

УПРАВЛЕНИЕ РЕСУРСОМ РАБОТЫ АСИНХРОННОГО ДВИГАТЕЛЯ В УСЛОВИЯХ НЕСИММЕТРИИ ПИТАЮЩЕЙ СЕТИ

Василенко С. В., Кривонос В. Е.

Указаны основные причины повреждения изоляции обмоток асинхронных двигателей. Показаны методы исследования тепловых процессов в двигателях. Указаны места, требующие проведения дополнительных исследований. Предложен новый метод контроля срока службы изоляции по скоростным характеристикам нагрева обмоток. Получено выражение, связывающее коэффициент отклонения от коэффициента несимметрии напряжений. Приведен расчет температуры перегрева обмоток при наличии отклонения и несимметрии напряжения питающей сети. Выполнен теоретический расчет и экспериментальное исследование. Приведены соответствующие таблицы и графики. Разработано устройство, позволяющее управлять сроком службы изоляции обмоток асинхронных двигателей по скорости нагрева обмоток.

Вказані основні причини пошкодження ізоляції обмоток асинхронних двигунів. Показані методи дослідження теплових процесів в двигунах. Вказані місця, що потребують проведення додаткових досліджень. Запропоновано новий метод контролю терміну служби ізоляції за швидкісними характеристиками нагріву обмоток. Отримано вираз, що зв'язує коефіцієнт відхилення від коефіцієнта несиметрії напруг. Наведено розрахунок температури перегріву обмоток при наявності відхилення і несиметрії напруги живильної мережі. Виконано теоретичний розрахунок і експериментальне дослідження. Наведено відповідні таблиці і графіки. Розроблено пристрій, що дозволяє керувати терміном служби ізоляції обмоток асинхронних двигунів по швидкості нагріву обмоток.

Are the main causes of damage to the windings of asynchronous motors. Showing methods of thermal processes in engines. Are places that require additional research. A new method to control the life of isolation on high-speed characteristics of heating coils. An expression relating the coefficient of variation of the coefficient of voltage unbalance. The calculation of the superheat temperature of the windings in the presence of variations and unbalance supply voltage. Theoretical calculation and experimental study. The corresponding tables and graphs. A device that allows you to manage life windings of asynchronous motors on the rate of heating coils.

Василенко С. В.

аспирант ПГТУ
jackkarter@rambler.ru

Кривонос В. Е.

канд. техн. наук, доц. ПГТУ

УДК 621.313.333.2

Василенко С. В., Кривоносов В. Е.

УПРАВЛЕНИЕ РЕСУРСОМ РАБОТЫ АСИНХРОННОГО ДВИГАТЕЛЯ В УСЛОВИЯХ НЕСИММЕТРИИ ПИТАЮЩЕЙ СЕТИ

Более 70 % нагрузки в металлургии составляют асинхронные двигатели (АД). Порой от надежности и длительности работы АД зависит снижение аварийности технологических линий и себестоимость выпускаемой продукции. До 70 % случаев ускоренного выхода из строя АД происходит из-за теплового старения изоляции обмотки статора, вследствие ее перегрева. Тепловое старение вызвано тяжелыми пусками, механическими повреждениями частей электродвигателя и приводного им механизма, а также несимметрией питающего напряжения сети, обрывом фаз двигателя, наличием дисбаланса активных сопротивлений обмоток статора [1].

Причиной локальных перегревов изоляции обмоток могут быть витковые замыкания, на долю которых, согласно [2], приходится 85 % повреждений обмоток, тогда как повреждения междуфазной изоляции составляют 5 %, а пазовой 2 %. Остальные отказы вызваны механическими повреждениями.

Несимметричные режимы сети, как и наличие дисбаланса сопротивлений, вызывает несимметрию токов в обмотках АД, как следствие перегрев наиболее загруженной фазы. Для определения теплового старения изоляции необходимо определить потери мощности в ней.

Установив зависимости напряжений и токов обратной последовательности от уровней искажения в питающей сети, возможно более корректно решить вопросы по определению допустимого значения коэффициента несимметрии напряжений сети от регламентируемого по допустимому нагреву изоляции обмоток. Полученные зависимости позволяют сформулировать общие условия и закономерности для создания устройств диагностирования и управления сроком службы изоляции АД, своевременно выявлять и предупреждать возникновение аварийных режимов работы и повышенного износа изоляции при изменении параметров питающей сети.

В настоящее время большинство методов, связанных с тепловыми процессами, протекающими в АД, базируются на методе эквивалентных тепловых схем [3, 4].

Кроме метода тепловых электрических схем разработано множество математических моделей старения изоляции АД, например [5] и [6], но большинство из них описывает лишь определенные стороны процесса старения изоляции.

В описанных выше методах не рассматриваются скоростные характеристики нагрева АД как функция управления сроком службы изоляции. Ведь на практике изменение параметров сети, в частности значений несимметрии и отклонений напряжения, а, соответственно, и характеристик АД, происходит постоянно. В один момент ток увеличится вдвое, в другой на 30 %, затем упадет ниже номинального и т. д. Скорость нарастания температуры обмоток с этих случаев также будет различной. Это требует применения различных мер по устранению повышенного нагрева обмоток АД. Определение скоростных характеристик нагрева позволяет на ранних стадиях выявлять нестационарные режимы работы, которые приводят к ускоренному износу изоляции обмоток. Т. е. управлять сроком службы изоляции.

Целью работы является продление срока службы изоляции АД и повышение надежности технологических линий за счет управления сроком службы изоляции по скоростным характеристикам нагрева обмоток.

Согласно ГОСТ 13109-97 коэффициент несимметрии напряжений k_{2U} и отклонения напряжений ΔU от номинального значения определяются выражениями:

$$k_{2U} = \frac{U_2}{U_1} \cdot 100\%, \quad (1)$$

$$\Delta U = \frac{U_1 - U_H}{U_H} \cdot 100\%, \quad (2)$$

где U_1, U_2 – напряжения прямой и обратной последовательностей;
 U_H – номинальное напряжение.

Аналитически определить напряжения прямой и обратной последовательностей и их аргументы можно по трем линейным напряжениям для сетей, работающих в режиме с изолированной нейтралью, а для сетей с заземленной нейтралью – дополнительно по трем фазным напряжениям. На рис. 1 представлена векторная диаграмма фазных и междуфазных напряжений сети при несимметрии нагрузки.

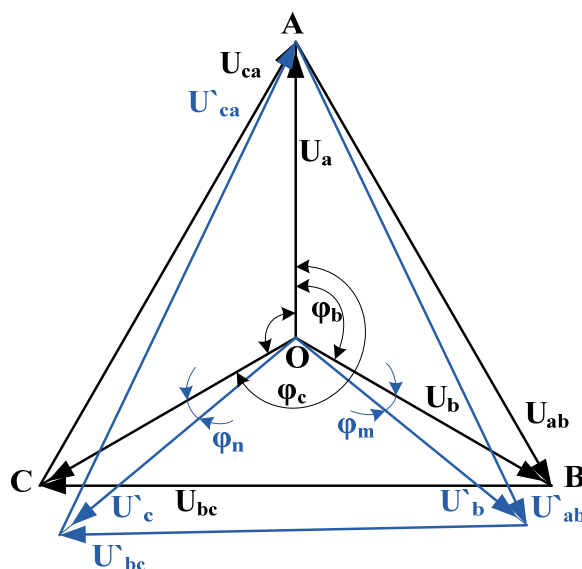


Рис. 1. Векторная диаграмма напряжений при несимметрии нагрузки

Выбираем систему координат, проходящую через центр треугольника, а фазовый угол напряжений наиболее загруженной фазы, например фазы А, равен нулю.

Запишем уравнения векторов фазных токов в комплексной форме:

$$\begin{aligned} \dot{U}_a &= |\dot{U}_a| \cdot e^{j\varphi_a}; \\ \dot{U}_b &= |\dot{U}_b| \cdot e^{j\varphi_b}; \\ \dot{U}_c &= |\dot{U}_c| \cdot e^{j\varphi_c}. \end{aligned} \quad (3)$$

Из треугольника AOB и COB (рис. 1) по теореме косинусов определим соответствующие фазовые углы:

$$\begin{aligned} \varphi_b &= \arccos \left(\frac{|\dot{U}_a|^2 + |\dot{U}_b|^2 - |\dot{U}_{ab}|^2}{2 \cdot |\dot{U}_a| \cdot |\dot{U}_b|} \right); \\ \varphi_c &= \varphi_b + \arccos \left(\frac{|\dot{U}_c|^2 + |\dot{U}_b|^2 - |\dot{U}_{bc}|^2}{2 \cdot |\dot{U}_c| \cdot |\dot{U}_b|} \right). \end{aligned} \quad (4)$$

Представим систему фазовых напряжений (3) через модуль номинального напряжения:

$$\begin{aligned}\dot{U}_a &= |U_H|; \\ \dot{U}_b &= |U_H| \cdot a^2; \\ \dot{U}_c &= |U_H| \cdot a,\end{aligned}\quad (5)$$

где $a = -0,5 + j0,866$ – фазовый множитель или оператор поворота.

Система фазовых напряжений (5) при наличии несимметрии отклонений напряжений:

$$\begin{aligned}\dot{U}_a &= D \cdot |U_H|; \\ \dot{U}_b &= M \cdot |U_H| \cdot a^2 \cdot e^{j\varphi_m}; \\ \dot{U}_c &= N \cdot |U_H| \cdot a \cdot e^{j\varphi_n},\end{aligned}\quad (6)$$

где D, M, N – коэффициенты, учитывающие кратность изменения фазных напряжений; φ_m, φ_n – дополнительные фазовые углы сдвига этих напряжений при условии, что угол фазы A равен нулю.

Дополнительные фазовые углы равны:

$$\begin{aligned}\varphi_m &= \frac{2\pi}{3} - \arccos \left(\frac{|\dot{U}_a|^2 + |\dot{U}_b|^2 - |\dot{U}_{ab}|^2}{2 \cdot |\dot{U}_a| \cdot |\dot{U}_b|} \right); \\ \varphi_n &= \arccos \left(\frac{|\dot{U}_c|^2 + |\dot{U}_a|^2 - |\dot{U}_{ca}|^2}{2 \cdot |\dot{U}_c| \cdot |\dot{U}_a|} \right) - \frac{2\pi}{3}.\end{aligned}\quad (7)$$

Напряжения прямой U_1 , обратной U_2 и нулевой U_0 последовательностей согласно методу симметричных составляющих равны:

$$\begin{aligned}\dot{U}_1 &= \frac{1}{3}(\dot{U}_a + a\dot{U}_b + a^2\dot{U}_c); \\ \dot{U}_2 &= \frac{1}{3}(\dot{U}_a + a^2\dot{U}_b + a\dot{U}_c); \\ \dot{U}_0 &= \frac{1}{3}(\dot{U}_a + \dot{U}_b + \dot{U}_c).\end{aligned}\quad (8)$$

Подставляя (6) и (7) в (8), после преобразования получим:

$$\begin{aligned}\dot{U}_1 &= \frac{1}{3}C U_H e^{j\varphi_1}; \\ \dot{U}_2 &= \frac{1}{3}B U_H e^{j\varphi_2}; \\ \dot{U}_0 &= \frac{1}{3}T U_H e^{j\varphi_0},\end{aligned}\quad (9)$$

где $C = \sqrt{D^2 + M^2 + N^2 + 2D(M \cos \varphi_m + N \cos \varphi_n) + 2MN \cos(\varphi_m - \varphi_n)}$;

$$B = \sqrt{D^2 + M^2 + N^2 + 2D \left[M \cos \left(\varphi_m + \frac{2\pi}{3} \right) + N \cos \left(\varphi_n + \frac{4\pi}{3} \right) \right] + 2MN \cos \left(\varphi_m - \varphi_n + \frac{4\pi}{3} \right)};$$

$$T = \sqrt{D^2 + M^2 + N^2 + 2D \left[M \cos \left(\varphi_m + \frac{4\pi}{3} \right) + N \cos \left(\varphi_n + \frac{2\pi}{3} \right) \right] + 2MN \cos \left(\varphi_m - \varphi_n + \frac{2\pi}{3} \right)}.$$

Выражения для аргументов напряжений $\varphi_1, \varphi_2, \varphi_o$ имеют вид:

$$\varphi_1 = \operatorname{arctg} \frac{M \sin \varphi_m + N \sin \varphi_n}{D + M \cos \varphi_m + N \cos \varphi_n}; \quad (10)$$

$$\varphi_2 = \operatorname{arctg} \frac{M \sin \left(\varphi_m + \frac{2\pi}{3} \right) + N \sin \left(\varphi_n + \frac{4\pi}{3} \right)}{D + M \cos \left(\varphi_m + \frac{2\pi}{3} \right) + N \cos \left(\varphi_n + \frac{4\pi}{3} \right)}; \quad (11)$$

$$\varphi_o = \operatorname{arctg} \frac{M \sin \left(\varphi_m + \frac{4\pi}{3} \right) + N \sin \left(\varphi_n + \frac{2\pi}{3} \right)}{D + M \cos \left(\varphi_m + \frac{4\pi}{3} \right) + N \cos \left(\varphi_n + \frac{2\pi}{3} \right)}. \quad (12)$$

Коэффициент несимметрии напряжений после подстановки (9) в (1) определится как:

$$k_{2U} = \frac{B}{C} \cdot 100\%. \quad (13)$$

Выражая модуль напряжения прямой последовательности в виде:

$$|U_1| = C \frac{U_n}{3}, \quad (14)$$

получим:

$$C = 3(1 + \Delta U). \quad (15)$$

Значение коэффициента несимметрии при наличии отклонений напряжений определится по выражению:

$$k_{2U} = \sqrt{1 - \frac{k_2}{9(1 + \Delta U)}}. \quad (16)$$

Соответственно отклонение напряжения:

$$\Delta U = \sqrt{\frac{k_2}{9(1 - k_{2U}^2)}} - 1, \quad (17)$$

где $k_2 = 3 \left[MD(\cos \varphi_m + \sqrt{3} \sin \varphi_m) + ND(\cos \varphi_n - \sqrt{3} \sin \varphi_n) + MN(\cos(\varphi_m - \varphi_n) - \sqrt{3} \sin(\varphi_m - \varphi_n)) \right]$.

Принимая с достаточной точностью для инженерных расчетов, что сопротивление обратной последовательности двигателя (при $2 - s$) равно сопротивлению при пуске (при $s = 1$), их фазовые углы равны согласно (5), токи прямой и обратной последовательностей определяются выражениями:

$$\begin{aligned} \dot{I}_1 &= (1 + \Delta U) U_n y_1 e^{j(\varphi_1 + \varphi_{y1})}, \\ \dot{I}_2 &= (1 + \Delta U) k_{2U} U_n y_2 e^{j(\varphi_2 + \varphi_{y2})}, \end{aligned} \quad (18)$$

где y_1, y_2 – проводимости прямой и обратной последовательности.

Линейные токи в цепи АД, обмотки которого соединены треугольником или звездой при изолированной нейтрали, равны:

$$\begin{aligned}\dot{I}_a &= \dot{I}_1 + \dot{I}_2; \\ \dot{I}_b &= a^2 \dot{I}_1 + a \dot{I}_2; \\ \dot{I}_c &= a \dot{I}_1 + a^2 \dot{I}_2.\end{aligned}\quad (19)$$

Подставляя в (19) выражения (18) и преобразовав их с учетом выше сделанных допущений, определяем линейные токи, по которым найдем распределения мощностей по фазам АД. Мощность наиболее загруженной фазы:

$$P_{\max} = P_n (1 + \Delta U)^2 \left[1 + k_{2U}^2 k_n^2 k_{\Delta U}^2 + 2k_{2U} k_{\Delta U} k_n \cos(\varphi_1 - \varphi_2) \right], \quad (20)$$

где P_n – мощность фазы АД при номинальной нагрузке;

k_n – кратность пускового тока;

$k_{\Delta U}$ – коэффициент, учитывающий изменение сопротивления обратной последовательности при отклонении напряжения от номинального.

Анализ полученных зависимостей позволяет заключить, что мощность в наиболее загруженной фазе будет максимальной, если разность между углами напряжения прямой и обратной последовательностей равны нулю.

Для устройств диагностики, где в качестве одного из информационных параметров используется напряжение (ток) обратной последовательности, необходимо установить связь этих параметров от коэффициента несимметрии и отклонения напряжений. Связь коэффициента несимметрии тока k_{2I} и коэффициента несимметрии напряжения k_{2U} определяется зависимостью:

$$k_{2I} = k_f \cdot k_{\Delta U} \cdot k_n \cdot k_{2U}, \quad (21)$$

где k_f – коэффициент отклонения частоты.

Зависимость (21) наиболее целесообразно использовать в устройствах диагностирования АД, работающих в режиме с изолированной нейтралью.

Параметром, определяющим работу двигателя при аномальном режиме, является температура обмотки. При строгом анализе процессов нагрева обмотки АД должны рассматриваться как сложное тело, т. к. тепловые параметры металла обмотки, изоляции и стали неодинаковы. Однако, согласно [7] с достаточной для практических целей точностью можно применять уравнение нагревания, выведенное для однородного тела, нагрев которого происходит за счет выделяемых в нем потерь. Для упрощения принимаем, что потери энергии в теле и коэффициент теплоотдачи от поверхности тела не зависят от его температуры, которая принимается одинаковой для всего тела и его поверхности.

Уравнение нагрева однородного тела имеет вид:

$$\Delta P dt = \alpha F \Delta \Theta dt + c G d\Theta, \quad (22)$$

где ΔP – потери мощности, выделяемые в теле;

α – коэффициент теплопередачи;

c – удельная теплоемкость;

$\Delta \Theta$ – превышение температуры над температурой окружающей среды.

После преобразования и упрощения уравнение (22), для аномального режима принимает вид:

$$\Delta\Theta = \Delta\Theta_{уст} \cdot \left(1 - e^{-\frac{T}{T_n}} \right), \quad (23)$$

где $\Delta\Theta_{уст}$ – превышение температуры обмоток соответствующего теплового режима;

T – время;

T_n – постоянная времени.

Так как выделяемое в единицу времени тепло в обмотке пропорционально мощности электрических потерь, то можно считать, что:

$$\Delta\Theta_{уст} = \Delta\Theta_n \cdot \left(\frac{\Delta P}{\Delta P_n} \right), \quad (24)$$

где $\Delta\Theta_n$ – превышение температуры обмоток, соответствующее номинальному режиму;

ΔP_n – потери мощности при номинальном режиме работы АД;

ΔP – потери мощности, соответствующие температуре $\Delta\Theta_{уст}$.

После преобразования уравнение (24), на основании ранее приведенных формул, для АД, работающих с изолированной нейтралью, примет вид:

$$\Delta\Theta_{уст} = \Delta\Theta_n \left[(1 + \Delta U)^2 (1 + k_{2I}^2 + 2k_{2I} \cos(\varphi_1 - \varphi_2)) \right] \cdot \left(1 - e^{-\frac{T}{T_n}} \right). \quad (25)$$

Уравнение (25) является базовым для расчета превышения температуры изоляции в заданный период времени.

По уравнению (25) построены теоретические кривые нагрева самой загруженной обмотки АД, типа 4AA71B6У3 мощностью 0,55 кВт, при различных значениях коэффициента несимметрии питающего напряжения. Графики представлены на рис. 2.

Для проверки теоретических тепловых зависимостей АД от коэффициента несимметрии, кроме теоретического моделирования, проведены экспериментальные испытания.

На первом этапе по номинальным параметрам строится кривая нагрева АД. В номинальном режиме, при $k_{2U} = 0$, симметричных токах в обмотках и температуре окружающего воздуха 20 °С, установившаяся температура АД $\Delta\Theta_n$ составила 87 °С. В дальнейшем она станет эталонном, на основании которого будет происходить управление сроком службы изоляции.

Далее при различных значениях коэффициента несимметрии напряжения сети снимались кривые нагрева наиболее загруженной обмотки. На рис. 2 приведены полученные кривые. Из графиков видно, что при $k_{2U} = 1$ % температура обмотки увеличилась на 1,5 °С, при $k_{2U} = 2$ %, 3 % и 4 % соответственно на 2,5 °С, 5,5 °С и 8,5 °С. Т. е. при $k_{2U} = 4$ % согласно восьмиградусным правилам начнется необратимое разрушение изоляции, которое даже при непродолжительном воздействии существенно снизит срок службы изоляции. Следовательно, на практике необходимо предупреждать увеличение температуры выше допустимой.

Температуры, рассчитанные по уравнению (25) и полученные экспериментально, приведены в табл. 1.

Таблица 1

Расчетная и экспериментальная температура нагрева самой загруженной обмотки АД

Θ , °С	k_{2U} , %	0	1	2	3	4
$\Theta_{расчетная}$		86,1	90,1	91,8	94,7	98,3
$\Theta_{экспериментальная}$		87	88,5	89,5	92,5	95,5

Из табл. 1 видно, что погрешность расчета не превышает 5 %, что достаточно для практических расчетов.

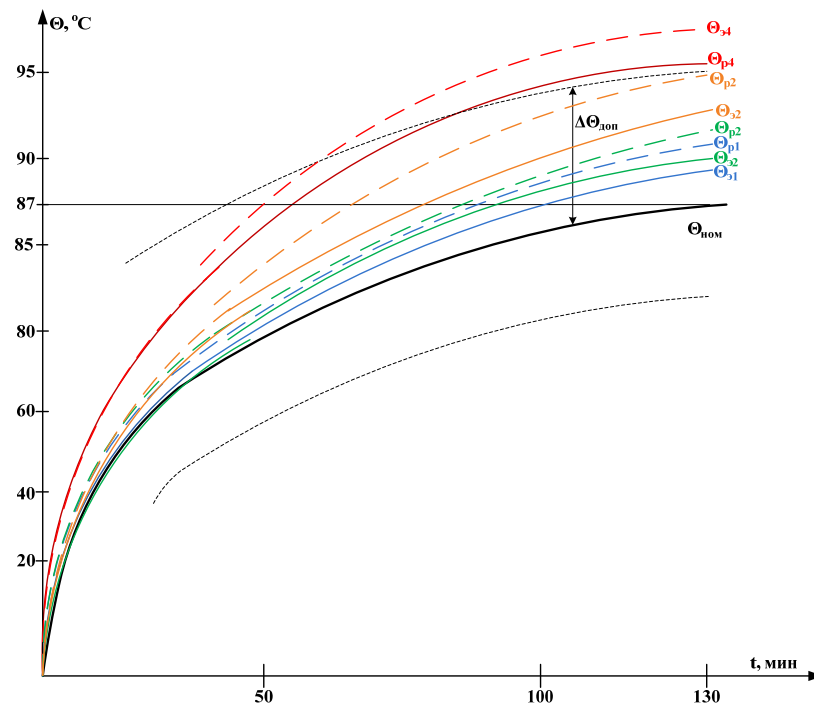


Рис. 2. Теоретические и экспериментальные график нагрева обмотки АД при различных значениях k_{2U} :

а – Θ_{p1} и $\Theta_{э1}$ – расчетная и экспериментальная кривая при $k_{2U} = 1\%$; б – Θ_{p2} и $\Theta_{э2}$ – соответственно при $k_{2U} = 2\%$; в – Θ_{p3} и $\Theta_{э3}$ – соответственно при $k_{2U} = 3\%$; г – Θ_{p4} и $\Theta_{э4}$ – соответственно при $k_{2U} = 4\%$

Принцип получения скоростных характеристик нагрева обмоток АД показан на рис. 3.

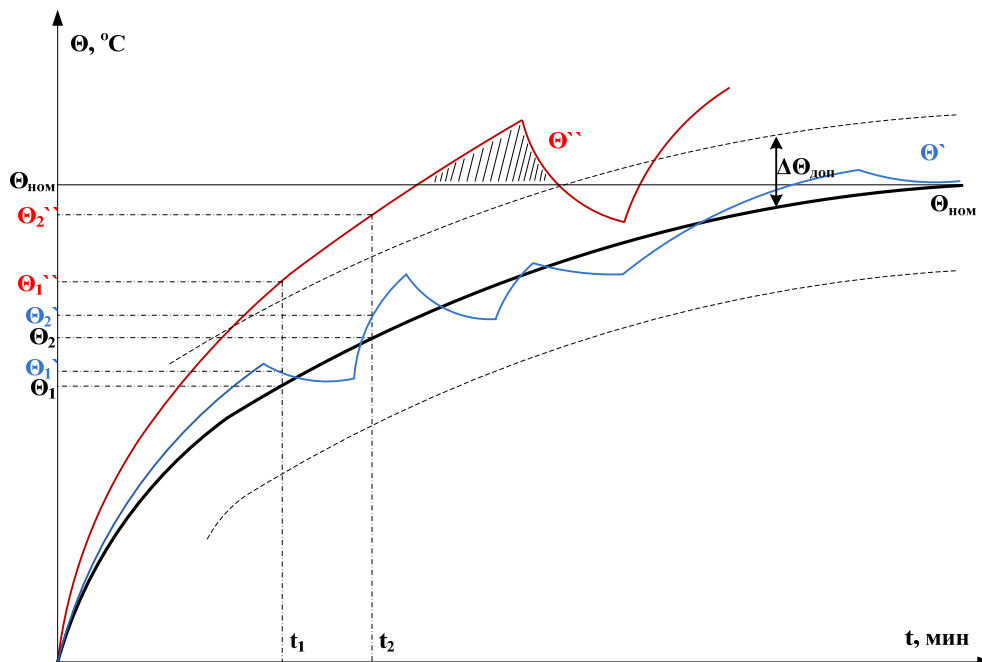


Рис. 3. Определение скоростных характеристик нагрева обмоток АД

По полученной номинальной кривой нагрева АД (кривая $\Theta_{ном}$ на рис. 3) задаются допустимыми пределами изменения температуры $\Delta\Theta_{доп}$. Предельно допустимое отклонение температуры $\Delta\Theta_{доп}$ и интервал дискретизации измерений определяются ответственностью АД в технологической линии.

В зависимости от величин изменения параметров сети и АД скорость нарастания температуры будет различной. Управление сроком службы изоляции происходит за счет поддержания температуры обмоток АД в заданных интервалах (кривая Θ' на рис. 3). Удержание температуры изоляции в заданном интервале позволит приблизить срок службы изоляции обмоток к номинальному.

На основании полученных зависимостей коэффициента несимметрии тока в АД и температуры обмоток при несимметрии и отклонениях напряжений в питающей сети разработано устройство, управляющее сроком службы изоляции АД с диагностированием его состояния и сети. Устройство защищает двигатель от неполнофазных режимов питающей сети и токовых цепей, витковых замыканий, коротких замыканий и перегрузок [8].

Устройство рис. 4 содержит: блок питания, блок токов, имеет датчик несимметрии токов фаз двигателя, блок напряжений, с датчиком несимметрии фаз питающей сети и блок температуры, термодатчик изоляции обмоток, микропроцессор, блоки согласования, блок сигнализации и управления. Измерения производятся с интервалом дискретизации 2 мин. В устройстве измеряются мгновенные значения тока АД, напряжения сети и температуры обмоток. Рассчитываются k_{2U} , k_{2I} и скорость роста температуры за измеренный интервал, строится кривая прогнозируемого роста температуры и сравнивается с эталонной кривой.

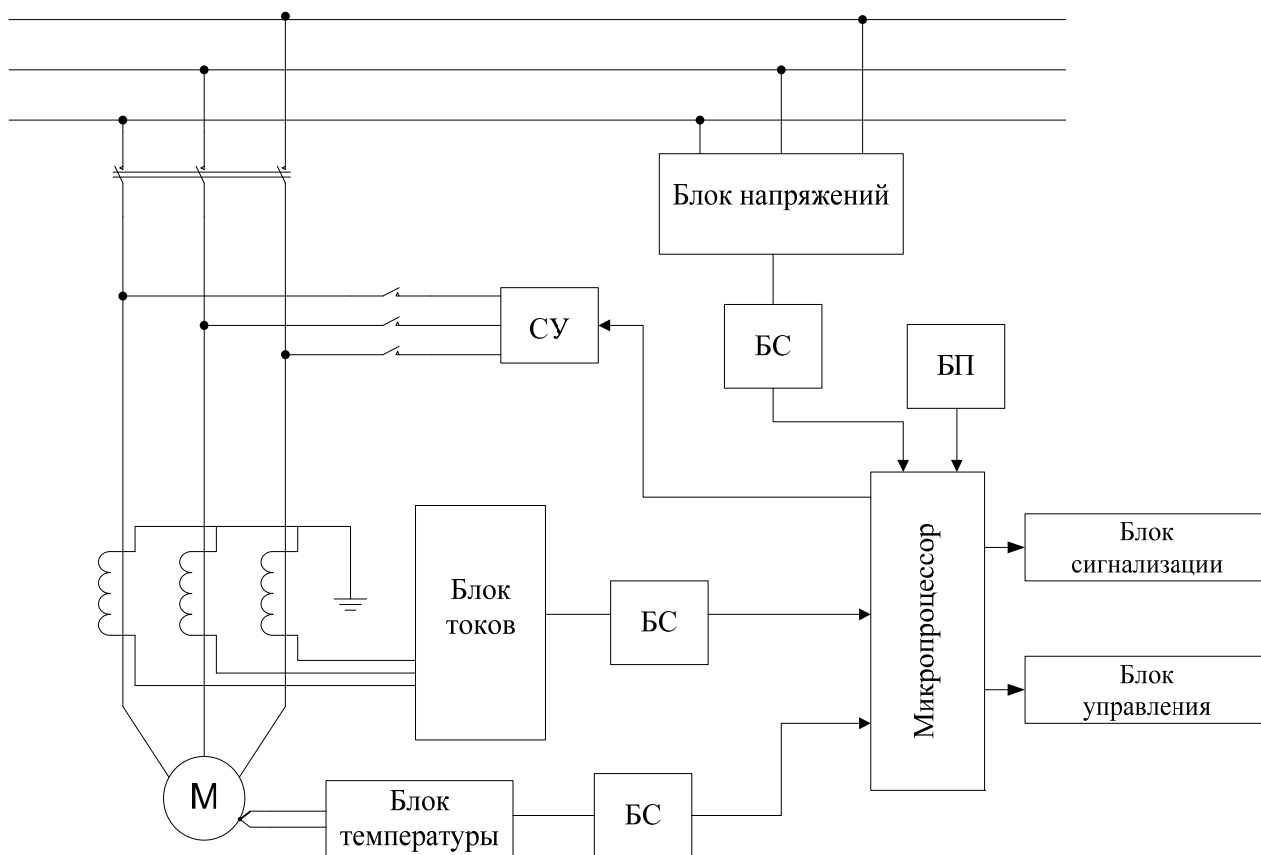


Рис. 4. Принципиальная схема устройства

БС – блок согласования; СУ – симметрирующее устройство; БП – блок питания

Работа устройства проиллюстрирована на рис. 3.

Возникновение несимметрии напряжения в сети вызовет несимметрию токов в АД, на входах блоков напряжения и токов появятся сигналы. Через блоки согласования происходит преобразование и усиление сигнала, который поступает в микропроцессор. Он обрабатывает сигналы и включает сигнализацию о том, что в сети появилась несимметрия, которая привела к росту температуры АД. Через блок управления происходит подключение симметрирующего устройства. Если снижение температуры не наблюдается, то АД аварийно отключается.

Если при неизменном k_{2U} изменяется k_{2I} – это свидетельствует о следующих неисправностях: а) обрыв фазы токовой цепи, на входе блока токов появляется максимальный сигнал, поступающий в микропроцессор, который на блок сигнализации выдает сообщение о неисправности, а через блок управления отключает АД от сети; б) витковое замыкание, вызывает увеличение k_{2I} и увеличение температуры, микропроцессор сигнализирует о неисправности, но не отключает АД, если рост температуры выходит за допустимые пределы, то происходит отключение двигателя.

При увеличении нагрузки, когда k_{2U} и k_{2I} неизменны, происходит симметричное увеличение токов во всех фазах АД, блок токов посылает соответствующий сигнал в микропроцессор, который начинает контролировать скорость нарастания температуры обмоток. Если температура не превышает допустимую, он выдает сообщение о росте нагрузки. Если температура постоянно растет и может выйти за пределы, через блок управления происходит отключение АД.

При коротком замыкании блок токов отправит сигнал микропроцессору о том, что ток многократно увеличился за короткий интервал времени. Микропроцессор мгновенно отключит АД от сети и выдаст сообщение об аварии.

ВЫВОДЫ

Полученные аналитические выражения, позволяют сформулировать принцип работы устройства по продлению срока службы изоляции обмоток асинхронного двигателя. Комплексное решение продления срока службы изоляции связано с диагностикой состояния обмоток асинхронного двигателя и сети.

СПИСОК ИСПОЛЬЗОВАННОЙ ЛИТЕРАТУРЫ

1. Кривонос В. Е. Управление сроком службы изоляции по скоростным характеристикам нагрева обмоток / В. Е. Кривонос, С. В. Василенко // *Электротехника і енергетика* : зб. наук. пр. – Донецьк : ДонНТУ, 2011. – Випуск № 11. – С. 205–210.
2. Яманов С. А. Старение, стойкость и надежность электрической изоляции / С. А. Яманов, Л. В. Яманова. – М. : Энергоатомиздат, 1990. – 176 с.
3. Счастливый Г. Г. Нагревание закрытых асинхронных электродвигателей / Г. Г. Счастливый. – К. : Наукова думка, 1966. – 196 с.
4. Оценка теплового состояния асинхронного двигателя по данным контроля токов статора при несимметрии питающего напряжения / О. Г. Пинчук, И. П. Кутковой // *Электротехника і енергетика* : зб. наук. пр. – Донецьк : ДонНТУ, 2009. – Випуск № 9. – С. 190–196.
5. Shenkman A. L. Experimental method for synthesis of generalized thermal circuit of polyphase induction motors / A. L. Shenkman, M. Chertkov // *IEEE Transactions on Energy Conversion*. – 2000. – № 3. – P. 264–268.
6. Оцінка залишкового ресурсу асинхронного електроприводу / О. О. Закладний // *Вісник НТУУ «КПІ»*. – Київ : КПІ, 2010. – Випуск № 19. – С. 140–148. – (Серія «Гірництво»).
7. Сыромятников И. А. Режимы работы асинхронных и синхронных двигателей / И. А. Сыромятников. – М. : Энергия, 1984. – 240 с.
8. А. с. 1584028 СССР, Н02Н7/08 7/085. Устройство для контроля и защиты электродвигателя от неполнофазных режимов и витковых замыканий / И. В. Жежеленко, В. Е. Кривонос, Б. Ф. Рыбалко (СССР). – № 4389543 ; заявл. 1988 ; опубл. 1990 ; Бюл. № 29.