r_{0n1} - I_{02}^2 r_{0n2}), \quad (5.9)$$

где I_{01} – ток нулевой последовательности в линии, питаемой трансформатором Y/Y_H ;

I_{02} – ток нулевой последовательности в линии, питаемой трансформатором Y/Y_H СУ;

r_{0n1} – активное сопротивление обратной и нулевой последовательности линии, питаемой трансформатором Y/Y_H ;

r_{0n2} – активные сопротивления обратной и нулевой последовательности линии питаемой трансформатором Y/Y_H СУ.

Проведя преобразования выражения (5.9) так же, как и для расчета потерь энергии в трансформаторах, получим формулу для определения дополнительных потерь энергии в линии через коэффициент несимметрии напряжений по нулевой последовательности:

$$\Delta P_L = 3U_1^2 \left(K_{0U1}^2 \frac{r_{0n1}}{Z_{0n1}^2} - K_{0U2}^2 \frac{r_{0n2}}{Z_{0n2}^2} \right), \quad (5.10)$$

где r_{0n} – активное сопротивление нулевой последовательности линии;

Z_{0n} – полное сопротивление нулевой последовательности линии.

В связи с тем, что трансформатор Y/Y_H СУ не оказывает влияния на активное и полное сопротивление линии, то в формуле (5.10) можно принять $r_{0n1} = r_{0n2}$ и $Z_{0n1} = Z_{0n2}$.

Дополнительные потери активной мощности от несинусоидальности напряжения в трансформаторе и линии, обусловленные несинусоидальным режимом работы, определяются по формуле

$$\Delta P_T = \Delta P_{T,T} + \Delta P_{T,L}, \quad (5.11)$$

где $\Delta P_{T,T}$ – дополнительные потери от высших гармоник в трансформаторе, обусловленные несинусоидальным режимом его работы;

$\Delta P_{T,L}$ – дополнительные потери от высших гармоник в линии, обусловленные протеканием токов высших гармоник.

Суммарные дополнительные потери от высших гармоник в трансформаторе, обусловленные несинусоидальным режимом его работы, определяются по формуле [47]

$$\Delta P_{T,T} = \Delta P_{x,x} \sum_{v=2}^{\infty} U_v^2 + 0,607 \frac{\Delta P_{k,3}}{u_{k,3}^2} \sum_{v=2}^{\infty} \frac{1 + 0,05v^2}{v\sqrt{v}} U_v^2, \quad (5.12)$$

где v – порядок высших гармонических составляющих напряжения;

$\Delta P_{x,x}$ – потери холостого хода трансформатора;

$\Delta P_{k,3}$ – потери короткого замыкания трансформатора;

U_v – напряжение v гармоники.

Дополнительные потери от высших гармоник в линии, обусловленные протеканием токов высших гармоник, можно определить по выражению [47]

$$\Delta P_{T,L} = 1,41r \sum_{v=2}^{\infty} \sqrt{v} I_v^2, \quad (5.13)$$

где I_v – ток v гармоники.

Определив по формулам (5.8), (5.10)–(5.13) снижение потерь электроэнергии в линии и трансформаторах при соответствующем режиме их работы и полученные значения подставив в формулу (5.1), получим экономию электрической энергии от использования симметрирующих трансформаторов.

Расчеты показали [71, 88, 142], что дополнительные затраты на изготовление симметрирующего устройства за счет снижения потерь электроэнергии в сети окупаются в течение одного года.

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. ГОСТ 13109–97. Нормы качества электрической энергии в системах электроснабжения общего назначения.
2. Веников В. А., Федоров Д. А., Мачинский М. В. Анализ поведения электрических сетей при резких изменениях нагрузки // Электричество. 1959. № 4.
3. Веников В. А., Глазунов А. А., Жуков Л. А., Солдаткина Л. А. Электрические сети. Т. 2. М. : Высшая школа, 1971.
4. Будзко И. А., Степанов В. Н. Электрические линии и сети сельскохозяйственного назначения. М. : Сельхозиздат, 1962.
5. Будзко И. А., Захарин А. Г., Эбин Л. Е. Сельские электрические сети. М. : Госэнергоиздат, 1963.
6. Будзко И. А., Захарин А. Г., Эбин Л. Е., Левин М. С. Теоретические основы электроснабжения в сельском хозяйстве. М. : Колос, 1964.
7. Глазунов А. А., Рябов А. Я., Лашков Ф. П. Расчет электрических сетей энергетических систем. ОНТИ ПКТП СССР, 1935.
8. Глазунов А. А., Бессмертный И. С., Воронцов Ф. Ф. Основные положения построения схем городских электрических сетей // Электричество. 1952. № 12.
9. Глазунов А. А. Электрические сети и системы. М. : Госэнергоиздат, 1960.
10. Тайц А. А. Отклонения и колебания напряжения и влияния их на потребителей электроэнергии / Доклады на Всесоюзной конференции по качеству напряжения и его регулированию в электрических сетях и системах. М. : Связьиздат, 1961.
11. Айзенберг Б. Л. Замкнутая электрическая сеть без сетевых автоматов. М. : Госэнергоиздат, 1948.
12. Айзенберг Б. Л. О рациональном построении городских электрических сетей // Электричество. 1951. № 2.
13. Айзенберг Б. Л. К вопросу о расчете замкнутых электрических сетей // Электричество. 1954. № 9.
14. Айзенберг Б. Л. Теоретические основы рационального построения городских электрических сетей // Труды ЛИЭИ. 1959. Вып. 32.
15. Айзенберг Б. Л. Влияние неравномерности нагрузки фаз городской сети 0,4 кВ на напряжение в установках потребителей и

его экономическая оценка // Регулирование напряжения в электрических сетях. М. : Энергия, 1968.

16. Левин М. С. О количественной оценке качества напряжения // Электричество. 1962. № 4.

17. Гессен Ю. В. Аварийные режимы и защита от них в сельскохозяйственных электросетях. М. : Сельхозгиз, 1961.

18. Мартыненко И. И. Допустимая мощность электродвигателей при несимметрии напряжений // Механизация и электрификация социалистического сельского хозяйства. 1957. № 4.

19. Мартыненко И. И. Допустимая нагрузка асинхронных электродвигателей при ненормальном напряжении // Механизация и электрификация социалистического сельского хозяйства. 1965. № 5.

20. Козлов В. А. Дискуссия к статье Мокрицкого Ф. Ф. «О целесообразности применения частично замкнутых сетей» // Электричество. 1951. № 6.

21. Козлов В. А. Городские замкнутые электрические сети. М. : Госэнергоиздат, 1961.

22. Солдаткина Л. А. Вопросы качества напряжения в распределительных электрических сетях. М. : Изд-во МЭИ, 1963.

23. Солдаткина Л. А. Регулирование напряжения в городских сетях. М.-Л. : Энергия, 1967.

24. Тушина А. А. О несимметрии нагрузки в городских распределительных сетях низкого напряжения // Электричество. 1959. № 10.

25. Тушина А. А. К вопросу определения потерь мощности и отклонений напряжения в городских распределительных сетях напряжением до 1000 В при асимметрии нагрузки // Научные труды Академии коммунального хозяйства. 1963. Вып. 21.

26. Прищеп В. Г. К вопросу о нормировании отклонений напряжения у потребителей и определение их оптимальной величины // Доклады на Всесоюзной конференции по качеству напряжения и его регулированию в электрических сетях и системах. М. : Связьиздат, 1961.

27. Солдаткина Л. А. Регулирование напряжения в городских и сельских электрических сетях. М.-Л. : Энергия, 1968.

28. Царева Н. П. Исследование качества напряжения на примере электроснабжения металлургического завода «Серп и молот» // Вопросы экономической эффективности в энергетике / Научные труды МЭИ. 1971. Вып. 37.

29. Отчет о научно-исследовательской работе «Повышение качества напряжения в сельских распределительных сетях путем симметрирования напряжения». Мн. : БИМСХ, 1972.

30. Збродыго В. М. Несимметрия и несинусоидальность напряжений в сетях 0,38 кВ сельскохозяйственного назначения // Перспективы и направления развития энергетики АПК : матер. Междунар. науч.-технич. конференции, Минск, 29–30 ноября 2006 г. Минск : БГАТУ, 2006.

31. Либкинд М. С. Высшие гармоники, генерируемые трансформаторами. М. : АН СССР, 1962.

32. Глинтерник С. Р. Электромагнитные процессы и режимы мощных статических преобразователей. Л. : Наука, 1968.

33. Костенко М. П. Электромагнитные процессы в системах с мощными выпрямителями установками. М. : АН СССР, 1943.

34. Харламова З. В. Совершенствование методов расчета и снижение уровней высших гармоник в электрических сетях энергосистем. Жданов, 1983.

35. Краснушкин Н. П. Высшие гармоники напряжения на шинах подстанций предприятий // Электричество. 1940. № 4.

36. Маркушевич Н. С. Качество напряжения в городских электрических сетях. 2-е изд. М. : Энергия, 1975.

37. Жежеленко И. В. Высшие гармоники в системах электроснабжения промышленных предприятий. 5-е изд. М. : Энергоатомиздат, 2004.

38. Жежеленко И. В. Качество электроэнергии на промышленных предприятиях. 4-е изд. М. : Энергоатомиздат, 2005.

39. Жежеленко И. В. Электромагнитная совместимость в системах электроснабжения промышленных предприятий // Электрика. 2008. № 10.

40. Поспелов Г. Е., Царегородцев В. А. Электроэнергия и ее качество // Промышленность Белоруссии. 1971. № 6.

41. Царегородцев В. А. О появлении высших гармоник тока и напряжения в энергетических системах при наличии мощных преобразовательных подстанций // Тезисы докладов науч.-технич. конференции молодых ученых Белоруссии. Мн. : БТИ, 1969.

42. Мусаев З. Н. Исследование параметров, характеристик и режимов работы силовых трансформаторов при несимметрии и несинусоидальности напряжения сети. Баку : АзТУ, 1971.

43. Счастный В. П. Обеспечение качества напряжения в сельскохозяйственных электроустановках с трехфазными однофазными выпрямителями. Мн. : БИМСХ, 1987.

44. Янукович Г. И. Влияние тиристорной нагрузки на форму кривой напряжения в сельских низковольтных сетях. В кн.: Повышение надежности электроустановок в сельском хозяйстве. Челябинск : Челябинский рабочий, 1986.

45. Янукович Г. И. Несинусоидальность напряжения в сельских электрических сетях 0,4 кВ // Известия вузов. Энергетика. 1989. № 6.

46. Суднова В. В. Качество электрической энергии. М. : Энергосервис, 2000.

47. Шидловский А. К. Повышение качества энергии в электрических сетях. Киев : Наукова думка, 1985.

48. Вагин Г. Я. Электромагнитная совместимость в электроэнергетике. Нижний Новгород : НГТУ, 2004.

49. Карташов И. И. Требования к средствам измерения показателей качества электроэнергии // Электричество. 2000. № 4.

50. Прокопчик В. В. Повышение качества электроснабжения и эффективности электрооборудования предприятий с непрерывными технологическими процессами. Гомель : ГГТУ, 2002.

51. Шидловский А. К. Электромагнитная совместимость электроприемников промышленных предприятий. Киев : Наукова думка, 1992.

52. Дерунов В. А. Методы и устройства симметрирования напряжений в системах электроснабжения. Саратов, 2005.

53. Косоухов Ф. Д. Методы расчета, способы и средства снижения потерь электрической энергии и повышения ее качества в сельских распределительных сетях 0,38 кВ при несимметричной нагрузке. Л.-Пушкин : ЛГАУ, 1991.

54. Косоухов Ф. Д. Несимметрия напряжений и токов в сельских распределительных сетях. Иркутск : Иркутский дом печати, 2003.

55. Наумов И. В. Оптимизация несимметричных режимов системы сельского электроснабжения. Иркутск : Изд-во «На Чехова», 2001.

56. Бородулин Б. М. Симметрирование токов и напряжений на действующих подстанциях переменного тока // Вестник ВНИИЖТ. 2003. № 2.

57. Левин М. С. Качество электроэнергии в сетях сельских районов. М. : Энергия, 1975.

58. Зулъ Н. М., Левин М.С., Мурадян А.Е., Поярков К.М. Требования к трансформаторам для сельских электрических сетей // Трансформаторостроение : сб. статей по материалам науч.-технич. совещания, Запорожье, апрель, 1960 г. М. : ЦИНТИ, 1961.

59. Левин М. С., Мурадян А.Е. Несимметрия нагрузок в сельских электрических сетях низшего напряжения и ее влияние на качество напряжения // Доклады на Всесоюз. конф. по качеству напряжения и его регулированию в электрических сетях и системах. М. : Связьиздат, 1961.

60. Тушина А. А. Несимметрия напряжений в городских распределительных сетях низкого напряжения // Доклады на Всесоюз. конф. по качеству напряжения и его регулированию в электрических сетях и системах. М. : Связьиздат, 1961.

61. Баркан Я. Д. Несимметрия в сетях низкого напряжения // Электричество. 1970. № 3.

62. Зубко В. М., Рожавский С. М., Позняк В. П. Зависимость мощности, необходимой для асинхронного двигателя, от несимметрии напряжений // Механизация и электрификация социалистического сельского хозяйства. 1971. № 5.

63. Кузнецов В. Г., Дядищев Б. А. Эксплуатационные несимметричные режимы в распределительных сетях и пути их устранения // Проблемы технической электродинамики. Киев : Наукова думка, 1971. Вып. 29.

64. Бондаренко С. П. Рациональное использование электроэнергии // Механизация и электрификация социалистического сельского хозяйства. 1974. № 2.

65. Ганиходжаев Н. Г., Брежнев В. И. Несимметрия в электрических сетях и способы ее снижения // Обеспечение надежности электроснабжения сельскохозяйственных потребителей : Тезисы докладов к Всесоюз. науч.-технич. совещанию, 19–21 сентября 1972 г. М. : ВИЭСХ, 1972.

66. Сакулин В. О поражении животных электрическим током // Техника в сельском хозяйстве. 1970. № 1.

67. Свергун Ю. Ф., Рожавский С. М. Несимметрия в сельских сетях 380/220 В и способы ее уменьшения // Обеспечение надежности электроснабжения сельскохозяйственных потребителей : Тезисы

докладов к Всесоюз. науч.-технич. совещанию, 19–21 сентября. М. : ВИЭСХ, 1972.

68. Сердешнов А. П. К асимметрии токов в распределительных сетях сельскохозяйственного назначения // Доклады ТСХА. М., 1963. Вып. 81.

69. Васютинский С. Б. Вопросы теории и расчета трансформаторов. Л. : Энергия, 1970.

70. Сердешнов А. П. Нагрузочная способность потребительских трансформаторов при несимметричной нагрузке фаз в сельских электрических сетях. Челябинск : ЧИМЭСХ, 1969.

71. Янукович Г. И. Исследование трансформатора со схемой соединения обмоток Y/Y–разомкнутый треугольник с целью использования его в сельских электрических сетях 380/220 В для повышения качества напряжения. Челябинск : ЧИМЭСХ, 1975.

72. Карташов И. И. Управление качеством электроэнергии. М. : МЭИ, 2006.

73. Петров В. М., Щербаков Е. Ф., Петрова М. В. О влиянии бытовых электроприемников на работу смежных электротехнических устройств // Промышленная энергетика. 1998. № 4.

74. Андрианов В. И., Быстрицкий Д. Н., Сырых Н. Н. Качество напряжения в сельских электросетях // Вестник с.-х. науки. 1966. № 6.

75. Иванов В. С., Соколов В. И. Режимы потребления и качество электроэнергии систем электроснабжения промышленных предприятий. М. : Энергоатомиздат, 1987.

76. Жилинский Ю. М., Свентицкий И. И. Электрическое освещение и облучение в сельскохозяйственном производстве. М. : Колос, 1968.

77. Пинчук О. Г. Энергетические показатели асинхронного двигателя при различных параметрах несимметрии питающего напряжения // Сб. науч. тр. / ДВНЗ «ДонНТУ». Донецк, 2008. Вып. 8 (140) : Электротехника и энергетика.

78. Попович А. Н. Определение и учет коэффициента мощности при улучшении технико-экономических характеристик асинхронных электроприводов в динамических режимах с учетом несимметрии // Техническая электродинамика. 2003. № 6.

79. Яшков В. А. Экономическая оценка последствий снижения качества электроэнергии // Промышленная энергетика. 2005. № 2.

80. Гусаров А. А. Анализ современных систем температурной диагностики асинхронных двигателей // Сб. науч. тр. / ДВНЗ «ДонНТУ». Донецк, 2007. Вып. 7 (128) : Электротехника и энергетика.

81. Гусаров А. А. Влияние качества электрической энергии на тепловое состояние трехфазных асинхронных двигателей с короткозамкнутым ротором // Сб. науч. тр. / ДВНЗ «ДонНТУ». Донецк, 2008. Вып. 8 (140) : Электротехника и энергетика.

82. Дмитриева О. М. Энергетические соотношения при питании двигателей несимметричным напряжением // Сб. науч. тр. / ДВНЗ «ДонНТУ». Донецк, 2007. Вып. 7 (128) : Электротехника и энергетика.

83. Федоров М. М. Влияние напряжения обратной последовательности на эксплуатационные характеристики асинхронного двигателя // Сб. науч. тр. / ДВНЗ «ДонНТУ». Донецк, 2003. Вып. 67 : Электротехника и энергетика.

84. Федоров М. М. Тепловое состояние асинхронных двигателей в повторно-кратковременном режиме при асимметрии источника питания // Сб. науч. тр. / ДВНЗ «ДонНТУ». Донецк, 2004. Вып. 98 : Электротехника и энергетика.

85. Шевченко О. А. О пожарной опасности асинхронных двигателей, эксплуатирующихся на промышленных предприятиях // Сб. науч. тр. / ДВНЗ «ДонНТУ». Донецк, 2003. Вып. 67 : Электротехника и энергетика.

86. Шполянский О. Г. Оценка влияния несимметрии и несинусоидальности на потери активной мощности и снижение срока службы электрооборудования // Сб. науч. тр. / ИЭ НАН Украины. Киев, 2007. № 1.

87. Иванов В. С. Методы расчета несинусоидальности напряжения и исследование резонансных явлений на высших гармониках в сети внутриводского электроснабжения при работе вентильных преобразователей. М., 1976.

88. Протосовицкий И. В. Использование трансформаторов Y/Y_n с общестержневой симметрирующей обмоткой в сельских электрических сетях. Минск, 1995.

89. Шевчик Н. Е. Повышение качества напряжения в сельских сетях путем использования в них трансформаторов с дополнительными обмотками. Челябинск : ЧИМЭСХ, 1985.

90. Портнягин А. В. Влияние несинусоидальности на работу фильтров напряжения обратной последовательности // Электрика. 2005. № 11.

91. Сукьясов С. В. Применение технических средств симметрирования нагрузок в сельских распределительных сетях 0,38 кВ для повышения качества и снижения потерь электрической энергии. Иркутск, 2004.

92. Зубко В. М., Рожавский С. М., Позняк В. П. Потери мощности в проводах при неравномерной нагрузке фаз // Энергетика и электрификация. 1970. № 1.

93. Бурбело М. И. Симметрирование токов и напряжений узлов электрических сетей с использованием компенсационных установок при несимметричном источнике питания // Сб. науч. тр. / ВНТУ. Винница, 2008. Вып. 1 : Энергетика и электротехника.

94. Терешкевич Л. Б. Снижение уровня несимметрии напряжений в процессе управления конденсаторными установками в электрических распределительных системах // Сб. науч. тр. / ВНТУ. Винница, 2005. Вып. 6 : Энергетика и электротехника.

95. Устройство для симметрирования и компенсации реактивной мощности: пат. 2229766 РФ, МКП7 Н02J3/18 / С. А. Шишкин; заявитель С. А. Шишкин. № 2002126525 ; заявл. 07.10.02 ; опубл. 27.05.04 // Бюл. № 15. 2004.

96. Рожавский С. М., Зубко В. М., Свергун Ю. Ф. Уменьшение смещения нейтрали в неравномерно нагруженных сельскохозяйственных сетях 0,4/0,23 кВ с помощью трансреакторов // Материалы Всесоюз. науч.-технич. совещания по электрификации сельского хозяйства. Вып. 2. М.-Уфа, ОНТИ Сельэнергопроект, 1971.

97. Куликовский А. А. Система городских распределительных сетей с искусственной нейтральной точкой // Электричество. 1947. № 9.

98. Наумов И. В. О качестве электрической энергии и дополнительных потерях мощности в распределительных сетях низкого напряжения России и Германии // Электрика. 2005. № 11.

99. Дайновский Р. А. Исследование режимов работы СТАТКОМ, выполненного на базе трехуровневого преобразователя напряжения // Электротехника. 2010. № 8.

100. Ефимов А. А. Активные преобразователи в регулируемых электроприводах переменного тока. Новоуральск : НГТИ, 2001.

101. Зубко В. М. Симметрирование и уравнивание напряжений и токов в сельскохозяйственных сетях 0,38 кВ. Харьков : ХИМЭСХ, 1971.

102. Капустин В. М. Компьютеры и трехфазная электрическая сеть // Современные технологии автоматизации. 1997. № 2.

103. Климов В. П. Проблемы высших гармоник в современных системах электропитания // Практическая силовая электроника : сб. науч. тр. / АОЗТ «ММП-Ирбис». М., 2002. Вып. 5.

104. Пронин М. В. Активная фильтрация напряжений и токов сети в установках с высоковольтными тиристорными преобразователями // Горное оборудование и электромеханика. 2005. № 5.

106. Пронин М. В. Электроприводы и системы с электрическими машинами и полупроводниковыми преобразователями (моделирование, расчет, применение). СПб. : Электросила, 2004.

107. ГОСТ 12022–66. Трансформаторы трехфазные силовые масляные общего назначения мощностью от 25 до 630 кВ·А на напряжение до 35 кВ включительно. Основные параметры и технические требования.

108. Важнов А. И. Электрические машины. Л. : Энергия, 1969.

109. Костенко М. П. Электрические машины. М.-Л. : Госэнергоиздат, 1949.

110. Костенко М. П., Пиотровский Л. М. Электрические машины. Ч. 1. М.-Л. : Энергия, 1964.

111. Петров Г. Н. Трансформаторы. Т. 1. Основы теории. М.-Л. : Госэнергоиздат, 1934.

112. Петров Г. Н. Электрические машины. Ч. 1. Введение. Трансформаторы. М.-Л. : Госэнергоиздат, 1956.

113. Пиотровский Л. М. Электрические машины. М.-Л. : Госэнергоиздат, 1963.

114. Баркан Я. Л. Автоматизация регулирования напряжения в распределительных сетях. М. : Энергия, 1971.

115. Козюков В. А. Исследование добавочных потерь в потребительских трансформаторах сельских электрических сетей. Челябинск : ЧИМЭСХ, 1967.

116. О целесообразности применения в сельских электрических сетях трансформаторов со схемой соединения обмоток «звезда–зигзаг–нуль». Научный отчет ВИЭСХ. М. : ВИЭСХ, 1958.

117. Сердешнов А. П., Янукович Г. И. О схемах соединения обмоток трансформаторов в сельских распределительных электрических сетях / Материалы Всесоюз. науч.-технич. совещания по электрификации сельского хозяйства. Вып. 2. М.-Уфа : ОНТИ Сельэнергопроект, 1971.

118. Янукович Г. И., Сердешнов А. П. О целесообразности использования в сельских электрических сетях трансформаторов со схемой соединения обмоток «звезда–звезда–нуль–разомкнутый треугольник» / Обеспечение надежности электроснабжения сельскохозяйственных потребителей. М. : ВИЭСХ, 1972.

119. Трехфазный трансформатор. А.с. № 1099328 / Сердешнов А. П., Янукович Г. И., Шевчик Н. Е., Янукович А. И., Чучман Г. П. ; заявитель БИМСХ. Заявка № 3529884. Приоритет изобретения 27.12.1982. Зарегистрировано в Государственном реестре СССР 22.02.1984.

120. Трехфазный трансформатор: пат. 2244 Респ. Беларусь, МКП7 Н 01F 30/12 / Сердешнов А. П., Янукович Г. И., Сердешнов Е. А., Янукович Д. Г. ; заявитель УО БГАТУ. № 950299 ; заявл. 09.06.95 ; опубл.30.09.98 // Афіцыйны бюл. / Нац. центр інтэлектуал. уласнасці. 1998. № 3 (18).

121. Симметрирующее устройство. Пат. на полезную модель № 6642, РБ, 29.06.2010 г.

122. Устройство для симметрирования напряжения при несимметричной нагрузке фаз. Пат. на изобретение № 16121, РБ, 27.09.2010 г.

123. Товинский В. А. Диаграмма напряжений трехфазного синхронного генератора // Электричество. 1924. № 2.

124. Гохберг С. М. Влияние несимметрии нагрузки на вторичные напряжения трехфазных трансформаторов. Л. : Кубуч, 1933.

125. Обердорф Г. Расчет по методу симметричных составляющих. М.-Л. : ОНТИ, 1931.

126. Бургучев С. А. Электрические станции, подстанции и системы. М. : Колос, 1964.

127. Круг К. А. Основы электротехники. М. : Госэнергоиздат, 1952.

128. Ульянов С. А. Короткие замыкания в электрических системах. М. : Госэнергоиздат, 1952.

129. Янукович Г. И., Янукович А. И., Сердешнов А. П. Схема замещения трансформатора «звезда–звезда–разомкнутый треугольник с нулем» // Механизация и электрификация сельского хозяйства. 1974. Вып. 16.

130. Янукович Г. И., Сердешнов А. П. О симметрировании напряжения в сельских распределительных электрических сетях : тезисы докл. к науч.-техн. совещанию, 11–12 октября, 1973 г. / Электрификация сельского хозяйства. Мн. : ЦНИИМЭСХ, 1973.

131. Янукович Г. И. Несимметричная работа трансформатора со схемой соединения обмоток «звезда–звезда–разомкнутый треугольник с нулем» // Пути совершенствования сельскохозяйственной техники. 1974. Вып. 26.

132. Мельников Н. А., Солдаткина Л. А. Регулирование напряжения в электрических сетях. М. : Энергия, 1968.

133. Сердешнов А. П., Янукович Г. И., Дорошко Ф. А. Векторная диаграмма напряжений трансформатора «звезда–звезда с выведенной нейтралью и разомкнутым треугольником» // Пути совершенствования сельскохозяйственной техники. 1973. Вып. 25.

134. Пиотровский Л. М., Васютинский С. Б., Несговорова Е. Д. Испытания электрических машин. М.-Л. : Госэнергоиздат, 1960.

135. Пястолов А. А. Научные основы эксплуатации электросилового оборудования. М. : Колос, 1968.

136. Янукович Г. И., Сердешнов А. П. Определение сопротивления нулевой последовательности трансформатора со схемой соединения обмоток Y/Y_n –разомкнутый треугольник при ненасыщенном сердечнике // Пути совершенствования сельскохозяйственной техники. 1972. Вып. 21.

137. Янукович Г. И., Протосовицкий И. В., Королевич Н. Г. Схема замещения трансформатора со схемой соединения обмоток Y/Y_n со специальным симметрирующим устройством (Y/Y_n СУ) // Агропанорама. 2012. № 6.

138. Янукович Г. И., Протосовицкий И. В., Королевич Н. Г. Несимметричный режим работы трансформатора со схемой соединения обмоток «звезда–звезда–нуль с симметрирующим устройством» (Y/Y_n СУ) // Агропанорама. 2012. № 4.

139. Протосовицкий И. В., Янукович Г. И. Исследование температурных полей трансформатора Y/Y_n СУ / Энергосбережение – важнейшее условие инновационного развития АПК : материалы Междунар. науч.-технич. конф., Минск, 23–24 октября 2009 г. Минск : БГАТУ, 2009.

140. Метелица Я. В. Разработка и исследование методов и средств для определения параметров нулевой последовательности трансформаторов сельских электрических сетей. Челябинск, ЧИ-МЭСХ, 1974.

141. ГОСТ 11677–85. Трансформаторы (и автотрансформаторы) силовые. Общие технические требования.

142. Збрядыга В. М. Улучшение показателей несинусоидальности и несимметрии напряжений в электроустановках сельскохозяйственного назначения применением трансформатора со схемой соединения обмоток «звезда–треугольник с зигзагом». Минск, 2010.

143. Правила устройства электроустановок. 6-е изд. Вильнюс : Ксения, 2009.

144. Каталог выпускаемой продукции // ООО «Завод низковольтной аппаратуры» [Электронный ресурс]. 2010. URL: http://zavodnva.com/index.php?id=pr_1_59 (дата обращения: 01.05.2010).

145. Каталог выпускаемой продукции // ПРУП «МЭТЗ им. В.И. Козлова» [Электронный ресурс]. 2010. URL: www.metz.by (дата обращения: 01.05.2010).

146. Каталог выпускаемой продукции // ООО «Россеть» [Электронный ресурс]. 2010. URL: <http://www.rosseti.ru/pr-8503-8703> (дата обращения: 30.04.2010).

147. Трехфазный преобразователь переменного напряжения в постоянное : пат. 4506 Респ. Беларусь, МКП7 Н 02М 7/12 / Сердешнов А. П., Янукович Г. И., Сердешнов Е. А., Янукович Д. Г.; заявитель УО БГАТУ. № а 19980573 ; заявл. 16.06.98 ; опубл. 30.06.02 // Афіцыйны бюл. / Нац. цэнтр інтэлектуал. уласнасці. 2002. № 2 (33).

148. Медведев К. М. Электромагнитная совместимость преобразователей регулируемого электропривода промышленных предприятий с системой электроснабжения. Минск : БНТУ, 2007.

149. Янукович Г. И., Збродыга В. М. Повышение надежности работы систем автоматики путем улучшения формы кривой выходного напряжения вентильного преобразователя частоты // Автоматизация производственных процессов в сельском хозяйстве : материалы Междунар. науч.-технич. конф., Минск–Москва, 7–9 июня 2000 г. Минск-М. : БГАТУ, 2000.

150. Янукович Г. И., Збродыга В. М. Снижение потерь электроэнергии у потребителей при питании от вентильных преобразователей частоты // Аграрная энергетика в XXI веке : материалы Междунар. науч.-технич. конф., Минск, 25–26 сентября 2001 г. Минск : ИЭ АПК НАНБ, 2001.

151. Збродыга В. М., Янукович Г. И., Сердешнов А. П. Анализ работы трансформатора Y/Δ с зигзагом при несимметричном характере нагрузки // Агропанорама. 2006. № 5.

152. Работа трансформаторов со схемами соединения обмоток «звезда–звезда–разомкнутый треугольник с нулем» и $Y/Y_n/СU$ при нелинейной нагрузке // Агропанорама. 2013. № 1.

153. Тихомиров П. М. Расчет трансформаторов : учеб. пособие. 5-е изд. М. : Энергоатомиздат, 1986.

154. Прищепов М. А., Збродыга В. М., Янукович Г. И. Методика расчета конструктивных параметров трансформатора со схемой соединения обмоток «звезда–треугольник с зигзагом» // Агропанорама. 2010. № 5.

155. Прищепов М. А., Збродыга В. А., Рутковский И. Г., Янукович Г. И. Программа «Оптимизация параметров трансформатора». Свидетельство о регистрации компьютерной программы № 257. Правообладатель компьютерной программы: УО БГАТУ. Заявка № С20100134. Дата подачи: 11.11.2010. Дата внесения записи в Реестр зарегистрированных компьютерных программ 01.12.2010. Национ. центр интеллект. собственности РБ.

156. Рутковский И. Г., Збродыга В. А., Прищепов М. А., Янукович Г. И. Расчет трансформатора. Свидетельство о регистрации компьютерной программы № 242. Правообладатель компьютерной программы: УО БГАТУ. Заявка № С20100122. Дата подачи: 14.10.2010. Дата внесения записи в Реестр зарегистрированных компьютерных программ 25.10.2010. Национ. центр интеллект. собственности РБ.

157. Збродыга В. А., Прищепов М. А., Янукович Г. И. Технико-экономическая оптимизация параметров трансформатора со схемой соединения обмоток «звезда–треугольник с зигзагом» // Агропанорама. 2010. № 6.

158. Збродыга В. М., Янукович Г. И. Влияние соотношения основных размеров трансформатора на его параметры // Наука – образованию, производству, экономике : материалы 10-й Междунар. науч.-технич. конф. : в 4 т. Т. 1. Минск : БНТУ, 2012.

159. Янукович Г. И., Збродыга В. М. Влияние материала и формы поперечного сечения обмоточного провода на оптимальные параметры трансформатора со схемой «звезда–треугольник с зигзагом» // Наука – образованию, производству, экономике : материалы 10-й Международ. науч.-технич. конф. : в 4 т. Т. 1. Минск : БНТУ, 2012.

160. Технический кодекс установившейся практики. ТКП 45-4.04-149-2009 (02250). Системы электрооборудования жилых и общественных зданий. Правила проектирования. Минск, 2009.

161. ГОСТ 3484-65. Трансформаторы силовые. Методы испытаний.

162. Aillete P.L'introduction de la mesure dans la nation de la qualite du service d'unt distribution et son interet au point de vue la conception des reseau. BSFE. Janvier. 1956. № 61.

163. Kochel M. Uproszczone metoda porownawcza obliczania spadkow napięć w niskonahie,ciowej sieci obciażonej nitsymetrycznie. Przegląd Electrotechniczny. 1969. № 9.

164. Hamerak K. Über die unsymmetrische Belastung von Drehstrom netzen. Technika. 1971. № 12.

165. Bernard S., Trochain G. Compensation of Harmonic Currents Generated By Computers Utilizing an Innovative Active Harmonic Conditioner // MGE 0128. MGE UPS Systems, 2000.

166. Bernard S., Fiorina J.N., Gros B. THM Filtering and the Management of Harmonic Upstream of UPS // MGE 0246. MGE UPS Systems, 2000.

167. Bettega E., Fiorina J.N. Active Harmonic Conditioners and Unity Power Factor Rectifiers/ E. Bettega // ECT 183. Cahier Technique Schneider Electric, 1999.

168. Buja G., Castellan S. Active filter for high-power medium-voltage diode rectifiers. Toulouse, Fr. : EPE, 2003.

169. Dugan R.C., McGranaghan M.F., Beaty H.W. Electrical Power Systems Quality. McGraw-Hill, 1996.

170. Ezer D., Hanna R.A., Penny J. Active Voltage Correction for Industrial Plants // IEEE TRANSACTIONS ON INDUSTRY APPLICATIONS. 2002. № 6.

171. Fiorina J.N. Inverters and Harmonics // Cahier Technique Merlin Gerin. 1997. № 159.

172. Forrester W. Networking in Harmony // Electrical Contractor. 1996. Nov./Dec.

173. Gruzs T.M. An Optimized Three-Phase Power Conditioner Featuring Deep Sag Protection and Harmonic Isolation. Liebert Corporation, 1996.

174. Harmonic Disturbances in Networks and Their Treatment // Cahier Technique Schneider Electric. 1996. № 152.

175. Houdek J.A. Economical Solutions to Meet Harmonic Distortion Limits. MTE Corporation, 1999.

176. K-Factor Transformers and Nonlinear Loads. Liebert Corporation, 1997.

177. Kilic T., Milun S. Three-Phase Shunt Active Power Filter Using IGBT Based Voltage Source Inverter. Cavtat & Dubrovnik, Croatia : EPE-PEMC, 2002.

178. Kincic S., Chandra A., Huang Z. Simulation Study on Enhancement of Maximum Power Transfer Capability of Long Transmission Line With Midpoint Sitting STATCOM for Voltage Support. Cavtat & Dubrovnik, Croatia : EPE-PEMC, 2002.

179. Liserre M., Blaabjerg F., Hansen S. Design and Control of an LCL-Filter Based Three-Phase Active Rectifier // IEEE TRANSACTIONS ON INDUSTRY APPLICATIONS. 2005. № 5.

180. Mo O., Ljokelsoly K. Active damping of oscillations in LC-filter for line connected, current controlled, PWM voltage source converters. Toulouse, Fr. : EPE, 2003.

181. Newman M.J., Zmood D.N., Holmes D.G. Stationary Frame Harmonic Reference Generation for Active Filter Systems // IEEE TRANSACTIONS ON INDUSTRY APPLICATIONS. 2002. № 6.

182. Peng F.Z., Lai J. Multilevel Voltage-Source Inverter with Separate DC Sources for Static Var Generation // IEEE TRANSACTIONS ON INDUSTRY APPLICATIONS. 2005. № 4.

183. Sine Wave THM Active Harmonics Conditioners/ MGE 0023. MGE UPS Systems, 1997.

184. Soto D. et al. A non-linear control strategy for a cascaded multi-level STATCOM using a fixed switching pattern. Toulouse, Fr. : EPE, 2003.

185. The Datawave Magnetic Synthesizer As a Solution to Harmonics. Liebert Corporation, 1997.

186. UPS and Power Protection Solution. Design Guide/ MGE 0135. MGE UPS Systems, 1998.

187. Yacamini R. Power System Harmonics. Part 3 – Problems caused by distorted supplies // Power Engineering Journal. 1995. Oct.

188. Fortescue C.L. Method of Symmetrical Applied to the Solution of Polyphase Networks, Transaktions of the American Institute of Electrical Engineers. 1918. Vol. 37

Таблица П1

Зависимость фазных напряжений трансформатора
со схемой соединения обмоток Y/Y_n от тока нагрузки

U_A	U_B	U_C	U_a	U_b	U_c	I_a	I_b	I_c	$I_{нп}$
Режим $I_a = I_n \div 0, I_b = I_c = \text{const}$									
1,000	1,000	1,000	1,000	1,000	1,000	1,000	1,000	1,000	0,000
1,000	1,000	0,980	1,015	1,008	0,996	0,875	1,000	1,000	0,120
1,000	1,000	0,960	1,019	1,012	0,972	0,750	1,000	1,000	0,236
1,013	1,013	0,950	1,031	1,024	0,960	0,625	1,000	1,000	0,338
1,009	1,009	0,927	1,024	1,015	0,928	0,500	1,000	1,000	0,460
1,000	1,018	0,900	1,031	1,031	0,913	0,375	1,000	1,000	0,575
1,009	1,027	0,886	1,048	1,040	0,897	0,250	1,000	1,000	0,687
1,013	1,040	0,854	1,048	1,048	0,853	0,000	1,000	1,000	0,920
Режим $I_a = I_b = I_n \div 0, I_c = I_n = \text{const}$									
1,000	1,000	1,000	1,000	1,000	1,000	1,000	1,000	1,000	0,000
0,991	1,018	0,991	0,990	1,024	0,996	0,875	0,875	1,000	0,120
0,976	1,028	0,985	0,984	1,040	0,984	0,750	0,750	1,000	0,241
0,972	1,042	0,972	0,976	1,049	0,967	0,625	0,625	1,000	0,350
0,958	1,061	0,958	0,980	1,089	0,967	0,500	0,500	1,000	0,485
0,943	1,075	0,943	0,967	1,130	0,951	0,375	0,375	1,000	0,605
0,934	1,086	0,934	0,964	1,146	0,945	0,250	0,250	1,000	0,717
0,915	1,117	0,915	0,958	1,195	0,930	0,000	0,000	1,000	1,000

ПРИЛОЖЕНИЯ

Таблица П2

Зависимость фазных напряжений трансформатора со схемой соединения обмоток Y/Y_n –разомкнутый треугольник от тока нагрузки

Вышшая сторона			Низшшая сторона						
U_A	U_B	U_C	U_a	U_b	U_c	I_a	I_b	I_c	$I_{нп}$
Режим $I_a = I_n \div 0, I_c = I_b = I_n = \text{const}$									
1,000	1,000	1,000	1,000	1,000	1,000	1,000	1,000	1,000	0,000
1,000	1,000	1,000	1,000	1,000	1,000	0,875	1,000	1,000	0,120
1,000	1,000	1,000	1,000	1,000	1,000	0,750	1,000	1,000	0,242
1,000	1,000	1,000	1,008	1,000	1,000	0,625	1,000	1,000	0,375
1,000	1,000	1,000	1,014	1,000	1,000	0,500	1,000	1,000	0,480
1,000	1,000	1,000	1,023	1,000	1,000	0,375	1,000	1,000	0,605
1,000	1,000	1,000	1,035	1,000	1,000	0,250	1,000	1,000	0,730
1,000	1,000	1,000	1,051	1,000	1,000	0,000	1,000	1,000	0,980
Режим $I_a = I_b = I_n \div 0, I_c = I_n = \text{const}$									
1,000	1,000	1,000	1,000	1,000	1,000	1,000	1,000	1,000	0,000
1,005	1,005	1,005	1,000	1,000	1,000	0,875	0,875	1,000	0,120
1,008	1,008	1,009	1,008	1,000	1,000	0,750	0,750	1,000	0,245
1,009	1,009	1,009	1,012	1,012	1,000	0,625	0,625	1,000	0,365
1,000	1,005	1,000	1,016	1,016	1,000	0,500	0,500	1,000	0,485
1,000	1,000	1,000	1,024	1,024	1,000	0,375	0,375	1,000	0,618
1,005	1,014	1,009	1,031	1,031	1,000	0,250	0,250	1,000	0,740
1,005	1,014	1,009	1,052	1,052	1,000	0,000	0,000	1,000	1,000

Таблица П3

Зависимость коэффициентов несимметрии напряжений по обратной и нулевой последовательности от тока нагрузки

$K_{0U}, \%$				$K_{2U}, \%$	Токи нагрузки, %		
Y/Y_n		Y/Y _n –разомкнутый треугольник			I_a	I_b	I_c
ВН	НН	ВН	НН				
Режим $I_a = I_n \div 0, I_b = I_c = I_n = \text{const}$							
0	0	0	0	0	100,0	100	100
0,9	1,4	0	0	0	87,5	100	100
2,8	3,0	0	0	0	75,0	100	100
3,9	4,7	0	0,3	0,05	62,0	100	100
5,2	6,1	0	0,5	0,10	50,0	100	100
7,5	8,1	0	0,8	0,17	37,5	100	100
8,8	10,0	0	1,2	0,21	25,0	100	100
12,0	13,7	0	1,7	0,28	0	100	100
Режим $I_a = I_b = I_n \div 0, I_c = I_n = \text{const}$							
0	0	0	0	0	100,0	100,0	100
2,0	2,1	0,1	0,2	0	87,5	87,5	100
3,3	3,7	0,2	0,8	0,08	75,0	75,0	100
5,0	5,4	0,3	1,0	0,12	62,5	62,5	100
7,3	7,8	0,3	1,6	0,16	50,0	50,0	100
9,0	10,4	0,5	1,9	0,21	37,5	37,5	100
11,0	12,3	0,7	2,2	0,24	25,0	24,0	100
14,5	20,0	0,8	3,7	0,32	0	0	100

Таблица П4

Зависимость величин смещения нулевой точки от тока нагрузки при работе трансформатора со схемами соединения обмоток Y/Y_н и Y/Y_н-разомкнутый треугольник на несимметричную нагрузку

U ₀ , %		Токи нагрузки, %		
Y/Y _н	Y/Y _н -разомкнутый треугольник	I _a	I _b	I _c
Режим I _a = I _н ÷ 0, I _b = I _c = I _н = const				
0,00	0,00	100,0	100,0	100,0
2,39	0,79	87,5	100,0	100,0
3,58	1,18	75,0	100,0	100,0
4,96	1,26	62,5	100,0	100,0
6,35	1,49	50,0	100,0	100,0
7,95	1,57	37,5	100,0	100,0
9,50	1,73	25,0	100,0	100,0
11,90	2,36	0,0	100,0	100,0
Режим I _a = I _b = I _н ÷ 0, I _c = I _н = const				
0,00	0,00	100,0	0,0	100,0
1,63	0,00	87,5	87,5	100,0
4,07	0,55	75,0	75,0	100,0
5,29	0,95	62,5	62,5	100,0
7,23	1,18	50,0	50,0	100,0
8,95	1,58	37,5	37,5	100,0
10,58	1,73	25,0	25,0	100,0
13,80	2,45	0,0	0,0	100,0

Таблица П5

Зависимость фазных напряжений, коэффициентов нулевой и обратной последовательности напряжений на вводах с нижней стороны трансформаторов ТСЗ-2,5/0,38 от тока в нулевом проводе

I _{н-пр} , А	Эксперимент					Расчет				
	U _a , В	U _b , В	U _c , В	K _{0U} , %	K _{2U} , %	U _a , В	U _b , В	U _c , В	K _{0U} , %	K _{2U} , %
Трансформатор Y/Y _н										
Режим I _a = I _н ...0, I _b = I _c = I _н										
0,00	122	122	122	0,0	0,0	122,0	122,0	122,0	0,0	0,0
1,65	125	125	118	3,6	0,5	125,4	125,4	116,6	4,8	0,4
3,30	129	129	112	7,6	0,9	129,0	129,0	111,2	9,6	0,8
4,95	133	133	106	13,3	1,1	133,0	132,7	105,9	14,4	1,3
6,60	137	137	101	17,3	1,6	137,1	136,5	100,5	19,3	1,7
Режим I _a = I _b = I _н ...0, I _c = I _н										
1,65	129	120	120	4,6	0,5	128,6	120,0	120,0	4,8	80,4
3,30	135	119	118	8,7	0,9	135,3	118,4	118,2	9,6	0,8
4,95	141	117	117	12,3	1,1	141,9	116,9	116,7	14,5	1,3
6,60	147	115	116	16,2	1,6	148,6	115,7	115,4	19,3	1,7
Трансформатор Y/Z _н										
Режим I _a = I _н ...0, I _b = I _c = I _н										
1,65	123	122	122	0,5	0,5	122,4	121,6	121,2	0,2	0,5
3,30	124	122	121	1,4	0,9	123,7	122,0	120,8	0,5	1,0
4,95	125	122	121	1,9	1,3	125,0	122,4	120,6	0,7	1,5
6,60	126	123	121	2,5	1,7	126,2	122,7	120,4	1,0	1,9
Режим I _a = I _b = I _н ...0, I _c = I _н										
1,65	123	124	122	1,0	0,5	122,2	122,8	121,4	0,2	0,5
3,30	124	126	122	1,9	0,9	123,3	124,5	121,6	0,5	1,0
4,95	125	127	122	2,5	1,3	121,4	126,1	121,8	0,7	1,5
6,60	126	128	122	2,9	1,7	125,4	127,8	121,9	1,0	1,9

$I_{н-пр}, A$	Эксперимент					Расчет				
	U_a, B	U_b, B	U_c, B	$K_{0U}, \%$	$K_{2U}, \%$	U_a, B	U_b, B	U_c, B	$K_{0U}, \%$	$K_{2U}, \%$
Трансформатор Y/Y_n –разомкнутый треугольник										
Режим $I_a = I_n \dots 0, I_b = I_c = I_n$										
1,65	123	122	122	0,5	0,5	123,1	121,9	121,3	0,5	0,5
3,30	125	122	122	1,4	0,9	124,6	122,1	120,9	0,9	1,0
4,59	126	122	122	1,9	1,3	126,1	122,3	120,6	1,4	1,5
6,60	127	122	122	2,5	1,7	127,6	122,5	120,2	1,8	2,0
Режим $I_a = I_b = I_n \dots 0, I_c = I_n$										
1,65	123	122	122	0,5	0,5	122,8	123,3	121,5	0,5	0,5
3,30	124	126	122	1,4	0,9	123,9	125,0	121,3	0,9	1,0
4,95	125	127	122	1,9	1,3	125,0	126,7	121,2	1,4	1,5
6,60	126	128	122	2,9	1,7	126,1	128,5	121,0	1,8	2,0
Трансформатор $Y/Y_n C U$										
Режим $I_a = I_n \dots 0, I_b = I_c = I_n$										
0,00	123	122	122	0,5	0,5	123,1	122,9	121,3	0,5	0,5
1,65	125	122	122	1,4	0,9	124,6	122,1	121,0	0,9	1,0
3,30	126	122	122	1,9	1,3	126,1	122,3	120,6	1,4	1,4
4,95	127	122	122	2,5	1,7	127,6	122,5	120,3	1,8	1,9
Режим $I_a = I_b = I_n \dots 0, I_c = I_n$										
1,65	123	124	122	0,5	0,5	122,8	123,3	121,5	0,5	0,5
3,30	124	126	122	1,4	0,9	123,9	125,0	121,4	0,9	1,0
4,95	125	127	122	1,9	1,3	125,0	126,7	121,2	1,4	1,4
6,60	126	128	122	2,9	1,7	126,2	128,4	121,1	1,8	1,9

Зависимость параметров сопротивления нулевой последовательности трансформаторов ТС3-2,5/0,38 с ненасыщенным магнитопроводом от тока в нулевом проводе

Схема трансформатора	I, A	U, B	$P, Вт$	$Z_0, Ом$	$R_0, Ом$	$X_0, Ом$
Y/Y_n	1,6	55,7	36,9	11,6	4,8	10,5
	3,3	110,9	156,8	11,2	4,8	10,1
	5,0	163,5	352,5	10,9	4,7	9,8
	6,6	213,0	614,2	10,8	4,7	9,6
Y/Z_n	1,6	3,0	4,8	0,63	0,63	0,0
	3,3	5,5	18,3	0,56	0,56	0,0
	5,0	8,1	40,5	0,54	0,54	0,0
	6,6	10,5	69,3	0,53	0,53	0,0
Y/Y_n –разомкнутый треугольник	1,6	5,6	8,9	1,16	1,16	0,0
	3,3	11,2	36,9	1,13	1,13	0,0
	5,0	16,6	83,2	1,11	1,11	0,0
	6,6	21,6	142,4	1,09	1,09	0,0
$Y/Y_n C U$	1,6	5,5	8,7	1,14	1,14	0,0
	3,3	10,9	36,3	1,11	1,11	0,0
	5,0	16,3	81,7	1,09	1,09	0,01
	6,6	22,0	139,8	1,10	1,07	0,03

Таблица П7

Зависимость фазных напряжений сети от тока нагрузки
при параллельной работе трансформатора (в о. е.)

Y/Y _н и Y/Y _н			Y/Y _н и Y/Y _н –разомкнутый треугольник			Токи нагрузки		
U _A	U _B	U _C	U _A	U _B	U _C	I _a	I _b	I _c
1,000	1,000	1,000	1,000	1,000	1,000	1,000	1,000	1,000
1,005	1,009	0,976	1,005	1,002	0,998	0,750	1,000	1,000
1,019	1,024	0,943	1,017	1,002	0,990	0,500	1,000	1,000
1,066	1,047	0,929	1,025	1,005	0,986	0,250	1,000	1,000
1,042	1,057	0,863	1,035	1,010	0,978	0,000	1,000	1,000
1,000	1,000	1,000	1,000	1,000	1,000	1,000	1,000	1,000
0,986	1,023	0,986	1,000	1,013	0,996	0,750	0,750	1,000
0,982	1,064	0,982	1,011	1,027	0,995	0,500	0,500	1,000
0,977	1,100	0,977	1,018	1,041	0,993	0,250	0,250	1,000
0,948	1,145	0,948	1,025	1,052	0,991	0,000	0,000	1,000

Таблица П8

Зависимость фазных напряжений на нагрузке от тока нагрузки
при параллельной работе трансформатора (в о. е.)

Y/Y _н и Y/Y _н			Y/Y _н и Y/Y _н –разомкнутый треугольник			Токи нагрузки		
U _a	U _b	U _c	U _a	U _b	U _c	I _a	I _b	I _c
1,000	1,000	1,000	1,000	1,000	1,000	1,000	1,000	1,000
1,024	1,016	0,977	1,012	1,000	0,996	0,750	1,000	1,000
1,033	1,024	0,935	1,025	1,000	0,991	0,500	1,000	1,000
1,098	1,056	0,919	1,055	1,000	0,988	0,250	1,000	1,000
1,081	1,065	0,862	1,068	1,004	0,987	0,000	1,000	1,000
1,000	1,000	1,000	1,000	1,000	1,000	1,000	1,000	1,000
0,996	1,039	0,992	1,016	1,027	1,000	0,750	0,750	1,000
0,992	1,094	0,984	1,039	1,053	1,002	0,500	0,500	1,000
0,992	1,141	0,977	1,063	1,073	1,002	0,250	0,250	1,000
0,984	1,188	0,953	1,079	1,095	1,000	0,000	0,000	1,000

Таблица П9

Зависимость фазных напряжений на выводах высшей стороны трансформаторов от тока нагрузки при их параллельной работе (в о. е.)

Y/Y _H и Y/Y _H			Y/Y _H –разомкнутый треугольник и Y/Y _H						Токи нагрузки		
			Y/Y _H –разомкнутый треугольник			Y/Y _H					
U _A	U _B	U _C	U _A	U _B	U _C	U _A	U _B	U _C	I _a	I _b	I _c
Режим I _a = I _H ÷ 0, I _b = I _c = I _H = const											
1,000	1,000	1,000	1,000	1,000	1,000	1,000	1,000	1,000	1,000	1,000	1,000
1,005	1,009	0,976	1,000	1,005	1,000	1,010	1,000	0,995	0,750	1,000	1,000
1,019	1,024	0,943	1,005	1,005	1,000	1,029	1,000	0,980	0,500	1,000	1,000
1,066	1,047	0,929	1,010	1,010	1,000	1,039	1,000	0,971	0,250	1,000	1,000
1,042	1,057	0,863	1,010	1,015	0,955	1,059	1,005	0,961	0,000	1,000	1,000
Режим I _a = I _b = I _H ÷ 0, I _c = I _H = const											
1,000	1,000	1,000	1,000	1,000	1,000	1,000	1,000	1,000	1,000	1,000	1,000
0,986	1,023	0,986	1,000	1,009	1,000	1,000	1,018	0,991	0,750	0,750	1,000
0,982	1,064	0,982	1,005	1,018	1,005	1,018	1,036	0,986	0,500	0,500	1,000
0,977	1,100	0,977	1,009	1,027	1,009	1,027	1,055	0,977	0,250	0,250	1,000
0,968	1,145	0,968	1,018	1,032	1,018	1,032	1,073	0,964	0,000	0,000	1,000

Таблица П10

Зависимость фазных напряжений при выводах низшей стороны трансформаторов от тока нагрузки при их параллельной работе

Y/Y _H и Y/Y _H			Y/Y _H –разомкнутый треугольник и Y/Y _H						Токи нагрузки		
			Y/Y _H –разомкнутый треугольник			Y/Y _H					
U _a	U _b	U _c	U _a	U _b	U _c	U _a	U _b	U _c	I _a	I _b	I _c
Режим I _a = I _H ÷ 0, I _b = I _c = I _H = const											
1,000	1,000	1,000	1,000	1,000	1,000	1,000	1,000	1,000	1,000	1,000	1,000
1,024	1,016	0,977	1,008	1,000	1,000	1,017	1,000	0,992	0,750	1,000	1,000
1,033	1,024	0,935	1,025	1,000	1,000	1,025	1,000	0,983	0,500	1,000	1,000
1,098	1,056	0,919	1,042	1,000	1,000	1,068	1,000	0,975	0,250	1,000	1,000
1,081	1,065	0,862	1,051	1,008	1,008	1,085	1,000	0,966	0,000	1,000	1,000
Режим I _a = I _b = I _H ÷ 0, I _c = I _H = const											
1,000	1,000	1,000	1,000	1,000	1,000	1,000	1,000	1,000	1,000	1,000	1,000
0,996	1,039	0,992	1,016	1,024	1,004	1,016	1,031	0,996	0,750	0,750	1,000
0,992	1,094	0,984	1,039	1,047	1,016	1,039	1,059	0,988	0,500	0,500	1,000
0,992	1,141	0,977	1,059	1,067	1,020	1,067	1,079	0,984	0,250	0,250	1,000
0,984	1,188	0,953	1,071	1,079	1,024	1,087	1,110	0,980	0,000	0,000	1,000

Таблица П11

Зависимость коэффициентов несимметрии напряжений по обратной и нулевой последовательности от тока нагрузки при параллельной работе трансформаторов (в о. е.)

K _{0U} , %				K _{2U} , %	Токи нагрузки, %		
Y/Y _н и Y/Y _н		Y/Y _н –разомкнутый треугольник и Y/Y _н			I _a	I _b	I _c
Питающая сеть	Нагрузка	Питающая сеть	Нагрузка				
Режим I _a = I _н ÷ 0, I _b = I _c = I _н = const							
0	0	0	0	0	100	100	100
1,8	3,1	0,7	0,8	0,02	75	100	100
5,1	6,3	1,7	2,1	0,10	50	100	100
8,5	9,9	2,5	3,6	0,18	25	100	100
12,0	13,8	3,9	5,3	0,27	0	100	100
Режим I _a = I _b = I _н ÷ 0, I _c = I _н = const							
0	0	0	0	0	100	100	100
2,9	3,4	0,9	1,2	0,07	75	75	100
6,3	7,2	1,8	3,1	0,18	50	50	100
9,1	10,5	3,1	4,5	0,27	25	25	100
12,5	13,9	4,5	5,9	0,39	0	0	100

Таблица П12

Значения фазных токов в обмотках трансформаторов при их параллельной работе (в о. е.)

Токи в цепях трансформаторов								Токи в цепях нагрузки			
Y/Y _н –разомкнутый треугольник				Y/Y _н				I _a	I _b	I _c	I ₀
I _a	I _b	I _c	I ₀	I _a	I _b	I _c	I ₀				
Режим I _a = I _н ÷ 0, I _b = I _c = I _н = const											
0,500	0,500	0,500	0,000	0,500	0,500	0,500	0,000	1,000	1,000	1,000	0,000
0,338	0,500	0,513	0,175	0,412	0,500	0,487	0,075	0,750	1,000	1,000	0,250
0,188	0,500	0,538	0,350	0,312	0,500	0,462	0,150	0,500	1,000	1,000	0,500
0,063	0,500	0,563	0,513	0,187	0,500	0,437	0,237	0,250	1,000	1,000	0,750
Режим I _a = I _b = I _н ÷ 0, I _c = I _н = const											
0,500	0,500	0,500	0,000	0,500	0,500	0,500	0,000	1,000	1,000	1,000	0,000
0,375	0,350	0,538	0,188	0,375	0,400	0,462	0,096	0,750	0,750	1,000	0,284
0,250	0,188	0,563	0,364	0,250	0,312	0,437	0,204	0,500	0,500	1,000	0,568
0,125	0,062	0,600	0,547	0,125	0,188	0,400	0,304	0,250	0,250	1,000	0,851

Таблица П13

Зависимость фазных и линейных напряжений от тока нагрузки трансформатора ТМГСУ-25/10-У1 в режиме однофазной нагрузки

Трансформатор Y/Y _н СУ						
$I_n, A,$ фазы a	U_{ab}, B	U_{bc}, B	U_{ac}, B	U_{a0}, B	U_{b0}, B	U_{c0}, B
3,61	402	398	398	232	230	232
7,22	402	398	398	228	231	232
10,83	400	398	398	225	232	232
14,44	400	400	396	224	232	234
18,05	400	400	394	222	232	236
21,66	400	400	392	216	232	236
25,27	400	396	388	216	232	236
28,88	396	400	388	212	232	236
32,49	396	400	389	208	232	236
36,10	400	404	388	208	236	240

Таблица П14

Зависимость фазных и линейных напряжений от тока нагрузки трансформатора ТМГ-25/10-У1 в режиме однофазной нагрузки

Трансформатор Y/Y _н						
$I_n, A,$ фазы a	U_{ab}, B	U_{bc}, B	U_{ac}, B	U_{a0}, B	U_{b0}, B	U_{c0}, B
3,61	404	404	396	224	238	228
7,22	400	404	396	216	244	232
10,83	400	404	394	210	246	232
14,44	396	404	392	220	248	232
18,05	394	404	390	194	252	236
21,66	392	403	389	188	256	240
25,27	390	403	388	180	260	244
28,88	388	403	384	172	260	248
32,49	384	403	380	164	262	252
36,10	384	402	380	160	264	256

Таблица П15

Зависимость фазных и линейных напряжений от тока нагрузки трансформатора ТМГСУ-25/10-У1 в режиме двухфазной нагрузки

Трансформатор Y/Y _н СУ						
$I_n, A,$ фаз a, b	U_{ab}, B	U_{bc}, B	U_{ca}, B	U_{a0}, B	U_{b0}, B	U_{c0}, B
3,61	408	404	406	236	232	233
7,22	402	402	404	232	231	231
10,83	400	402	402	232	229	234
14,44	396	402	402	228	226	236
18,05	392	400	400	227	225	236
21,66	388	400	396	224	224	236
25,27	384	400	396	222	222	236
28,88	380	400	394	220	220	236
32,49	380	400	392	218	218	236
36,10	376	400	392	216	216	236

Таблица П16

Зависимость фазных и линейных напряжений от тока нагрузки трансформатора ТМГ-25/10-У1 в режиме двухфазной нагрузки

Трансформатор Y/Y _н						
$I_n, A,$ фаз a, b	U_{ab}, B	U_{bc}, B	U_{ac}, B	U_{a0}, B	U_{b0}, B	U_{c0}, B
3,61	400	401	398	228	232	232
7,22	396	400	396	224	228	232
10,83	396	400	400	226	229	238
14,44	393	400	400	224	226	240
18,05	392	402	401	220	226	244
21,66	392	401	404	220	224	248
25,77	388	404	406	218	223	250
28,88	386	404	406	216	220	252
32,49	382	400	406	214	219	256
36,10	380	400	406	212	216	258

Таблица П17

Сравнительные характеристики трансформаторов
ТМГ и ТМГСУ напряжением 10/0,4 кВ

ДЛЯ ЗАМЕТОК

	Мощность, кВА	Потери, кВт		Габариты, мм			Z ₀ , Ом	Масса, кг
		х. х.	к. з.	L	B	H		
ТМГ	25	0,115	0,6	800	640	930	4,05	240
ТМГСУ	25	0,115	0,6	900	530	930	1,417	280
ТМГ	40	0,155	0,88	840	680	1000	2,72	300
ТМГСУ	40	0,155	0,88	900	560	1000	0,837	370
ТМГ	63	0,22	1,28	950	730	1020	1,905	420
ТМГСУ	63	0,22	1,28	950	730	1020	0,6	420
ТМГ	100	0,27	1,97	1180	710	1360	2,124	560
ТМГСУ	100	0,27	1,97	1180	710	1360	0,337	560
ТМГ	160	0,41	2,6	1230	720	1400	1,06	700
ТМГСУ	160	0,41	2,6	1230	720	1400	0,196	710
ТМГ	250	0,58	3,7	1390	820	1480	0,56	1030
ТМГСУ	250	0,58	3,7	1390	820	1480	0,113	1030

ДЛЯ ЗАМЕТОК

Научное издание

Янукович Генрих Иосифович

ПУТИ УЛУЧШЕНИЯ ПОКАЗАТЕЛЕЙ НЕСИММЕТРИИ
И НЕСИНУСОИДАЛЬНОСТИ НАПРЯЖЕНИЯ
В СЕЛЬСКОХОЗЯЙСТВЕННЫХ ЭЛЕКТРОУСТАНОВКАХ

Ответственный за выпуск *М. А. Прищепов*

Редактор *Т. В. Каркоцкая*

Компьютерная верстка *А. О. Лабун*

Дизайн и оформление обложки *И. А. Усенко*

Подписано в печать 11.11.2013. Формат 60×84¹/₁₆.

Бумага офсетная. Ризография.

Усл. печ. л. 12,55. Уч.-изд. л. 9,81. Тираж 100 экз. Заказ 411.

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-т Независимости, 99-2, 220023, Минск.