

Выводы

Таким образом, структурная модель, разработанная на примере сырьевой зоны Бельничского крахмального завода, позволяет увеличить объем сельскохозяйственной продукции, полностью загрузить производственную мощность крахмального завода сырьем, повысить рентабельность промышленного и сельскохозяйственного производств.

ЛИТЕРАТУРА

1. Государственная программа возрождения и развития села на 2005 - 2010 годы./ Белорусская нива, 28.01.2005.
2. Гусаков В.Г. Методологические основы развития кооперативной системы в АПК Беларуси // Весці НАН

Беларусі. Сер. аграр. навук - 2004.- № 4.- С. 5-14.
3. Ленков И.И. Оптимальное планирование АПК района. - Мн., 1987.
4. Методические рекомендации по созданию и функционированию агропромышленных объединений: Сост. В.Г. Гусаков. -Минск: Центр аграрной экономики Института экономики НАН Беларуси, 2006. -152 с.
5. Организационно-экономический механизм образования и функционирования продуктовых агропромышленных формирований /Под ред. В.Г.Гусакова. -Минск: Центр аграрной экономики Института экономики НАН Беларуси, 2006. -51с.

УДК 621.313.333.004.67

ПОСТУПИЛА В РЕДАКЦИЮ 20.05.2006

ЧАСТИЧНЫЙ РЕМОНТ ОБМОТКИ ТРЕХФАЗНОГО АСИНХРОННОГО ДВИГАТЕЛЯ С ДОБАВОЧНЫМ СОПРОТИВЛЕНИЕМ

Т.Г. Базулина, ассистент (УО БГАТУ)

АННОТАЦИЯ

Описан способ частичного ремонта трехфазного асинхронного двигателя, приведена математическая модель трехфазного асинхронного двигателя при частичном ремонте обмотки и алгоритм расчета ее добавочного сопротивления.

Введение

Целесообразность частичного ремонта обмоток трехфазных асинхронных двигателей подтверждается продолжающимся старением изоляции парка этих машин в хозяйствах нашей республики и, как правило, отсутствием в них требуемого запаса новых электродвигателей. В этих условиях выход из строя электромашины, при невозможности быстрой замены, нередко

связан с большими материальными потерями. Известная методика проведения ускоренного частичного ремонта обмоток двигателей 1' (рис.1) путем простого выкусывания из катушечных групп поврежденной секции 2, описанная в технической литературе, в частности [1], вызывает резкое повышение тока в поврежденной фазе, искажение симметрии систем трехфазных токов и напряжений, а также резкое понижение ее энергетических характеристик. Однако введение добавочного сопротивления R_d [2] в цепь поврежденной фазы позволяет в значительной мере снизить ее ток и симметризовать по величине систему фазных токов двигателя. Кроме этого, такой ремонт, во-первых, сокращает время на выполнение ремонта и его стоимость по сравнению с методом замены поврежденной секции; во-вторых, улучшает энергетические характеристики машины ($\cos \phi$ и КПД) и снижает расход электроэнергии в сети и двигателе за счет уменьшения потерь; в-третьих, повышает допустимую загрузку двигателя по сравнению с методом простого выкусывания поврежденной секции без установки R_d .

Математическая модель трехфазного асинхронного двигателя при частичном ремонте обмотки и наличии добавочного сопротивления.

Для расчета токов и напряжений двигателя с неодинаковым числом витков в фазах применен метод симметричных составляющих [3]. Исходя из этого метода, с учетом трехпроводной схемы

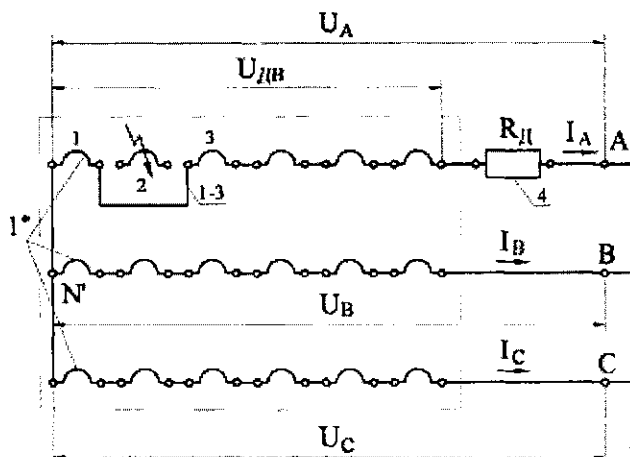


Рис.1. Схема включения дополнительного сопротивления в цепь обмотки с поврежденной секцией: 1' – обмотки двигателя; 1,2,3 – секции обмотки двигателя; 4 – добавочное сопротивление

подключения асинхронного двигателя, линейные токи машины не содержат составляющих нулевой последовательности. Тогда фазные токи \dot{I}_A , \dot{I}_B , \dot{I}_C примут вид:

$$\begin{cases} \dot{I}_A = \dot{I}_1 + \dot{I}_2; \\ \dot{I}_B = \dot{I}_1 \cdot a^2 + \dot{I}_2 \cdot a; \\ \dot{I}_C = \dot{I}_1 \cdot a + \dot{I}_2 \cdot a^2. \end{cases} \quad (1)$$

где \dot{I}_1 и \dot{I}_2 - токи соответственно прямой и обратной последовательностей;

$$a \text{ и } a^2 - \text{операторы } a = e^{-j240^\circ} = -0,5 + j\sqrt{3}/2, \\ a = e^{-j240^\circ} = -0,5 + j\sqrt{3}/2.$$

При этом фазные напряжения будут равны:

$$\begin{cases} \dot{U}_A = \underline{Z}_{0A} \dot{I}_0 + \underline{Z}_{1A} \dot{I}_1 + \underline{Z}_{2A} \dot{I}_2; \\ \dot{U}_B = \underline{Z}_{0B} \dot{I}_0 + a^2 \underline{Z}_{1B} \dot{I}_1 + a \underline{Z}_{2B} \dot{I}_2; \\ \dot{U}_C = \underline{Z}_{0C} \dot{I}_0 + a \underline{Z}_{1C} \dot{I}_1 + a^2 \underline{Z}_{2C} \dot{I}_2. \end{cases} \quad (2)$$

где Z - соответственно полные сопротивления каждой фазы нулевой, прямой и обратной последовательностей - определяются из эквивалентных Т-образных схем замещения асинхронных двигателей [3].

При этом ввиду несимметрии сопротивлений по фазам в машине имеет место напряжение нулевой последовательности, хотя токи нулевой последовательности равны нулю. А так как обмотки двигателя имеют разное количество витков и соединены в звезду без нулевого провода, то к фазным обмоткам (фаза - ноль двигателя) будет приложено несимметричное напряжение при симметрии напряжения в сети (фаза - ноль генератора).

Учитывая, что $\dot{I}_0 = 0$ и линейные напряжения сети симметричны $\dot{U}_0 = 0$, то уравнения (2) можно записать:

$$\begin{cases} \dot{U}_0 = \frac{1}{3}(\dot{U}_A + \dot{U}_B + \dot{U}_C) = \xi_{21} \dot{I}_1 + \xi_{12} \dot{I}_2; \\ \dot{U}_1 = \frac{1}{3}(\dot{U}_A + a \dot{U}_B + a^2 \dot{U}_C) = \xi_{01} \dot{I}_1 + \xi_{22} \dot{I}_2; \\ 0 = \frac{1}{3}(\dot{U}_A + a^2 \dot{U}_B + a \dot{U}_C) = \xi_{11} \dot{I}_1 + \xi_{02} \dot{I}_2. \end{cases} \quad (3)$$

где ξ - эквивалентные сопротивления, первые цифры индексов у них обозначают порядок сложения полных сопротивлений Z , вторые - их последовательности:

$$\begin{cases} \xi_{21} = \frac{1}{3}(\underline{Z}_{1A} + a^2 \underline{Z}_{1B} + a \underline{Z}_{1C}); \\ \xi_{01} = \frac{1}{3}(\underline{Z}_{1A} + \underline{Z}_{1B} + \underline{Z}_{1C}); \\ \xi_{11} = \frac{1}{3}(\underline{Z}_{1A} + a \underline{Z}_{1B} + a^2 \underline{Z}_{1C}); \end{cases}$$

$$\xi_{02} = \frac{1}{3}(\underline{Z}_{2A} + \underline{Z}_{2B} + \underline{Z}_{2C});$$

$$\xi_{12} = \frac{1}{3}(\underline{Z}_{2A} + a \underline{Z}_{2B} + a^2 \underline{Z}_{2C}); \quad (4)$$

$$\xi_{22} = \frac{1}{3}(\underline{Z}_{2A} + a^2 \underline{Z}_{2B} + a \underline{Z}_{2C}).$$

После проведения частичного ремонта параметры схемы замещения неповрежденных фаз В и С (Z_{1B} , Z_{2B} , Z_{1C} , Z_{2C}) остаются практически неизменными и их можно определить по результатам опытов холостого хода и короткого замыкания [4]. В то же время сопротивления дефектной фазы А нулевой Z_{0A} , прямой Z_{1A} и обратной Z_{2A} последовательностей изменяются. Это связано с изменением величин сопротивлений рассеяния X_1 , индуктивного сопротивления взаимоиндукции приведенной вторичной и первичной цепей X_M и активного сопротивления фазной обмотки R_1 . Их значения можно рассчитать с учетом метода [5], в соответствии с которым любой вид несимметрии (пространственная, электрическая, магнитная) или их комбинация интерпретируется в качестве параметрического фактора и учитывается непосредственно в уравнениях напряжений вводом соответствующих коэффициентов. В случае частичного ремонта АД с включением добавочного сопротивления несимметрия обуславливается двумя факторами: изменением количества витков в статорной обмотке поврежденной фазы и уменьшением подаваемого на поврежденную фазу напряжения из-за наличия добавочного сопротивления.

Сопротивления X_1 и X_M зависят от квадрата количества витков намагничивающей обмотки [4]:

$$X_M = \omega L_M = \frac{4\mu_0 \omega}{p\pi^2} (W_A K_{OB})^2 \frac{\tau l_\delta}{\delta K_\delta}; \\ X_1 = \omega L_1 = \frac{2\mu_0 \omega W_A^2 l_\delta \lambda_\delta}{p q_1}, \quad (5)$$

где $\omega = 2\pi f$ - угловая частота тока; L_1 и L_M - соответственно индуктивности рассеяния и намагничивания обмотки; W_A - количество витков обмотки фазы А; μ_0 - магнитная постоянная; K_{OB} - обмоточный коэффициент; l_δ - расчетная длина магнитопровода; λ_δ - коэффициент проводимости для потокоосцебления рассеяния; τ - полюсное деление; p - количество пар полюсов; q_1 - число пазов на полюс и фазу.

Из выражений (5) индуктивные сопротивления дефектной обмотки после ремонта X_M^* и X_1^* будут равны:

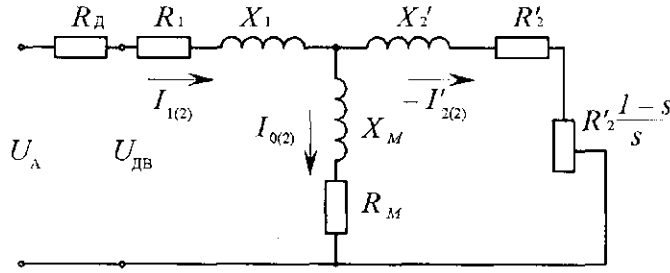


Рис. 2. Схема замещения фазы А трехфазного асинхронного двигателя

$$X_M^* = \frac{4\mu_0\omega}{\pi^2} (W_A^* K_{OB}^*)^2 \frac{\tau l_\delta}{\delta K_\delta} \cdot \left(\frac{W_A K_{OB}}{W_A K_{OB}} \right)^2$$

$$= X_M \left(\frac{W_A^* K_{OB}^*}{W_A K_{OB}} \right)^2 = X_M N^2 \left(\frac{K_{OB}^*}{K_{OB}} \right)^2 = X_A \quad (6)$$

$$X_1^* = \frac{2\mu_0\omega W_A^{*2} l_\delta \lambda_\delta}{\rho q_1} \cdot \frac{W_A^2}{W_A^2} = X_1 \left(\frac{W_A^*}{W_A} \right)^2 = X_1 N^2 \quad (7)$$

где N - соотношение витков в обмотке с удаленной секцией. Изменением обмоточного коэффициента пренебрегаем [4].

Активное сопротивление обмотки:

$$R_1 = \rho W_A \ell_{1B} / S, \quad (8)$$

где ℓ_{1B} - длина одного витка обмотки; ρ - удельное сопротивление обмоточного провода; S - площадь поперечного сечения обмоточного провода.

Тогда после удаления витков:

$$R_1^* = \rho \frac{W_A^* \ell_{1B}}{S} \cdot \frac{W_A}{W_A} = N R_1. \quad (9)$$

Уменьшение подаваемого на поврежденную фазу напряжения из-за наличия добавочного сопротивления также изменит параметры схемы замещения фазы А. Их перерасчет можно выполнить на основании эквивалентности схем, приведенных на рис.2 и 3.

Из схемы рис.2 следует:

$$\dot{U}_A = \dot{I} R_D + \dot{U}_{ДВ} = \dot{I} R_D + \dot{I} Z_{ДВ} = \dot{I} (R_D + Z_{ДВ}),$$

где $Z_{ДВ}$ - эквивалентное сопротивление фазы А двигателя после удаления витков и номинальном скольжении с учетом выражений (6), (7), (9).

Для схемы рис.3 справедливы соотношения:

$$\dot{U}_A = \dot{I}_1 Z_{ДВ}^Э и Z_{ДВ}^Э = c Z_{ДВ}, \quad (10)$$

где $Z_{ДВ}^Э$ - сопротивление фазы А двигателя для эквивалентной схемы;

c - поправочный коэффициент.

На основании эквивалентности схем можно записать равенство:

$$R_D + Z_{ДВ} = c Z_{ДВ},$$

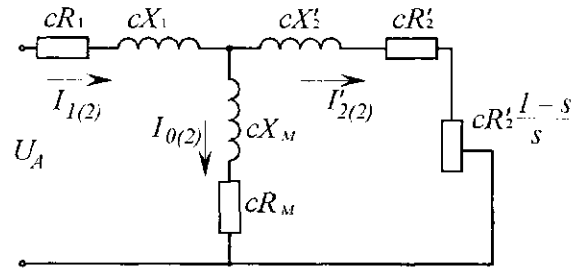


Рис. 3. Эквивалентная схема замещения фазы А трехфазного асинхронного двигателя

где

$$c = 1 + \frac{R_D}{Z_{ДВ}} = 1 + \frac{R_D}{\sqrt{(R_{ДВ})^2 + (X_{ДВ})^2}} \quad (11)$$

Решением системы уравнений (3) являются выражения:

$$\dot{I}_1 = \frac{\dot{U}_1}{\xi_{01} - \frac{\xi_{22} \xi_{11}}{\xi_{02}}}; \quad (12)$$

$$\dot{I}_2 = -\frac{\xi_{11}}{\xi_{02}} \dot{I}_1. \quad (13)$$

Подставив (12) и (13) в системы уравнений (1), (2), (3), можно определить все токи и напряжения двигателя. Зная фазные токи в комплексном виде, можно рассчитать коэффициенты мощности машины $\cos \varphi$ для каждой фазы отдельно:

$$\cos \varphi_{A(B,C)} = \text{Re}(\dot{I}_{A(B,C)}) / I_{A(B,C)} \quad (14)$$

где

$\dot{I}_{A(B,C)}$ - комплексное значение соответствующего фазного тока;

$I_{A(B,C)}$ - его действующее значение.

Полезная мощность двигателя определяется из выражения:

$$P_2 = (I_{2A}^2 + I_{2B}^2 + I_{2C}^2) R_2' \frac{1-s}{s}, \quad (15)$$

где $I_{2A(B,C)}$ - соответственно токи ротора от фаз А, В и С. Они определяются по законам электротехники из Т-образной схемы замещения.

Подводимая мощность равна:

$$P_1 = P_2 + \sum P, \quad (16)$$

где суммарные потери двигателя $\sum P$ складываются из потерь в обмотке статора P_{M1} и обмотке ротора P_{M2} , добавочных потерь P_D , потерь в стали P_C и механических потерь $P_{Мех}$. Для двигателя с выкусанными секциями и включением добавочного сопротивления появляются потери на добавочном сопротивлении P_R и потери от обратносинхронного поля P_{OBF} .

Потери в обмотке статора:

$$P_{M1} = (NI_A^2 + I_B^2 + I_C^2)R_1 \quad (17)$$

Потери в обмотке ротора:

$$P_{M2} = (I_{2A}^2 + I_{2B}^2 + I_{2C}^2)R_2 \quad (18)$$

Добавочные потери:

$$P_d = 0,005P_1 \approx 0,005P_2 \quad (19)$$

Потери в стали для отремонтированного двигателя от магнитных полей прямой и обратной последовательностей:

$$P_C = (I_{0A}^2 + I_{0B}^2 + I_{0C}^2)R_M \quad (20)$$

где $I_{0A(B,C)}$ - соответственно токи намагничивания фаз А, В и С.

Потери на добавочном сопротивлении

$$P_R = I_A^2 R_d \quad (21)$$

Потери в роторе от обратносинхронного поля P_{OBR} :

$$P_{OBR} = (I_{2A}^2 + I_{2B}^2 + I_{2C}^2)R_2' \frac{1-s}{2-s} \quad (22)$$

$$\text{КПД двигателя: } \eta = P_2 / P_1 \quad (23)$$

Вместе с изложенным выше, введение добавочного сопротивления и наличие тормозящего обратного магнитного поля из-за несимметрии обмотки статора приводят к уменьшению вращающего момента на валу. Поэтому его выбор должен быть сделан, исходя из двух условий:

- снижение напряжения на двигателе не должно привести к неустойчивости работы машины, т.к. введение слишком большого, или иначе, критического добавочного сопротивления R_d^{KP} вызовет остановку машины;

- для уменьшения величины магнитного поля обратной последовательности несимметрия токов двигателя должна быть сведена к минимуму.

Определение критического добавочного сопротивления

Электромагнитный момент M пропорционален электромагнитной мощности [4]:

$$M = \frac{P_{ЭМ}}{\omega_1} = \frac{P_{M2}}{\omega_1 s} = \frac{(I_{2A}^2 + I_{2B}^2 + I_{2C}^2)R_2' P}{2\pi f_1 s} \quad (24)$$

Активное R_2' и индуктивное X_2' сопротивления ротора вследствие частичного ремонта не изменяются. Для поврежденной фазы их допустимо принять равными соответствующим сопротивлениям двигателя до отказа. Однако при скольжениях, близких к единице, эти сопротивления изменяются вследствие вытеснения тока в стержнях и насыщения коронок зубцов ротора. Значения этих сопротивлений при пуске двигателя ($s=1$) $R_{2П}$ и $X_{2П}$ приведены в справочной литературе [6]. При любом скольжении ротора они находятся по формулам [7]:

активное сопротивление

$$R_2'(s) = \begin{cases} R_{2П}, & 0 \leq s \leq s_H, \\ R_a + R_b f_1(s), & s_H < s \leq 1, \end{cases} \quad (25)$$

индуктивное сопротивление

$$X_2'(s) = \begin{cases} X_{2П}, & 0 \leq s \leq s_H, \\ X_a + X_b f_2(s), & s_H < s \leq 1, \end{cases} \quad (26)$$

где $R_{2П}$ и $X_{2П}$ - соответственно активное и индуктивное сопротивления ротора неповрежденного двигателя при номинальном скольжении;

$$R_a = \frac{R_{2П} - R_{2П} f_1(s_H)}{1 - f_1(s_H)}; R_b = \frac{R_{2П} - R_{2П}}{1 - f_1(s_H)}$$

$$X_a = \frac{X_{2П} - X_{2П} f_2(s_H)}{1 - f_2(s_H)}; X_b = \frac{X_{2П} - X_{2П}}{1 - f_2(s_H)}$$

Здесь $f_1(s)$ и $f_2(s)$ - функции, соответственно равные:

$$f_1(s) = \frac{0,0185s - 0,375s^2 + s^2 \sqrt{s}}{0,035 + 0,612s^2 \sqrt{s}}$$

$$f_2(s) = \frac{0,0358 - 0,556s^2 + s^2 \sqrt{s}}{0,0187 - 0,0151s^2 + 0,446s^2 \sqrt{s}}$$

Расчет критического добавочного сопротивления для конкретного двигателя проводится численным методом. Для этого, сначала задавая $R_d=0$, рассчитываются по описанному выше методу симметричных составляющих фазные токи двигателя при пуске (в уравнения подставляются пусковые значения $R_{2П}$ и $X_{2П}$). Затем по формуле (24) находится момент на валу машины и, если рассчитанный момент больше, чем момент трогания рабочего механизма, то добавочное сопротивление R_d увеличивается на величину, соответствующую заданной точности расчета, и снова определяется момент двигателя. Итерации повторяют до такого значения R_d , при котором момент двигателя будет равен моменту трогания.

Определение величины добавочного сопротивления по несимметрии токов

В связи с тем, что сопротивления для токов прямой последовательности существенно больше сопротивлений для токов обратной последовательности, искажение симметрии токов I_{12}/I_{11} во много раз превосходит искажение симметрии напряжений U_{12}/U_{11} . Здесь I_{11} и U_{11} - соответственно ток статора и приложенное к двигателю напряжение прямой последовательности, I_{12} и U_{12} - обратной последовательности.

Поле обратной последовательности, вызванное токами этой последовательности, создает дополнительный тормозной момент. Это приводит к возрастанию токов статора и ротора и, следовательно, увеличивает электрические потери. Кроме того, вращающееся поле обратной последовательности будет пересекать ротор с удвоенной частотой. Это приведет к повышению потерь в стали ротора. Значит, вторым условием выбора

дополнительного сопротивления будет:

$$K_{2f} \rightarrow \min, \quad (27)$$

где

$$K_{2f} = I_{12}/I_{11}. \quad (28)$$

Расчет оптимального R_d , при котором выполняется

условие (27), также выполняется численным методом. В качестве алгоритма поиска экстремума применяется метод золотого сечения [8]. Этот метод использует следующее свойство непрерывных функций: если точки X_1 и X_2 ($X_1 < X_2$) расположены на участке

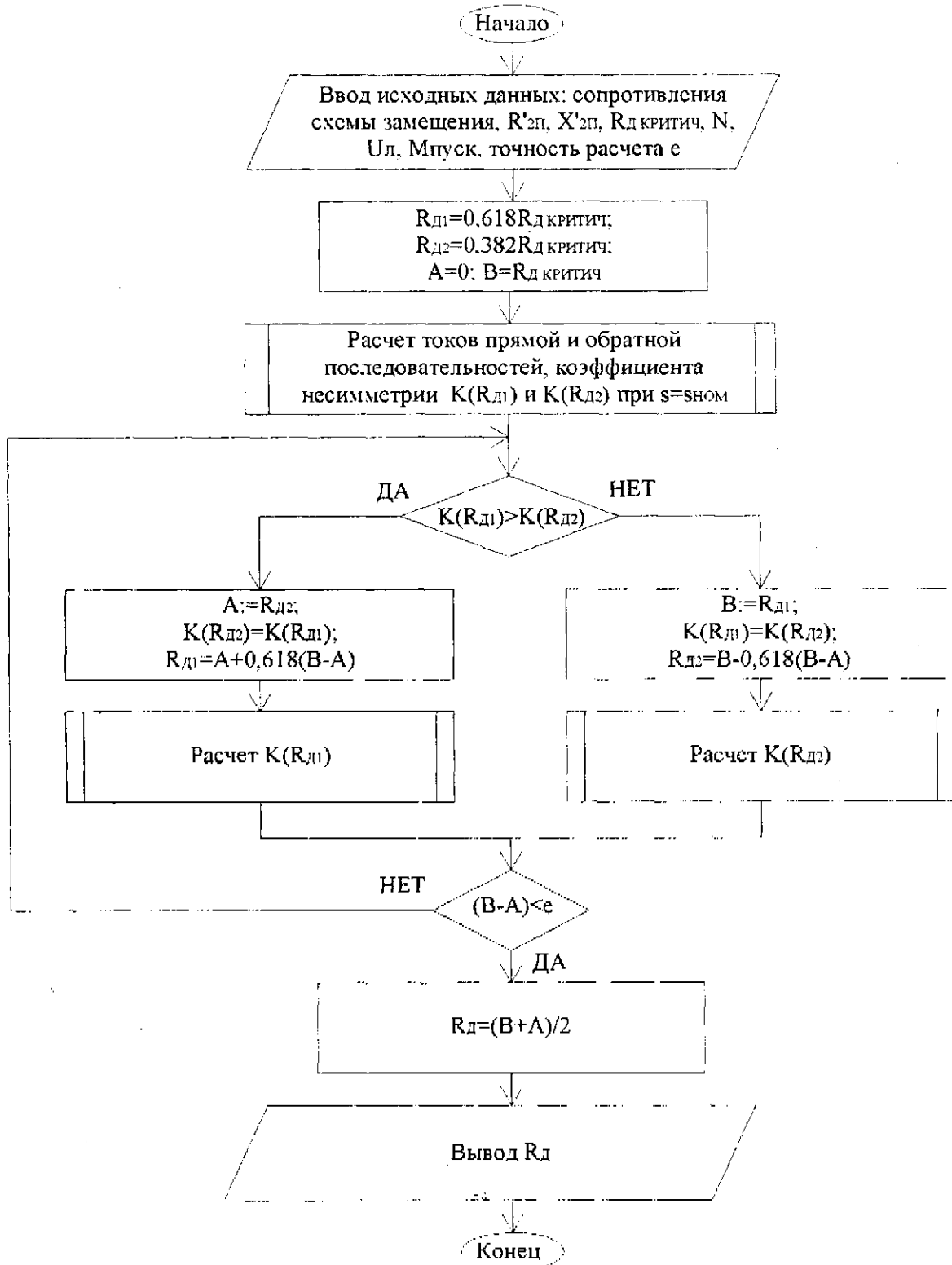


Рис.4. Блок-схема алгоритма определения R_d по минимальной несимметрии токов

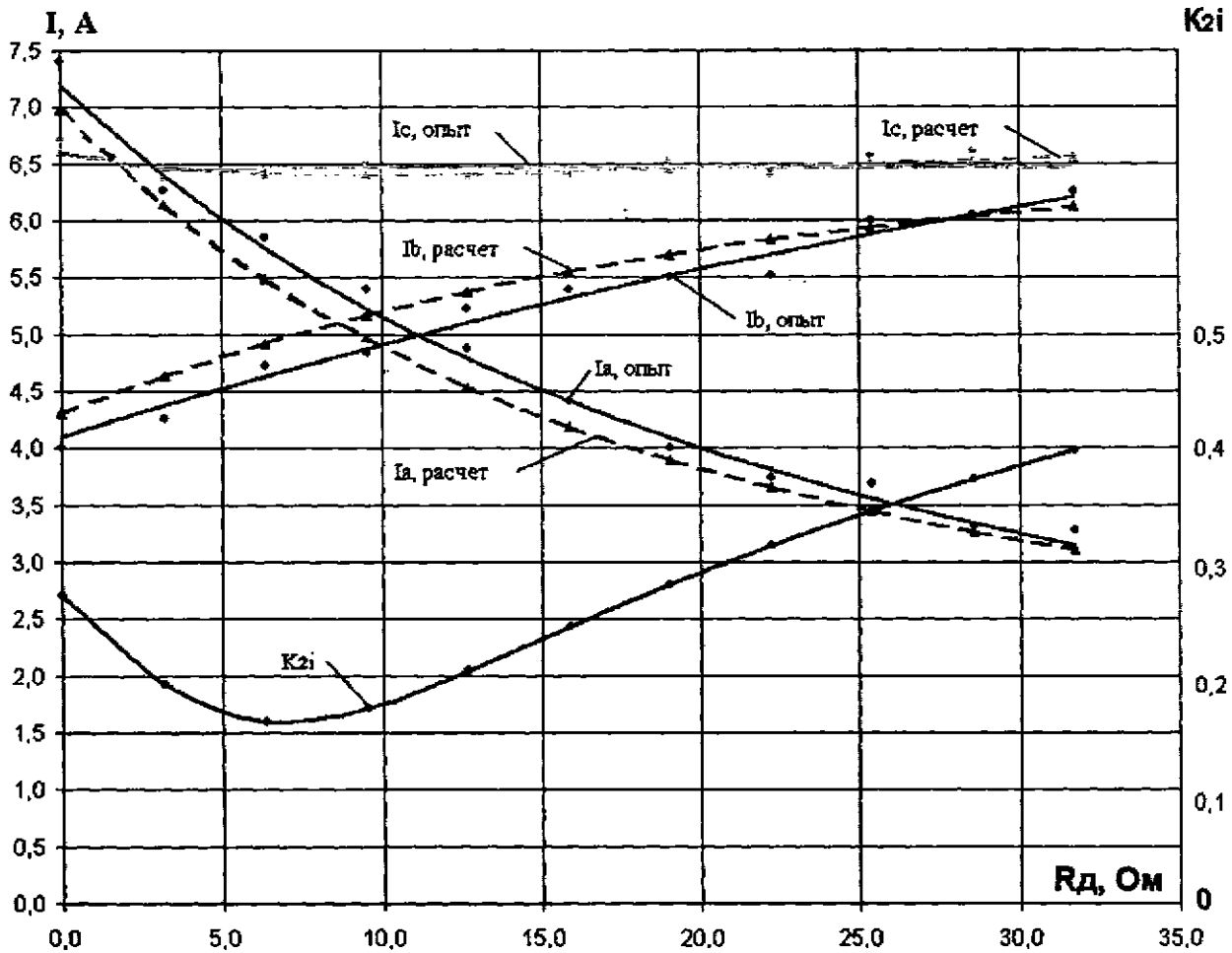


Рис. 5. Зависимости фазных токов двигателя и коэффициента несимметрии по току обратной последовательности от величины добавочного сопротивления R_d

(A,B) и $f(X_1) \leq f(X_2)$, то на отрезке $[A, X_2]$ есть хотя бы один минимум функции. Аналогично, если $f(X_1) \geq f(X_2)$, то на отрезке $[X_1, B]$ есть хотя бы один минимум. Точки X_1 и X_2 выбираются на отрезке симметрично по закону:

$$\begin{aligned} X_1 &= A + 0,618(B - A) \\ X_2 &= B - 0,618(B - A). \end{aligned} \quad (29)$$

Для определения оптимального R_d границами расчетного участка являются $A=0$ и $B=R_d^{KP}$. Функция, для которой определяется минимум, - $f(X) = K_{2i}(R_d)$.

Блок-схема алгоритма определения R_d приведена на рис.4.

Для проверки изложенной методики расчетов параметров асинхронных машин после проведения частичного ремонта предложенным способом в лаборатории электропитания сельского хозяйства УО БГАТУ были проведены экспериментальные исследования трехфазного асинхронного двигателя АИР90L4У3 со следующими характеристиками: $P_n=2,2$ кВт, $U_n=380$ В, $I_n=5$ А,

$\eta=0,81$, $\cos \varphi=0,83$, $n_n=1420$ мин⁻¹.

При номинальной нагрузке двигателя на валу варьировалась величина добавочного сопротивления. Экспериментальные • и расчетные ▲ показатели фазных токов и коэффициента несимметрии показаны на рис. 5. Расхождение между ними не превышает в среднем 2,7%.

Оптимальное значение рассчитанной по условию (27) величины R_d составило 6,63 Ом, а по результатам эксперимента - 6,3 Ом. Относительная ошибка составила 4,8%, что вполне достаточно для практических расчетов.

Для сравнения работы асинхронного двигателя при удаленной секции с добавочным сопротивлением и без него были проведены дополнительные исследования. Результаты показали, что даже на холостом ходу ток в поврежденной фазе достиг 5,5 А, т.е. превысил номинальное значение. При добавлении нагрузки на валу машины он резко растет. Вместе с ним увеличиваются, хотя и не так сильно, токи в фазах В и С. Следовательно, работать под нагрузкой такой двигатель не может.

Включение добавочного сопротивления в электрическую цепь секции с удаленными витками снижает ток этой фазы и симметрирует по величине систему

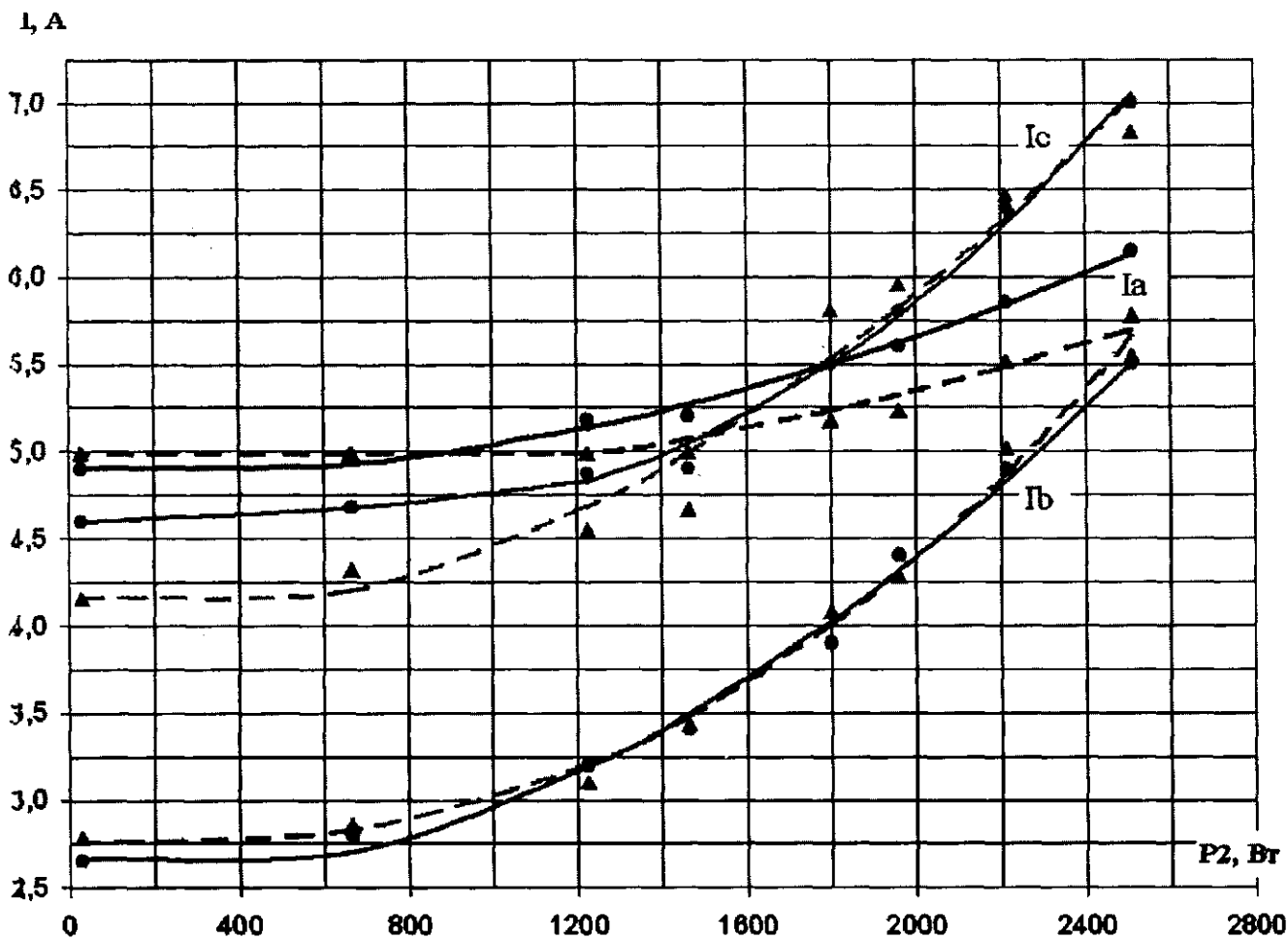


Рис. 6. Зависимости токов статора от нагрузки на валу при $R_d = 6,3 \text{ Ом}$:
 ••• — экспериментальные значения; ---▲--- — расчетные величины

1. Потери отремонтированного двигателя с $R_d = 6,3 \text{ Ом}$

	$P_{M1} + P_R$	P_{M2}	$P_{\text{мех}}$	$P_{\text{ст}} + P_{\text{обр}}$	$P_{\text{доб}}$	Σ потерь	P_1	КПД
	Вт							
расчет	552,3	143,7	65,7	112,1	15,6	889,3	3089,3	71,2
эксперимент	554,8	146,0	65,7	136,9	16,0	919,4	3199,2	68,8
ошибка, %	0,5	1,6	0,1	18,1	2,3	3,3	3,4	3,6

2. Потери неповрежденного двигателя

	P_{M1}	P_{M2}	$P_{\text{мех}}$	$P_{\text{ст}}$	$P_{\text{доб}}$	P_1	КПД
	Вт						
номинальная нагрузка	325	150	65,7	39,66	14,5	2755	80

3. В относительных единицах от показателей неповрежденного двигателя:

	$P_{M1} + P_R$	P_{M2}	$P_{\text{мех}}$	$P_{\text{ст}} + P_{\text{обр}}$	$P_{\text{доб}}$	P_1
	о.е.					
Расчет	1,7	0,97	1	3,45	1,1	1,16

фазных токов. Зависимости этих токов при $R_d = 6,3 \text{ Ом}$ от нагрузки на валу приведены на рис.6.

Раздельно при том же R_d и номинальной нагрузке на валу $P_2 = 2,2 \text{ кВт}$ были определены потери: в стали P_c ; механические $P_{\text{мех}}$; основные в обмотке статора $P_{\text{м1}}$ и обмотке ротора $P_{\text{м2}}$; добавочные P_d , от обратнo-синхронного поля $P_{\text{обр}}$ и на добавочном сопротивлении P_r . Результаты расчетов и экспериментов сведены в табл. 1, 2 и 3.

Как видно из приведенных данных, потери в меди статора увеличились в 1,7 раза за счет возрастания токов статора и наличия добавочного сопротивления. В то же время в меди ротора они снизились, но незначительно, из-за уменьшения тока ротора. Т.к. скорость вращения двигателя осталась практически той же, то механические потери не изменились. Потери в стали по сравнению с номинальными параметрами при выкусывании витков увеличились примерно в 11 раз, при включении R_d - в 3,45 раза. При этом следует отметить, что насыщение машины практически осталось в пределах нормы (для неповрежденного двигателя коэффициент насыщения равен 0,31 и после частичного ремонта с R_d - 0,38). Отсюда, в целом КПД снизился относительно незначительно - с 80 до 69%.

На нагрев двигатель испытывался при номинальной нагрузке на валу и с $R_d = 6,3 \text{ Ом}$. Для измерения температуры использовались встраиваемые температурные детекторы (терморезисторы). Были проведены замеры следующих величин: перегревы корпуса машины и стали; перегревы обмотки статора в пазу и в лобовой части. Установившаяся температура нагрева машины в наиболее горячей точке составила около 80°C. Естественно, в таких условиях двигатель может работать длительное время. Однако экономическая целесообразность периода его работы должна быть подтверждена расчетом.

Все изложенное выше позволяет сделать следующие **выводы**:

1. Для трехфазного асинхронного двигателя разработан новый метод частичного ремонта статорной обмотки путем удаления поврежденной секции и включения добавочного сопротивления в поврежденную фазу.

2. Предложенная математическая модель и составленные на ее основе алгоритм и программный комплекс позволили рассчитать все параметры трехфазного асинхронного двигателя после такого ремонта.

3. Анализ работы трехфазного асинхронного двигателя, выполненный по приведенной методике, показал:

а) удаление дефектной секции из поврежденной об-

мотки резко искажает систему фазных напряжений;

б) ток фазы обмотки с выкушенными витками двигателя серии АИР без R_d на холостом ходу превышает номинальное значение. Дополнительная нагрузка такой машины приведет к ее отказу за крайне короткий промежуток времени;

в) введение дополнительного сопротивления в поврежденную обмотку значительно снижает ток в поврежденной фазе и симметрирует по величине систему фазных токов.

4. Расчеты и испытания двигателя серии АИР подтвердили адекватность математической модели и позволили выявить преимущества предложенного способа ремонта по сравнению с простым выкусыванием секции.

5. КПД отремонтированного двигателя снизился с 80 только до 69%. Это обеспечивает возможность длительной работы машины с учетом экономической целесообразности ее использования. Предложенный способ частичного ремонта можно рекомендовать для применения в хозяйствах с отсутствием запасных двигателей в тех случаях, когда простой техники приведет к значительному экономическому ущербу.

ЛИТЕРАТУРА

1. Сердешнов А. П. Частичный ремонт обмоток асинхронных двигателей. - Агропанорама. - 1997. - №4 - С. 26-29.

2. Пат. РБ № 6813, Н 02К 15/00, 15/04. Способ частичного ремонта обмоток трехфазного асинхронного двигателя / Сердешнов А.П., Подгайская Т.Г. и др. - № 0002659, Заявл. 13.12.2000; Оpubл. 30.03.2005 // Афіцыйны бюлетэнь / Дзярж. пат. ведамства Рэсп. Беларусь. - 2005. - № 1. - С. 189.

3. Вагнер К., Эванс Р. Метод симметричных составляющих. ОНТИ, 1936. - 407с.

4. Иванов-Смоленский А.В. Электрические машины. - М.: Высш. шк., 1980. - 927 с.

5. А.В. Каган. Параметрический метод учета несимметрии статоров асинхронных машин. - Изв. вузов Электромеханика. - 1989. - №3. - С. 53-55.

6. Асинхронные двигатели серии 4А: справочник / ред.-сост. А. Э. Кравчик, М. М. Шлаф, В. И. Афонин, Е. А. Соболенская. - М.: Энергоиздат, 1982. - 504 с.

7. Определение параметров схемы замещения по каталожным данным / Ю. А. Мощинский, В. Я. Беспалов, А. А. Кирякин. // Электричество. -1998. - № 4. - С. 38-42.

8. Турчак Л.И. Основы численных методов: учебн. пособие. - М.: Наука, 1987. - 320 с.

Редакция журнала "Агропанорама"

приглашает к сотрудничеству представителей академической, вузовской, отраслевой науки и производства.

Надеемся, что ваши докторанты, аспиранты, соискатели и магистранты станут подписчиками нашего издания и авторами статей. Рассмотрим предложения по выпуску специальных номеров журнала «Агропанорама».

Телефоны редакции: 267-22-14; 267-30-12.