

УДК 621.313

Сергей Николаевич Ткаченко

ФГБОУ ВО «Донецкий национальный технический университет», кандидат технических наук, заведующий кафедрой «Электрические станции», Россия, Донецк, e-mail: tsn1981@mail.ru

Анализ режимов работы асинхронных двигателей с короткозамкнутым ротором и совершенствование методов их исследования

Авторское резюме

Состояние вопроса. В настоящее время асинхронные двигатели с короткозамкнутым ротором являются основным типом электродвигателей переменного тока, применяющихся в промышленности в качестве электропривода различных механизмов и установок. Для выполнения оценки работоспособности систем релейной защиты, автоматики, мониторинга и диагностики асинхронных машин необходим качественный анализ их режимов работы. Для этой цели применяются различные подходы, основанные на проведении экспериментальных исследований, а также базирующиеся на методах математического моделирования на ПЭВМ. Однако большинство существующих методов имеют определенные недостатки, например: сложности осуществления в реальных практических условиях ряда режимов работы, таких как аварийные режимы короткого замыкания; наличие погрешностей в процессе математического моделирования и др. В связи с этим задача качественного анализа нормальных, аномальных и аварийных режимов работы низковольтных и высоковольтных асинхронных двигателей с короткозамкнутым ротором и модернизация методов их исследования является актуальной.

Материалы и методы. Для реализации поставленной цели использованы как методы экспериментального исследования, так и методы исследования на основе математического моделирования на ПЭВМ с применением математической модели, базирующейся на полных дифференциальных уравнениях, описывающих асинхронный двигатель. В качестве инструмента моделирования применено оригинальное программное обеспечение РТС® MathCAD™.

Результаты. Выполнена подробная классификация нормальных, аномальных и аварийных режимов работы асинхронных двигателей с короткозамкнутым ротором, а также рассмотрены существующие подходы к осуществлению исследования их режимов работы. Предложено для выполнения качественного анализа использовать гибридный подход, сочетающий в себе выполнение экспериментов с помощью цифровых регистраторов и выполнение математического моделирования на ПЭВМ с использованием математической модели, основанной на полных дифференциальных уравнениях, описывающих асинхронный двигатель, ключевой особенностью которой является усовершенствованный модуль комбинированного определения температуры нагрева обмоток статора и ротора на основе контроля режимных параметров. Работоспособность предложенного гибридного подхода проверена для асинхронного двигателя напряжением статора 0,4 кВ.

Выводы. Полученные результаты могут быть использованы как в научных, так и в практических целях для осуществления качественного анализа режимов работы низковольтных и высоковольтных асинхронных двигателей с короткозамкнутым ротором для проведения их мониторинга и диагностики, а также для проверки работоспособности систем релейной защиты и автоматики.

Ключевые слова: асинхронный двигатель, короткозамкнутый ротор, модуль комбинированного определения температуры нагрева

Sergei Nikolaevich Tkachenko

Donetsk National Technical University, Candidate of Engineering Sciences, Head of Electrical Power Plants Department, Russia, Donetsk, e-mail: tsn1981@mail.ru

Analysis of operating conditions and improvement of research methods of squirrel-cage rotor induction motors

Abstract

Background. At present, induction motors with a squirrel-cage rotor are the main type of AC electrical motors used in industry as an electric drive for various mechanisms and installations. To assess the performance of relay protection, automation, monitoring and diagnostics systems of induction machines, a qualitative analysis of their operating conditions is necessary. For this purpose, various approaches are used, based on experimental studies as well as on methods of mathematical simulation on a PC. However, most of the existing methods have certain drawbacks, such as the complexity of implementing a number of operating modes in real practical conditions, such as emergency short-circuit cases, the errors in mathematical simulation process, etc. Therefore, the qualitative analysis of normal, abnormal and emergency operating conditions of low- and high-voltage induction motors with squirrel-cage rotor and modernization of respective research methods is relevant.

Materials and methods. To achieve the stated goal, both experimental research methods and research methods based on mathematical simulation on a PC have been applied. A mathematical model based on full differential equations describing an induction motor has been used. The original PTC® MathCADTM software has been used as a modeling tool.

Results. The paper presents a detailed classification of normal, abnormal and emergency operating conditions of induction motors with a squirrel-cage rotor, and also considers existing approaches to study their operating modes. It is proposed to use a hybrid approach to perform a qualitative analysis, combining both experiments using digital recorders and PC mathematical simulation using a mathematical model based on full differential equations describing an induction motor. The key feature of the proposed mathematical model is an improved module for combined detection of heating temperature of stator and rotor windings based on monitoring the operating parameters. The performance of the proposed hybrid approach has been tested for 0,4 kV stator voltage induction motor.

Conclusions. The obtained results can be used for both scientific and practical purposes to carry out a qualitative analysis of operating conditions to check the operability of relay protection, automation, monitoring and diagnostics systems of low- and high-voltage induction motors with squirrel-cage rotor.

Key words: induction motor, squirrel-cage rotor, module for combined heating temperature detection

DOI: 10.17588/2072-2672.2025.2.034-042

Введение. В настоящее время асинхронные двигатели (АД) с короткозамкнутым ротором (КЗР) благодаря относительно простой конструкции и относительно высокой надежности являются основной электроприводной машиной переменного тока различных промышленных и бытовых агрегатов и механизмов, а также механизмов системы собственных нужд современных тепловых и атомных электрических станций [1–4]. Для оценки текущего состояния электродвигателей (ЭД), работоспособности систем релейной защиты и автоматики (РЗА), а также различных комплексов мониторинга и диагностики АД с КЗР необходим качественный анализ всех возможных режимов работы (РР), для осуществления которого на практике применяются различные способы, основанные на проведении экспериментальных исследований, на использовании систем математического моделирования (СММ) на ПЭВМ, а также на комбинированном проведении экспериментов и исследовании их результатов с помощью СММ. В настоящее время существует большое количество научных работ и нормативных документов, посвященных анализу и методам исследования РР ЭД переменного тока, в том числе и АД с КЗР. Следует отметить, что, несмотря на многообразие режимов работы АД, в стандартах прописаны лишь нормальные или типовые режимы. Одним из таких стандартов является ГОСТ ИЕС (МЭК) 60034-1-2014¹. Экспериментальные исследования характеристик и некоторых режимов прописаны в ГОСТ 7217-87² и стандарте IEEE Std 112™-2017³. Однако существенным недостатком рекомендованных нормативными документами методов в промышленных условиях являются сложности их применения и реализации, связанные с отсутствием специфического дополнительного дорогостоящего

оборудования и квалифицированных специалистов, технологическими особенностями электроприводных узлов и др. К наиболее распространенным относятся способы исследования РР АД с КЗР, основанные на использовании СММ. В [5–7] предложено использовать программный комплекс (ПРК) MathWorks® MATLAB®. Несмотря на широкие возможности и большое количество достоинств данного программного обеспечения (ПО), следует отметить и ряд недостатков: упрощенное моделирование ЭД (упрощенный учет скин-эффекта в обмотке короткозамкнутого ротора; упрощенный учет насыщения магнитопровода статора по пути главного магнитного потока и др.); неточности в методиках определения параметров применяемых эквивалентных схем замещения (ЭСЗ) асинхронных двигателей, что усложняет применение ПРК для мощных высоковольтных АД с различной формой паза стержневой обмотки ротора или с двумя беличьими клетками на роторе и др. К тому же следует подчеркнуть высокую стоимость данного ПО. В [8–14] представлены методы, основанные на использовании специализированного программного обеспечения DigSilence® PowerFactory™, Manitoba Hydro International Ltd® PSCAD™, ETAP®, Siemens® PSS® NETOMAC® и др., позволяющие моделировать сложные режимы работы как одного, так и группы АД. Однако помимо высокой стоимости в указанном ПО сложно смоделировать с высокой точностью такие РР, как однофазные замыкания на землю в сетях с изолированной или компенсированной нейтралью, неисправности системы охлаждения машины, несимметрия питающего напряжения и др.

Наибольший интерес представляют методы, изложенные в [1, 12] и основанные на математической модели (ММ), базирующиеся на

¹ ГОСТ ИЕС (МЭК) 60034-1-2014 Машины электрические вращающиеся. Ч. 1. Номинальные значения параметров и эксплуатационные характеристики: изд. офиц.: утв. и введ. в действие Приказом Федерального агентства по техническому регулированию и метрологии № 402-ст от 25.05.2015 г.: введ. впервые: дата введ. 2016-03-01. – М.: Стандартинформ, 2015. – 62 с.

² ГОСТ 7217-87 Машины электрические вращающиеся. Двигатели асинхронные. Методы испытаний: межгосударственный стандарт: изд. офиц.: дата введ. 1988-01-01. – М.: Изд-во стандартов, 2003. – 41 с.

³ IEEE Std 112-2004 Revision of IEEE Std 112-1996. IEEE Standard test procedure for polyphase induction motors and generators: american national standard institute: power engineering society: approved 12 may 2004. – New York, [USA], 2012. – 79 p.

полных дифференциальных уравнениях (ДУ), но для осуществления качественного анализа РР требующие дальнейшего совершенствования (учет насыщения по пути главного магнитного потока асинхронных машин, более точный учет скин-эффекта в обмотке ротора и др.). В связи с этим целью настоящего исследования является решение актуальной задачи повышения точности анализа РР АД с КЗР и дальнейшего совершенствования методов анализа режимов работы.

Методы исследования. Для качественного анализа большинства РР АД с КЗР предложен комбинированный подход, сочетающий в себе как проведение экспериментальных исследований согласно ГОСТ 7217-87 с использованием цифровых регистраторов (ЦР) или многоканальных микропроцессорных промышленных осциллографов, так и выполнение анализа с применением СММ, базирующихся на использовании усовершенствованной математической модели для ПЭВМ, представляющей собой программу для ПК РТС® MathCAD®. Данный подход позволяет осуществлять качественную цифровую регистрацию необходимых режимных параметров в рамках экспериментальных исследований и выполнять последующую обработку результатов экспериментов. Наличие усовершенствованной ММ, основанной на полных ДУ, позволяет моделировать опасные и трудноосуществимые на практике режимы работы асинхронных машин.

В качестве ЦР, необходимых для цифровой регистрации сигналов режимных параметров ЭД, в настоящем исследовании использован современный регистратор типа «Рекон-08МС», производимый НПП «Рекон» [15]. Для анализа зарегистрированной информации на ПЭВМ и последующей ее предварительной обработки используется специализированное ПО WinRec™-МА, рассчитанное на работу под управлением операционной системы Microsoft® Windows®.

При осуществлении необходимых экспериментов, помимо цифровой регистрации мгновенных значений фазных токов (i_a , i_b , i_c) присоединения «силовой кабель–АД» и напряжений на питающей секции (u_a , u_b , u_c), выполнялась фиксация импульсов датчика угла положения ротора (ДПР). Для определения скольжения (s) применялись ДПР двух типов: не связанного с валом машины косвенного типа (оптоволоконный генератор импульсов типа Autronics® BF4R) и непосредственно типа, устанавливаемого на валу с использованием силовой муфты (инкрементальный энкодер типа E40NB8-1200-3-N-24 Autronics®). Для измерения температуры нагрева обмоток асинхронного двигателя применялись высокоточные термодатчики (ТД).

Как было отмечено выше, СММ представляет усовершенствованную РТС® MathCAD®-программу, с помощью которой предоставляется возможность как качественно обрабатывать и

анализировать результаты цифровой регистрации, так и осуществлять математическое моделирование различных РР асинхронных двигателей. В ее основе находится математическая модель, базирующаяся на полных ДУ и использовании одноконтурной эквивалентной схемы замещения (ЭСЗ) с учетом скин-эффекта в обмотке ротора, насыщения магнитопровода статора и наличия контура потерь в стали магнитопровода статора (рис. 1). Все расчеты в данной модели выполняются в системе относительных единиц (о.е.). Ввиду этого в ММ все индуктивности рассеяния равны индуктивным сопротивлениям рассеяния ($L_\sigma = X_\sigma$).

Учет насыщения по пути главного магнитного потока магнитопровода статора осуществляется с использованием методики, описанной в [1].

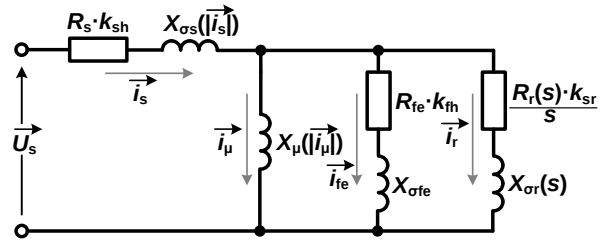


Рис. 1. Одноконтурная эквивалентная схема замещения АД с КЗР

Система ДУ записывается в неподвижной относительно статора системе координат $\alpha\beta$:

$$\begin{cases} p\bar{\psi}_s = \bar{u}_s - R_s k_{sh} \bar{i}_s, \\ p\bar{\psi}_r = -R_r(s) k_{th} \bar{i}_r + j\omega \bar{\psi}_r, \\ p\bar{\psi}_{fe} = -R_{fe} k_{th} \bar{i}_{fe}, \\ p\omega = J^{-1}(m - m_C(\omega, k_l)), \end{cases} \quad (1)$$

$$\bar{\psi}_\mu = a_s \bar{\psi}_s + a_{fe} \bar{\psi}_{fe} + a_r \bar{\psi}_r, \quad m = \frac{3}{2} (\bar{\psi}_s \times \bar{i}_s),$$

$$a_s = \frac{B_{SR}}{X_{\sigma s}}; \quad a_{fe} = \frac{B_{SR}}{X_{\sigma fe}}; \quad a_r = \frac{B_{SR}}{X_{\sigma r}(s)};$$

$$B_{SR} = \left[(X_\mu(\bar{i}_\mu))^{-1} + (X_{\sigma s}(\bar{i}_s))^{-1} + (X_{\sigma r}(s))^{-1} + (X_{\sigma fe})^{-1} \right]^{-1},$$

$$W_M = \int_0^t (R_s k_{sh} |\bar{i}_s|^2 + R_{fe} k_{th} |\bar{i}_{fe}|^2 + R_r(s) s k_{th} |\bar{i}_r|^2) dt,$$

$$k_{sh} = \frac{(1 + \alpha V_s)}{(1 + \alpha V_s^{Hac})}; \quad k_{th} = \frac{(1 + \alpha V_{fe})}{(1 + \alpha V_{fe}^{Hac})}; \quad k_{rh} = \frac{(1 + \alpha V_r)}{(1 + \alpha V_r^{Hac})},$$

$$\bar{i}_s = \frac{\bar{\psi}_s - \bar{\psi}_\mu}{X_{\sigma s}}, \quad \bar{i}_{fe} = \frac{\bar{\psi}_{fe} - \bar{\psi}_\mu}{X_{\sigma fe}}, \quad \bar{i}_r = \frac{\bar{\psi}_r - \bar{\psi}_\mu}{X_{\sigma r}}, \quad (2)$$

$$\bar{i}_s = \frac{\bar{\psi}_s - \bar{\psi}_\mu}{X_{\sigma s}}, \quad \bar{i}_\mu = \bar{i}_s - \bar{i}_{fe} - \bar{i}_r;$$

$$R_r(s) = R_r^{S_{HOM}} (a_r + (1 - a_r) k_R(s)); \quad (3)$$

$$X_{\sigma r}(s) = X_{\sigma r}^{S_{HOM}} (a_x + (1 - a_x) k_X(s)).$$

Здесь $\vec{\psi}_s, \vec{\psi}_{fe}, \vec{\psi}_r, \vec{\psi}_\mu$ – векторы потокоцеплений статора, контура потерь в стали магнитопровода статора, цепи ротора и ветви намагничивания соответственно; ω – угловая частота вращения ротора; m – мгновенное значение электромагнитного момента на валу; m_c – момент сопротивления; J – суммарный момент инерции привода; $\vec{U}_s$ – вектор напряжения статора; a_s, a_r, a_{fe} – коэффициенты распределения потокоцеплений статора, контура ротора и контура потерь в стали; B_{SR} – коэффициент; W_M – энергия, потребляемая ЭД за время работы t ; k_l – коэффициент загрузки механизма; $p = d/dt$ – оператор дифференцирования; V_s, V_{fe} – температуры нагрева обмотки статора и стали магнитопровода статора, измеряемые встроенными ТД при их наличии или определяемые из тепловой модели (ТМ), °C; V_r – температура нагрева обмотки ротора, определяемая из ТМ АД с КЗР, °C; $V_s^{\text{нач}}, V_{fe}^{\text{нач}}, V_r^{\text{нач}}$ – начальные значения температуры нагрева обмоток статора и КЗР, °C; k_{sh}, k_{th}, k_{rh} – поправочные коэффициенты, учитывающие влияние температуры нагрева на изменение активных сопротивлений обмоток статора, контура потерь в стали и обмотки ротора; α – температурный коэффициент материала проводника, $1/^\circ\text{C}$; $\vec{i}_s, \vec{i}_{fe}, \vec{i}_r, \vec{i}_\mu$ – векторы токов статора, контура потерь в стали магнитопровода статора, цепи ротора; R_s, R_{fe} – активные сопротивления обмотки статора и контура потерь в стали; $X_{\sigma fe}$ – индуктивное сопротивление рассеяния контура потерь в стали статора; $X_{\sigma s}(|\vec{i}_s|), X_{\sigma \mu}(|\vec{i}_\mu|)$ – функциональная зависимость индуктивного сопротивления взаимоиндукции от модуля вектора тока намагничивания (учет насыщения по [1]); $R_r(s), X_{\sigma r}(s)$ – зависимости активного сопротивления и индуктивного сопротивления рассеяния ротора для эквивалентного прямоугольного паза от скольжения, учитывающие эффект вытеснения тока или скин-эффект в обмотке КЗР (как и в [17]); $k_R(s), k_X(s)$ – коэффициенты вытеснения тока в обмотке короткозамкнутого ротора асинхронного двигателя, определяемые по формулам:

$$k_R(s) = \zeta_r \frac{\sinh(2\zeta_r) + \sin(2\zeta_r)}{[\cosh(2\zeta_r) - \cos(2\zeta_r)]}; \quad (4)$$

$$k_X(s) = \frac{3}{2\zeta_x} \frac{\sinh(2\zeta_x) - \sin(2\zeta_x)}{[\cosh(2\zeta_x) - \cos(2\zeta_x)]}, \quad (5)$$

где ζ – приведенные высоты активной и индуктивной составляющей сопротивлений, определяемые для стержня обмотки КЗР по формуле

$$\zeta_r = 0,9 \cdot h_r \sqrt{|S|}, \quad \zeta_x = 0,9 \cdot h_x \sqrt{|S|}, \quad (6)$$

где h_r и h_x – высоты пазов обмотки КЗР по активной и индуктивной составляющей сопротивлений; $R_r^{\text{НОМ}}$ и $X_{\sigma r}^{\text{НОМ}}$ – активное сопротивление и индуктивное сопротивление рассеяния обмотки КЗР при номинальном скольжении $s_{\text{НОМ}}$; a_r и a_x –

коэффициенты учета лобовых частей обмотки ротора по активной и индуктивной составляющей сопротивления обмотки КЗР АД.

Параметры ЭСЗ АД с КЗР определяем по методу, предложенному в [16]. Для решения системы ДУ (1) используется метод Рунге-Кутты четвертого порядка [17].

Ключевой особенностью предложенной математической модели является ее дополнение модулем комбинированного определения температуры нагрева обмоток АД с КЗР, прототипом которого является алгоритм тепловой защиты, представленный в [18] и включающий два способа контроля нагрева машины – на основе тепловой модели (ТМ) и на основе алгоритма косвенного вычисления температуры нагрева обмотки ротора по данным контроля режимных параметров.

В отличие от [18], в настоящем исследовании использован усовершенствованный алгоритм косвенного определения температуры нагрева короткозамкнутой обмотки ротора на основе алгебраических уравнений, базирующийся на сравнении активного сопротивления обмотки КЗР в горячем состоянии с известным его значением, измеренным в холодном (исходном) состоянии для текущего значения скольжения.

Последовательность необходимых измерительных и вычислительных операций за один шаг работы АЦП или шаг расчета по ММ на ПЭВМ модуля комбинированного определения температуры нагрева обмоток АД с КЗР следующая:

а) регистрация с помощью ЦР или расчет по ММ (1)–(6) режимных параметров ($i_a, i_b, i_c, U_a, U_b, U_c, S, V_s, V_{fe}$) асинхронного двигателя;

б) определение модулей обобщенных векторов тока и напряжения статора, а также активной мощности АД:

$$I_s = \frac{1}{2} \cdot \sqrt{(i_a)^2 + (i_b)^2 + (i_c)^2}; \quad (7)$$

$$U_s = \frac{1}{2} \cdot \sqrt{(u_a)^2 + (u_b)^2 + (u_c)^2}; \quad (8)$$

$$P = \frac{1}{2} \cdot (u_a i_a + u_b i_b + u_c i_c); \quad (9)$$

в) усреднение величин модулей обобщенных векторов тока и напряжения статора, а также активной мощности асинхронной машины:

$$I_s^{\text{CP}} = \sqrt{\frac{1}{m} \sum_1^m (I_s)^2}, \quad U_s^{\text{CP}} = \sqrt{\frac{1}{m} \sum_1^m (U_s)^2}; \quad (10)$$

$$P^{\text{CP}} = \sqrt{\frac{1}{m} \sum_1^m (P)^2}, \quad (11)$$

где m – количество точек измерения, отводимое на усреднение;

г) определение входных активного и индуктивного сопротивлений АД с КЗР в горячем состоянии:

$$R_{\text{BX}}^{\text{гор}} = P^{\text{CP}} / (I_s^{\text{CP}})^2, \quad X_{\text{BX}}^{\text{гор}} = \sqrt{\left[\frac{U_s^{\text{CP}}}{I_s^{\text{CP}}} \right]^2 - (R_{\text{BX}}^{\text{гор}})^2}; \quad (12)$$

д) усреднение величин входного активного и индуктивного сопротивления АД с КЗР в горячем состоянии:

$$R_{BX.CP}^{гор} = \sqrt{\frac{1}{m} \sum_1^m (R_{BX}^{гор})^2}; \quad (13)$$

$$X_{BX.CP}^{гор} = \sqrt{\frac{1}{m} \sum_1^m (X_{BX}^{гор})^2}; \quad (14)$$

е) определение величины активного сопротивления КЗР АД в горячем состоянии:

$$R_r^{гор}(s) = \left[\frac{A_r}{A_r + B_r} \right] s; \quad (15)$$

$$A_r = \left[\frac{R_{r\mu}}{R_{r\mu}^2 + X_{r\mu}^2} - \frac{R_{fe}}{R_{fe}^2 + X_{fe}^2} \right]; \quad (16)$$

$$B_r = \left[\frac{X_{r\mu}}{R_{r\mu}^2 + X_{r\mu}^2} - \frac{X_{fe}}{R_{fe}^2 + X_{fe}^2} - \frac{1}{X_{\mu}} \right]; \quad (17)$$

$$R_{r\mu} = R_{BX.CP}^{гор} - R_s - R_{КАБ}, \quad X_{r\mu} = X_{BX.CP}^{гор} - X_{\sigma s} - X_{КАБ},$$

где $R_{КАБ}$, $X_{КАБ}$ – активное и индуктивное сопротивления силового кабеля;

ж) определение по (3) активного сопротивления обмотки КЗР АД в исходном или холодном $R_r^{исх}(s)$ состоянии для текущего значения скольжения s ;

з) определение температуры нагрева обмотки КЗР АД:

$$V_r = \frac{R_r^{гор}(s) - R_r^{исх}(s)}{R_r^{исх}(s)} (235 + V_r^{нач}) + V_r^{нач}; \quad (18)$$

и) вычисление текущих потерь мощности в обмотке статора (ΔP_s), в стали статора (ΔP_{fe}) и в обмотке КЗР АД (ΔP_r):

$$\Delta P_s = R_r (I_s^{CP})^2, \quad \Delta P_{fe} = R_{fe} (I_{fe}^{CP})^2; \quad (19)$$

$$\Delta P_r = R_r(s) s (I_r^{CP})^2, \quad (20)$$

где I_{fe}^{CP} , I_r^{CP} – усредненные по (10) значения токов контура потерь в стали статора и цепи обмотки короткозамкнутого ротора;

к) определение текущего значения температуры нагрева обмоток статора и КЗР АД по ТМ, описывающей тепловую схему (ТС), представленную на рис. 2:

$$\rho \theta_s = -C_1^{-1} (\lambda_1^{-1} + \lambda_3^{-1}) \theta_s + (C_1 \lambda_3)^{-1} \theta_r + CP_1; \quad (21)$$

$$\rho \theta_r = -C_2^{-1} (\lambda_2^{-1} + \lambda_3^{-1}) \theta_r + (C_2 \lambda_3)^{-1} \theta_s + CP_2; \quad (22)$$

$$CP_1 = C_1^{-1} (\Delta P_s + \Delta P_{fe}), \quad CP_2 = C_2^{-1} \Delta P_r, \quad (23)$$

где λ_1 , λ_2 – тепловые сопротивления статора и КЗР; C_1 , C_2 – тепловые емкости статора и КЗР; параметры ТС λ_1 , λ_2 , C_1 , C_2 определяем по методике, изложенной в [19].

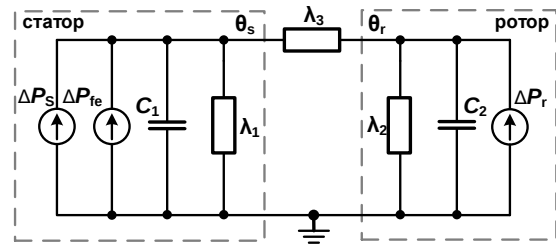


Рис. 2. Тепловая схема АД с КЗР

Поправочные коэффициенты k_{sh} , k_{fh} , k_{rh} учитываются в предложенной ММ при наличии показаний измерения от ТД.

Результаты исследования. Исходя из выполненного анализа все режимы работы АД с КЗР можно разделить на три группы: нормальные (типовые), аномальные и аварийные [2–4, 8, 19] (рис. 3).



Рис. 3. Схема классификации режимов работы АД с КЗР

Согласно ГОСТ ИЕС (МЭК) 60034-1-2014, под нормальным, или типовым, режимом работы объекта электроэнергетической системы, в том числе и асинхронного электродвигателя, понимают работу при нормированных заводом-изготовителем номинальных режимных параметрах (ток, напряжение, частота, коэффициент загрузки, температура обмоток и др.), при которых электрическая машина или электроаппарат гарантированно отработает заявленный срок эксплуатации. В настоящее время в вышеуказанном стандарте прописаны десять типовых, или номинальных, режимов работы, имеющих маркировку от S1 до S10. На каждом ЭД на корпусе присутствует табличка с указанием каталожных или паспортных данных машины, включая обозначение нормального режима работы, на который данный ЭД рассчитан. Например, если указано обозначение «Режим работы: S1», то двигатель рассчитан на прямой пуск и последующую работу с заданным постоянным коэффициентом загрузки. При этом нежелательно применять ЭД, рассчитанный на один из РР, для других нормированных режимов. Например, на практике известны случаи ухудшения состояния изоляции обмотки статора АД с КЗР, рассчитанного для режима S1, при задействовании его в режиме S10, при котором потребляемая мощность и частота вращения ротора изменяются дискретно в широком диапазоне. Основная причина заключается

в том, что у рассматриваемого ЭД на роторе расположены два осевых вентилятора, которые при номинальной частоте вращения осуществляют циркуляцию охлаждающего воздуха внутри машины. При отсутствии вспомогательной системы охлаждения при работе на низких частотах вращения резко ухудшается процесс отвода тепла от нагретых поверхностей и, соответственно, происходит перегрев изоляции обмоток свыше предельно допустимых значений.

В ГОСТ IEC (МЭК) 60034-1-2014 для всех нормальных, или типовых, режимов приведены температурно-нагрузочные характеристики, представляющие собой зависимости температуры нагрева V и потребляемой мощности P двигателя от времени t .

К аномальным режимам относятся такие РР ЭД, при появлении которых наблюдаются незначительные (умеренно допустимые) отклонения каких-либо режимных параметров (токов, напряжений и др.). Наиболее распространенным аномальным режимом является симметричная перегрузка, сопровождающаяся превышением номинальных значений токов по фазам.

Как указано в ГОСТ IEC (МЭК) 60034-1-2014, ЭД переменного тока, в том числе, и АД с КЗР номинальной мощностью не более 315 кВт и номинальным напряжением статора до 1 кВ должны выдерживать перегрузку по току, равную $1,5 \cdot I_{\text{ном}}$, в течение как минимум двух минут.

Причем для ЭД номинальной мощностью свыше 315 кВт кратковременные перегрузки по току ГОСТом не нормируются. Причинами перегрузки являются различные набросы или резкие увеличения нагрузки на валу машины выше предельно допустимых значений, а также неисправности подшипниковых узлов.

Также к аномальным РР относятся самозапуск, многократные процессы «пуск–останов», ухудшение работы системы охлаждения, ухудшение смазки подшипников, эксплуатация ЭД стандартного типоразмера в агрессивных средах, работа при отклонении напряжения питающей сети в пределах $\pm 10\%$, а также смешанный режим. Согласно [19], под последним понимают постоянную резкопеременную нагрузку на валу, сопровождающуюся чередующимися процессами «перегрузка – работа при заданном коэффициенте загрузки – работа при низком коэффициенте загрузки». Такой режим на практике имеет место, например, на приводных механизмах с неисправностью подшипников, а также на механизмах, у которых присутствуют различные нарушения или сбои в работе (например, нарушения дозированной подачи угольного топлива на ленточный конвейер из-за неисправности питателя и т.п.). Температурно-нагрузочная характеристика смешанного режима показана на рис. 4.

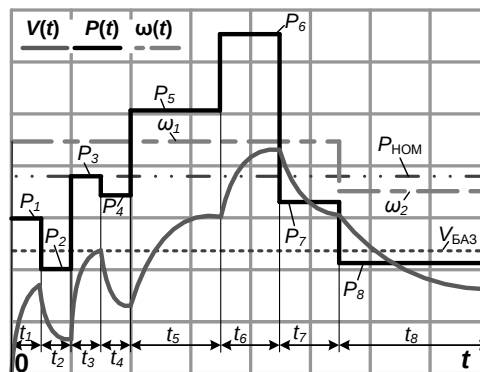


Рис. 4. Температурно-нагрузочная характеристика смешанного режима

В отличие от нормальных РР, все аномальные режимы представляют опасность для любого энергообъекта, в том числе и для АД с КЗР. Отклонение от допустимых значений какого-либо режимного параметра сопровождается обычно дополнительным нагревом конструктивных элементов, а соответственно, приводит к ухудшению состояния изоляции обмоток и сокращению срока службы. Общеизвестно, что превышение предельно-допустимой температуры изоляции на 10°C сокращает заявленный заводом-изготовителем срок эксплуатации вдвое [19]. Поэтому допустимое время работы для АД с КЗР в аномальных РР лимитировано и зависит от конструктивных особенностей машины, системы охлаждения, а также от типа приводного механизма и его роли в технологическом промышленном цикле. К тому же длительная работа в аномальных режимах может стать причиной появления более тяжелых аварийных режимов, под которыми понимают такие РР, длительная работа в которых представляет опасность ввиду резкого отклонения режимных параметров от нормированных значений, приводящих к разрушению конструктивных элементов машины или электроаппарата и к преждевременному долгосрочному выходу из строя. Аварийные РР можно разделить на механические и электрические (см. рис. 4). К аварийным режимам АД электрического характера относятся: все виды коротких замыканий (КЗ); однофазные и двойные замыкания на землю для ЭД, работающих в сетях с изолированной или компенсированной нейтралью; витковые замыкания в обмотке статора; работа при наличии недопустимого отклонения напряжения питающей сети; неуспешный самозапуск; обрыв фаз обмотки статора; «слипание фаз» и др. К аварийным режимам механической природы относятся: эксцентриситет ротора; нарушение крепления сердечника статора к станине; ослабление неисправности подшипниковых узлов; заклинивание вала; обрыв стержней короткозамкнутой обмотки ротора и др. Причинами появления вышеуказанных ре-

жимов являются: длительная работа в аномальных режимах; ухудшение состояния изоляции (старение); разрушение подшипников; появление недопустимых перегрузок; некорректная работа РЗиА; человеческий фактор в процессе эксплуатации и др. Как правило, аварийные режимы, особенно КЗ, требуют своевременной идентификации и незамедлительного отключения поврежденного присоединения «силовой кабель–ЭД» от питающей сети.

Работоспособность предложенного в работе комбинированного подхода анализа РР асинхронных двигателей, сочетающего проведение экспериментов и математического моделирования с использованием специализированного ПО, проверена как в лабораторных условиях, так и на реальном энергообъекте. Лабораторная установка, разработанная на кафедре «Электрические станции» ФГБОУ ВО «ДонНТУ», включает в качестве испытуемого АД с КЗР типа АИР-112М4 с параметрами: $P_{\text{ном}} = 5,5$ кВт; $I_{\text{ном}} = 11,43$ А; $U_{\text{ном}} = 0,4$ кВ; $\cos\varphi_{\text{ном}} = 0,96$; $\eta_{\text{ном}} = 0,855$ о.е.; $M_{\text{мах}} = 2,5$ о.е.; $M_{\text{р}} = 2,0$ о.е.; $K_t = 7,0$ о.е.; $s_{\text{ном}} = 0,043$ о.е. В качестве ЦР был использован регистратор типа «Рекон-08МС» производства НПП «Рекон».

Проверка работоспособности модуля оценки теплового состояния обмоток асинхронного двигателя осуществлялась в режиме подачи в течение одного часа на статор пониженного напряжения, равного 49 В, при заторможенном роторе ($s = 1$). При этом, помимо регистрации режимных параметров, измерялась температура нагрева обмоток статора и ротора асинхронной машины с помощью ТД. В конце эксперимента-проверки усредненные значения температуры нагрева обмоток статора и КЗР АД, определенные по предложенному алгоритму комбинированного модуля оценки теплового состояния, составили $V_r = 52,2$ °С, $\theta_s = 44,5$ °С, $\theta_r = 57,6$ °С, а ее значения, измеренные термодатчиком, – $V_s = 41,5$ °С, $V_r = 53,5$ °С. Доверительный интервал при этом составил ± 5 %.

На рис. 5 приведены результаты обработки эксперимента – подачи на статор АД типа АИР-112-М4 пониженного напряжения при заторможенном роторе (момент времени – через один час после подключения к питающей сети) – в виде зависимостей усредненных значений обобщенных векторов тока и напряжения статора, а также температур нагрева обмоток статора и КЗР, рассчитанных по алгоритму, заложенному в комбинированный модуль определения температуры нагрева.

Достаточно близкое совпадение температур нагрева статора и ротора, определенных по предложенному алгоритму (7)–(23), с измеренными ТД значениями подтверждает его достоверность.

Корректная работа ММ (1)–(6) также проверена на ПЭВМ для вышеуказанного АД

АИР-112М4 в различных РР, например прямого пуска, работы при различном коэффициенте нагрузки, перегрузке и др.

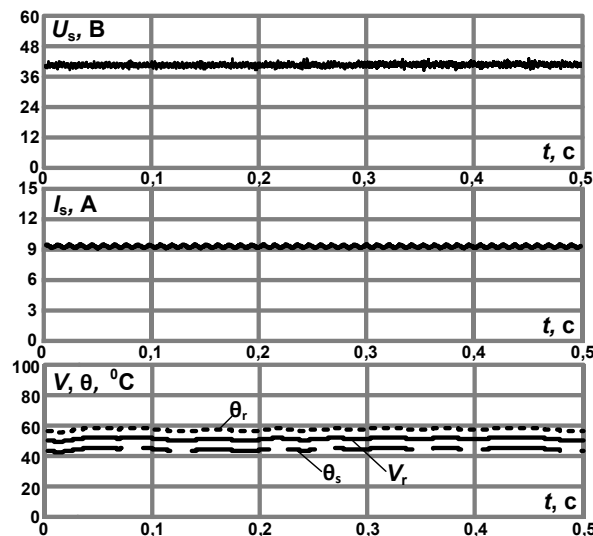


Рис. 5. Результаты проверки работоспособности модуля оценки теплового состояния обмоток

Выводы. Усовершенствованная математическая модель в сочетании с проведением экспериментальных исследований с использованием современных цифровых осциллографов позволяет повысить точность анализа режимов работы АД с КЗР и может быть использована при выполнении как экспериментальных исследований в реальных производственных условиях, так и научных исследований, например, при анализе существующих и находящихся в стадии разработки и отладки новых алгоритмов релейной защиты и автоматики присоединения «силовой кабель–АД». В качестве возможных направлений дальнейшего развития исследования режимов работы асинхронных двигателей с короткозамкнутым ротором следует выделить совершенствование математической модели для анализа влияния качества напряжения питающей сети, а также для моделирования обрыва стержней короткозамкнутой обмотки ротора.

Проверка работоспособности предложенной усовершенствованной математической модели асинхронного двигателя с короткозамкнутым ротором, дополненной модулем определения температуры нагрева обмоток, выполнена как на экспериментальном стенде, так и на математической модели на ПЭВМ для АД с КЗР АИР-112М4 номинальной мощностью 5,5 кВт и напряжением статора 0,4 кВ и показала корректные результаты расчетов с доверительным интервалом, равным ± 5 %.

Список литературы

1. Сивокобыленко В.Ф., Костенко В.И. Математическое моделирование электродвигателей собственных нужд электрических станций. – Донецк: ДПИ, 1979. – 110 с.

2. Сыромятников И.А. Режимы работы асинхронных и синхронных двигателей / под ред. Л.Г. Мамиконянца. – М.: Энергоатомиздат, 1984. – 240 с.

3. Корогодский В.И., Кузечков С.Л., Паперно Л.Б. Релейная защита электродвигателей напряжением выше 1 кВ. – М.: Энергоатомиздат, 1987. – 248 с.

4. Development of an intelligent condition monitoring system for AC induction motors using PLC / M. Irfan, N. Saad, R. Ibrahim, V.S. Asirvadam // Proceedings of IEEE Business Engineering and Industrial Applications Colloquium (BEIAC). – Langkawi, Malaysia, 2013. – P. 789–794. DOI: 10.1109/BEIAC.2013.6560243.

5. Марченко Н.М. Исследование режимов работы асинхронного двигателя на моделях в пакете MATLAB // Известия Тульского государственного университета. Технические науки. – 2021. – № 3. – С. 62–69.

6. Patel R.A., Bhalja B., Alam M.A. Condition Monitoring of Three-Phase Induction Motor // Proceedings of 2020 IEEE 1st International Conference for Convergence in Engineering (ICCE). – Kolkata, India, 2020. – P. 16–20. DOI: 10.1109/ICCE50343.2020.9290540.

7. Mohammad Noor S.Z., Hamzah M.K., Megat Yunus P.N.A. Three phase induction motor analysis using MATLAB/GUIDE // Proceedings of 2013 IEEE 7th International Power Engineering and Optimization Conference (PEOCO). – Langkawi, Malaysia, 2013. – P. 161–166. DOI: 10.1109/PEOCO.2013.6564535.

8. Condition monitoring of induction motors: A review / R.N. Dash, S. Sahu, C.K. Panigrahi, B. Subudhi // Proceedings of 2016 International Conference on Signal Processing, Communication, Power and Embedded System (SCOPEs). – Paralakhemundi, India. – 2016. – P. 2006–2011. DOI: 10.1109/SCOPEs.2016.7955800.

9. Саттаров Р.Р., Гарафутдинов Р.Р., Крылов А.А. Метод аналитического расчета выбега асинхронных двигателей под действием технологической нагрузки // Нефтегазовое дело. – 2022. – Т. 20, № 4. – С. 123–132. DOI: 10.17122/ngdelo-2022-4-123-132.

10. Илюшин П.В. Комплексное моделирование электрических режимов в сетях внешнего и внутреннего электроснабжения предприятий с собственной генерацией // Вестник Иркутского государственного технического университета. – 2018. – Т. 22, № 4(135). – С. 122–135. DOI: 10.21285/1814-3520-2018-4-122-135.

11. Маджидов А.Ш. Исследование способов пуска трехфазных асинхронных двигателей в системе собственных нужд в программном комплексе ЕТАР // Вестник Северо-Кавказского федерального университета. – 2020. – № 5(80). – С. 18–34. DOI: 10.37493/2307-907X.2020.5.2.

12. Сивокобыленко В.Ф. Математическая модель многомашинной электрической системы в фазных координатах // Электричество. – 2014. – № 7. – С. 34–40.

13. Helerea E., Lepădat I., Ciobanu A. Impact of three-phase voltage dips on the induction motors – An experimental study // Proceedings of 2013 4th International Symposium on Electrical and Electronics Engineering (ISEEE). – Galati, Romania, 2013. – P. 1–6. DOI: 10.1109/ISEEE.2013.6674352.

14. Condition monitoring of induction motors: A review and an application of an ensemble of hybrid intelligent models / M. Seera, C.P. Lim, S. Nahavandi, C.K. Loo // Expert Systems with Applications. – 2014. – Vol. 41, Issue 10. – P. 4891–4903. <https://doi.org/10.1016/j.eswa.2014.02.028>.

15. Иванилов Б.В., Заболотный И.П. Оценка технологии регистрации и обработки информации // Электрические станции. – 2003. – № 9. – С. 40–45.

16. Павлюков В.А., Ткаченко С.Н. Совершенствование методов идентификации параметров эквивалентных схем замещения широкополосных асинхронных двигателей // Электричество. – 2018. – № 10. – С. 54–60. DOI: 10.24160/0013-5380-2018-10-54-60.

17. Сивокобыленко В.Ф. Математическое моделирование в электротехнике и энергетике: учеб. пособие для вузов. – Донецк: РИА ДонНТУ, 2005. – 350 с.

18. Сивокобыленко В.Ф., Ткаченко С.Н. Математическое моделирование комбинированной тепловой защиты широкополосного асинхронного двигателя // Электрические станции. – 2020. – № 2(1063). – С. 46–53. – DOI: <http://dx.doi.org/10.34831/EP.2020.1063.2.007>

19. Соркин М.Д. Асинхронные электродвигатели 0,4 кВ. Аварийные режимы работы // Новости электротехники. – 2005. – № 2(32). – URL: <http://news.elteh.ru/arh/2005/32/12.php> (дата обращения: 03.10.2024).

References

1. Sivokobylenko, V.F., Kostenko, V.I. *Matematicheskoe modelirovanie elektrodvigatelay sobstvennykh nu-zhd elektricheskikh stantsiy* [Mathematical simulation of electric motors of power plants auxiliaries]. Donetsk: DPI, 1979. 110 p.

2. Syromyatnikov, I.A. *Rezhimy raboty asinkhronnykh i sinkhronnykh dvigateley* [Operating conditions of induction and synchronous motors]. Moscow: Energoatomizdat, 1984. 240 p.

3. Korogodskiy, V.I., Kuzhekov, S.L., Paperno, L.B. *Reley'naya zashchita elektrodvigatelay napryazheniem vyshe 1 kV* [Relay protection of electric motors with voltage above 1 kV]. Moscow: Energoatomizdat, 1987. 248 p.

4. Irfan, M., Saad, N., Ibrahim, R., Asirvadam, V.S. Development of an intelligent condition monitoring system for AC induction motors using PLC. 2013 IEEE Business Engineering and Industrial Applications Colloquium (BEIAC). Langkawi, Malaysia, 2013, pp. 789–794. DOI: 10.1109/BEIAC.2013.6560243.

5. Marchenko, N.M. Issledovanie rezhimov raboty asinkhronnogo dvigatelya na modelyakh v pakete MATLAB [Study of operating conditions of an induction motor using models in the MATLAB package]. *Izvestiya Tul'skogo gosudarstvennogo universiteta. Tekhnicheskie nauki*, 2021, no. 3, pp. 62–69.

6. Patel, R.A., Bhalja, B., Alam, M.A. Condition Monitoring of Three-Phase Induction Motor. Proceedings of 2020 IEEE 1st International Conference for Convergence in Engineering (ICCE). Kolkata, India, 2020, pp. 16–20. DOI: 10.1109/ICCE50343.2020.9290540.

7. Mohammad Noor, S.Z., Hamzah, M.K., Megat Yunus, P.N.A. Three phase induction motor analysis using MATLAB/GUIDE. Proceedings of 2013 IEEE 7th International Power Engineering and Optimization Conference (PEOCO). Langkawi, Malaysia, 2013, pp. 161–166. DOI: 10.1109/PEOCO.2013.6564535.

8. Dash, R.N., Sahu, S., Panigrahi, C.K., Subudhi, B. Condition monitoring of induction motors: A review. Proceedings of 2016 International Conference on Signal Processing, Communication, Power and Embedded System (SCOPEs). Paralakhemundi, India, 2016, pp. 2006–2011. DOI: 10.1109/SCOPEs.2016.7955800.

9. Sattarov, R.R., Garafutdinov, R.R., Krylov, A.A. Metod analiticheskogo rascheta vybeга asinkhronnykh dvigateley pod deystviem tekhnologicheskoy nagruzki [Method of analytical calculation of induction motor runout

under technological load]. *Neftegazovoe delo*, 2022, vol. 20, no. 4, pp. 123–132. DOI: 10.17122/ngdelo-2022-4-123-132.

10. Ilyushin, P.V. Kompleksnoe modelirovanie elektricheskikh rezhimov v setyakh vneshnego i vnutrennego elektroobrazovaniya predpriyatiy s sobstvennoy generatsiyey [Complex simulation of electrical conditions in external and internal power supply networks of enterprises with their own generation]. *Vestnik Irkutskogo gosudarstvennogo tekhnicheskogo universiteta*, 2018, vol. 22, no. 4(135), pp. 122–135. DOI: 10.21285/1814-3520-2018-4-122-135.

11. Madzhidov, A.Sh. Issledovanie sposobov puska trekhfaznykh asinkhronnykh dvigateley v sisteme sobstvennykh nuzhd v programmnom komplekse ETAP [Study of methods for starting three-phase induction motors in the auxiliary's system in the ETAP software package]. *Vestnik Severo-Kavkazskogo federal'nogo universiteta*, 2020, no. 5(80), pp. 18–34. DOI: 10.37493/2307-907X.2020.5.2.

12. Sivokobylenko, V.F. Matematicheskaya model' mnogomashinnoy elektricheskoy sistemy v faznykh koordinatakh [Mathematical model of a multi-machine electrical system in phase coordinates]. *Elektrichestvo*, 2014, no. 7, pp. 34–40.

13. Helerea, E., Lepădat, I., Ciobanu, A. Impact of three-phase voltage dips on the induction motors – An experimental study. Proceedings of 2013 4th International Symposium on Electrical and Electronics Engineering (ISEEE). Galati, Romania, 2013, pp. 1–6. DOI: 10.1109/ISEEE.2013.6674352.

14. Seera, M., Lim, C.P., Nahavandi, S., Loo, C.K. Condition monitoring of induction motors: A review and an ap-

plication of an ensemble of hybrid intelligent models. *Expert Systems with Applications*, 2014, vol. 41, issue 10, pp. 4891–4903. DOI: <https://doi.org/10.1016/j.eswa.2014.02.028>.

15. Ivanilov, B.V., Zabolotnyy, I.P. Otsenka tekhnologii registratsii i obrabotki informatsii [Evaluation of the technology of registration and processing of information]. *Elektricheskie stantsii*, 2003, no. 9, pp. 40–45.

16. Pavlyukov, V.A., Tkachenko, S.N. Sovershenstvovanie metodov identifikatsii parametrov ekvivalentnykh skhem zameshcheniya glubokopaznykh asinkhronnykh dvigateley [Improving the methods of identifying the parameters of equivalent circuits of deep-bar induction motors]. *Elektrichestvo*, 2018, no. 10, pp. 54–60. DOI: 10.24160/0013-5380-2018-10-54-60.

17. Sivokobylenko, V.F. *Matematicheskoe modelirovanie v elektrotekhnike i energetike* [Mathematical modeling in electrical engineering and power engineering]. Donetsk, RIA DonNTU, 2005. 350 p.

18. Sivokobylenko, V.F., Tkachenko, S.N. Matematicheskoe modelirovanie kombinirovannoy teplovoy zashchity glubokopaznogo asinkhronnogo dvigatelya [Mathematical simulation of combined thermal protection of deep-bar induction motor]. *Elektricheskie stantsii*, 2020, no. 2(1063), pp. 46–53. <http://dx.doi.org/10.34831/EP.2020.1063.2.007>

19. Sorkind, M.D. Asinkhronnye elektrodvigateli 0,4 kV. Avariynye rezhimy raboty [Induction electric motors 0,4 kV. Emergency operating conditions]. *Novosti elektrotekhniki*, 2005, no. 2(32). URL: <http://news.elteh.ru/arh/2005/32/12.php> (data obrashheniya: 03.10.2024).