

Методика оценки влияния качества электрической энергии на надёжность работы асинхронного двигателя с короткозамкнутым ротором

ВАЛЯНСКИЙ А.В., КАРТАШЕВ И.И., ШАРОВ Ю.В.

Рассматривается влияние несинусоидальности и несимметрии приложенного напряжения на увеличение потерь в асинхронном двигателе, приводящее к росту температуры обмотки статора и соответствующему сокращению срока службы двигателя. Предлагается методика оценки влияния токов высших гармоник и токов обратной последовательности основной частоты на тепловой режим работы и срок службы асинхронного двигателя с короткозамкнутым ротором. Рассматриваются асинхронные двигатели, входящие в состав электроприводов собственных нужд крупных энергетических объектов, исполнительные механизмы которых обеспечивают нормальную работу основного электрооборудования электрических станций и подстанций.

Ключевые слова: электроснабжение, качество электроэнергии, асинхронный двигатель, тепловой срок службы, надёжность

Простота конструкции, дешёвая технология производства, оптимальные массогабаритные показатели определили широкое распространение асинхронных двигателей (АД) с короткозамкнутым (к. з.) ротором в электроприводах различных механизмов, в том числе и в системах собственных нужд (с. н.) крупных энергетических объектов. Электропривод поточно-транспортных систем является ответственным в технологическом процессе с. н. крупных энергетических объектов. К ним относятся питательные насосы для подачи воды в парогенератор, масляные насосы и вентиляторы систем охлаждения типа ДЦ (дутьё и принудительная циркуляция масла) мощных силовых трансформаторов. Отказ в работе таких электроприводов, наступающий в результате интенсивного нагрева обмотки статора, приводит к снижению надёжности основного электрооборудования (ЭО), выход из строя которого, в свою очередь, приводит к снижению электроснабжения в целом. Наглядно это можно продемонстрировать на примере подстанции с трансформатором типа ТДЦ (рис. 1), к шинам низкого напряжения (НН) которого подключена нелинейная нагрузка. Несинусоидальное и несимметричное напряжение на зажимах АД создаёт токи высших гармоник (ВГ) и обратной последовательности (ОП) основной частоты, увеличивающие потери в обмотках и, как следствие, дополнительный нагрев активных частей АД.

Твёрдая изоляция, применяемая при производстве электрических машин, имеет определённый класс нагревостойкости с соответствующим ему значением температурного индекса. Нагревостойкость изоляции определяет её свойства в отношении теплового срока службы. Поэтому влияние то-

ков ВГ и ОП на надёжность АД необходимо учитывать через параметры теплового режима его работы.

Статистика отказов АД [1] указывает на уязвимость твёрдой изоляции обмоток статора к основным воздействующим факторам в процессе эксплуатации: электрическое напряжение (перенапряжение), температура, вибрации, влага, химически агрессивная среда. Для предотвращения недопустимого перегрева обмоток АД предусматривается установка тепловой защиты прямого или косвенного действия. Часто встречающиеся на практике тепловые защиты косвенного действия представляют собой тепловое реле со встроенной тепловой моделью или с вводом результатов расчёта тепловой схемы замещения АД [2]. Для выбора уставок последнего вида тепловой защиты необходимо определить основные и дополнительные потери в АД и оценить превышение температуры обмотки статора над температурой окружающей среды.

Рассмотрим работу АД в составе электропривода поточно-транспортной системы и оценим продолжительный режим работы (S1) [3] по тепловому

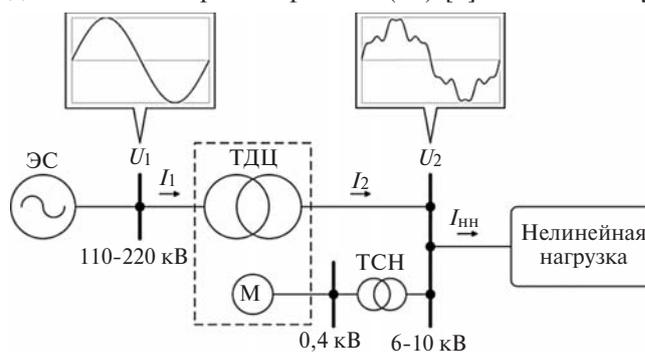


Рис. 1. Схема подстанции с силовым трансформатором типа ТДЦ

сроку службы изоляции. Процесс нагрева является инерционным и характеризуется постоянной времени нагрева $T_{\text{нгр}}$, которая лежит в диапазоне от десятков минут до нескольких часов в зависимости от исполнения и способа охлаждения вращающейся машины. Установившееся значение температуры активных частей АД наступает через время, примерно равное $(3, 4)T_{\text{нгр}}$, поэтому продолжительность нагрузки должна быть больше или равна времени выхода АД на установившийся тепловой режим работы.

Расчёт основных потерь мощности в АД проводится на основе применения электрических схем замещения (рис. 2, а и б) [4].

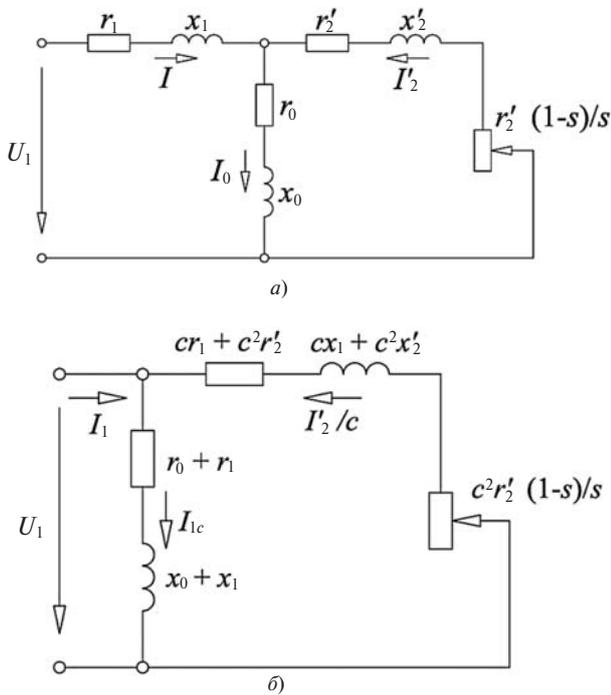


Рис. 2. Т-образная (а) и Г-образная (б) схема замещения АД с к. з. ротором

Для расчёта дополнительных потерь мощности от воздействия токов обратной последовательности основной частоты в цепи ротора вместо скольжения s - s_1 (для токов прямой последовательности основной частоты) следует подставлять скольжение s - s_2 (для токов обратной последовательности основной частоты):

$$s_2 = 2 - s_1. \tag{1}$$

Для анализа работы АД при питании его несинусоидальным напряжением в схемах замещения (рис. 2) необходимо вместо скольжения s - s_1 подставить скольжение s - $s_{(n)}$ ротора АД относительно n -й гармоники магнитного поля (МП) в воздушном зазоре [4]:

$$s_{(n)} = 1 \pm n(1 - s_1), \tag{2}$$

где знак «плюс» соответствует гармоникам, образующим обратную последовательность чередования фаз, а знак «минус» — гармоникам, образующим прямую последовательность.

Как известно, при протекании высокочастотных токов через элементарный проводник возникает поверхностный эффект (скин-эффект). В расчётах, когда поверхностный эффект проявляется резко, активное сопротивление $r_{(n)}$ на гармонике n -го порядка определяется через активное сопротивление $r_{(1)}$ на основной частоте согласно соотношению [5]:

$$r_{(n)} = \sqrt{n}r_{(1)}. \tag{3}$$

Индуктивное сопротивление $x_{(n)}$ прямо пропорционально частоте тока, протекающего через катушку, поэтому его значение по отношению к индуктивному сопротивлению катушки $x_{(1)}$ на основной частоте равно

$$x_{(n)} = nx_{(1)}. \tag{4}$$

Оценка средних превышений температуры активных частей АД выполняется с помощью метода наложения и с применением тепловой схемы замещения, расчёт параметров которой изложен в [6]. Анализ нагрева АД от воздействия ухудшенного качества питающего напряжения необходимо проводить для каждой фазы в отдельности, так как при несимметричном напряжении в них протекают неравные токи. В связи с чем тепловая схема замещения (рис. 3) включает в себя тепловые сопротивления следующих частей АД при его исполнении по способу монтажа IM 1001, по степени защиты IP 44 и по способу охлаждения IC 0141: $R_{\text{кор}}$ — поверхность оребрённого корпуса АД; $R_{\text{щ}}$ — боковые щиты АД с учётом обдува со стороны вентилятора; $DJ_{\text{вн}}$ — внутренний объём воздуха АД; R_{cd1}, R_{cq1} — сталь сердечника статора в продольном d и поперечном q направлении; $R_{из1}, R_{л1}$ — пазовая и лобовая изоляция для каждой фазы обмотки статора; $R_{п1}$ — проводниковый материал для каждой фазы обмотки статора; $R_{г}$ — воздушный зазор между статором и ротором; R_{cd2}, R_{cq2} — сталь сердечника ротора в продольном d и поперечном q направлении; $R_{п2}$ — пазовая часть обмотки ротора; $R_{л2}$ — лобовая часть обмотки ротора — боковые короткозамкнутые кольца.

По тепловой схеме замещения составляется система уравнений [7], которая в матричном виде записывается как

$$DP = GDJ, \tag{5}$$

где DP — вектор-столбец тепловых потерь; G — квадратная матрица тепловых проводимостей, об-

Таблица 1

Часть АД с к.з. ротором	Параметр (расчет)	
	DP, Вт	DJ, °C
Статор		
Обмотка:		
пазовая часть	95,14	44,37
лобовая часть	126,93/126,93*	42,69/46,74*
Сердечник	1461,32	43,76
Ротор		
Обмотка:		
пазовая часть	1272,55	51,04
лобовая часть	676,03/676,03*	52,16/52,46*
Сердечник	0	51,04

*Числитель – наименьшее значение, знаменатель – наибольшее.

Для оценки теплового срока службы АД необходимо учесть изменение температуры окружающей среды (климатическое исполнение УХЛ2). График изменения температуры воздуха во времени восстановим с помощью синусоиды [8]:

$$J_{в}(t) = J_{ср.год} + J_{год} \cos \frac{2\pi}{D_{год}} \left(n_{сут} - \frac{D_x}{D_{год}} \right) + J_{сут} \cos \frac{2\pi}{T_{сут}} \left(t - \frac{T_x}{T_{сут}} \right) \quad (6)$$

где $J_{ср.год}$ – среднегодовая температура воздуха; $J_{год}$ – амплитуда годового изменения температуры воздуха; $n_{сут}$ – порядковый номер суток в году начиная с первого января; D_x – порядковый номер самого жаркого дня в году; $D_{год}$ – число дней в году; $J_{сут}$ – амплитуда суточного изменения температуры воздуха; t – текущее значение времени; T_x – время наибольшей температуры самого жаркого дня в году; $T_{сут}$ – число часов в сутках.

На рис. 4 показан восстановленный график изменения температуры воздуха на примере климата г. Москвы.

Случайный характер изменения показателей качества электроэнергии (ПКЭ) по напряжению подчиняется нормальному закону распределения вероятности [9]. Поэтому стохастическое поведение ПКЭ реализуем многомерным нормальным законом распределения с постоянной матрицей ковариаций [10]:

$$f(x_1, x_2, \dots, x_k) = \frac{1}{(2\pi)^{k/2} \sqrt{|C|}}$$

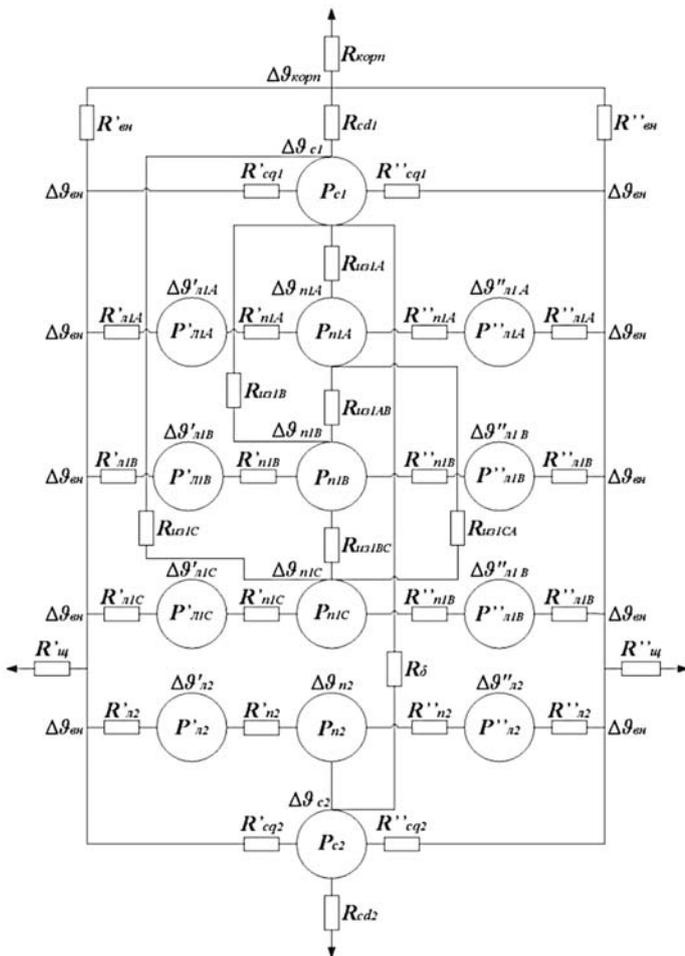


Рис. 3. Тепловая схема замещения АД с к.з. ротором

ратно пропорциональных тепловым сопротивлениям R тепловой схемы замещения (рис. 3); Dq – вектор-столбец искомых превышений температуры.

Расчёт тепловых сопротивлений между однородными частями АД проводится в соответствии с формулами [6]. Математическая модель спроектированного АД была реализована в программной среде MATLAB, параметры которой имеют значения, представленные далее: характеристики спроектированного АД с к.з. ротором. $U_{1ном} = 380$ В; $I_{1х.х.} = 78,96$ А; $I_{1ном} = 336,25$ А; $P_{2ном} = 200$ кВт; $n_{1ном} = 3000$ об/мин; $s_{ном} = 1,3$ %; $\eta_{ном} = 97,29$ %; $\cos \varphi_{ном} = 0,92$; $K_I = 5,3$; $M_{max}/M_{ном} = 2,94$; $M_{пуск}/M_{ном} = 0,95$;

фазные параметры Г-образной схемы замещения при соединении обмоток статора звездой: $c = 1,024$; $r_0 = 115 \cdot 10^{-3}$ Ом; $r_1 = 2,7 \cdot 10^{-3}$ Ом; $r_2 = 9,1 \cdot 10^{-3}$ Ом; $x_0 = 2,81$ Ом; $x_1 = 68,7 \cdot 10^{-3}$ Ом; $x_2 = 54,3 \cdot 10^{-3}$ Ом.

Расчётные превышения температуры активных частей АД определялись с помощью тепловой схемы замещения (рис. 3) и результаты сведены в табл. 1.

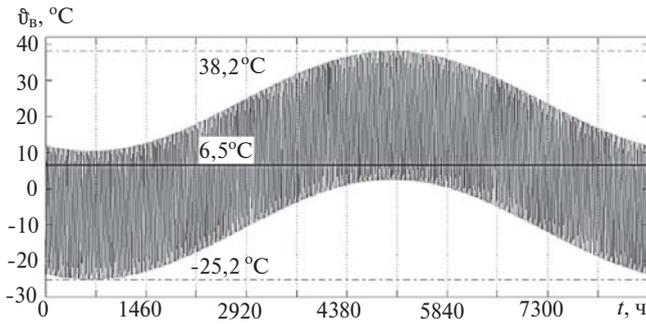


Рис. 4. Восстановленный с помощью синусоиды график годового изменения температуры воздуха $J_b(t)$ для г. Москвы

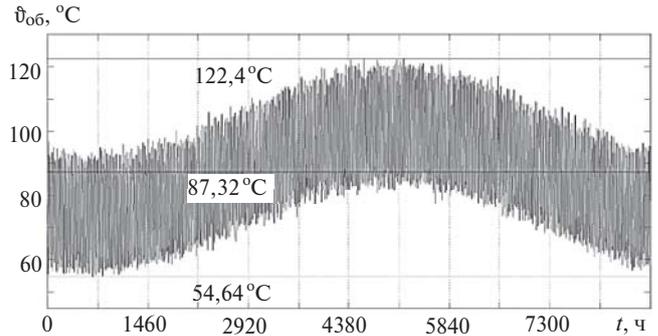


Рис. 5. Случайный процесс изменения температуры обмотки статора АД $J_{об}(t)$ в течение года

$$f(x) = \frac{1}{\sqrt{|C|}} \exp\left\{-\frac{1}{2} \sum_{i,j=1}^k c_{ij}^{-1} (x_i - m_i)(x_j - m_j)\right\} \quad (7)$$

где $|C|$ – определитель матрицы ковариаций; c_{ij}^{-1} – элемент матрицы, обратный дополнительному минору (i, j) матрицы ковариаций C ; m_k – математическое ожидание случайной величины x_k .

Случайный процесс изменения температуры $J_{об}$ обмотки статора АД представлен на рис. 5 при наличии в кривой напряжения высших гармонических составляющих 5, 7, 11 и 13-го порядков, а также напряжений обратной последовательности основной частоты. Вклад ПКЭ, влияющих на перегрев обмотки статора АД, в процентах суммарного превышения температуры, представлен в табл. 2 для различных значений коэффициента искажения синусоидальности и симметрии напряжений

$$K_{US} = \sqrt{K_{2U}^2 + \sum_{n=5}^{13} K_{U(n)}^2} \quad (8)$$

Таблица 2

Значение K_{US} , %	Вклад в перегрев $DQ_{ПКЭ}$, %, суммарного превышения				
	K_{2U}	$K_{U(5)}$	$K_{U(7)}$	$K_{U(11)}$	$K_{U(13)}$
2,90	95,74	3,04	1,17	0,04	0,01
3,36	84,80	10,99	4,04	0,12	0,05
4,76	58,39	29,91	11,23	0,34	0,14
8,29	38,29	44,25	16,75	0,50	0,20
15,90	26,24	52,93	19,98	0,60	0,24

Предположим, что в АД использована изоляция класса нагревостойкости А с температурным индексом $J_A = 105$ °С. Как следует из рис. 5 значение температуры J_A было превышено в течение 15,89% расчётного периода времени (8760 ч).

Следовательно, изоляция обмотки статора испытывала повышенный тепловой износ, который характеризуется относительным сроком службы [11]:

$$L = \frac{1}{T} \int_0^T \frac{N \hat{e}^{B J_{об}(t)}}{J_A} dt \quad (9)$$

где Dt_i – интервал времени, в течение которого фактическую температуру $J_{об}(t)$ можно принять неизменной; T – расчётный период времени (год); B – постоянный коэффициент, определяемый на основании результатов ускоренных испытаний на нагревостойкость образцов изоляционного материала по [12]; J_A – температурный индекс изоляции класса нагревостойкости А.

Применяя (9) к графику изменения температуры обмотки статора $J_{об}(t)$ (рис. 5), построим гистограмму и теоретическую плотность распределения $f(L)$ относительного срока службы изоляции обмотки статора АД при соблюдении условия $L < 1$ (рис. 6).

Математическое ожидание относительного срока службы изоляции за период превышения темпе-

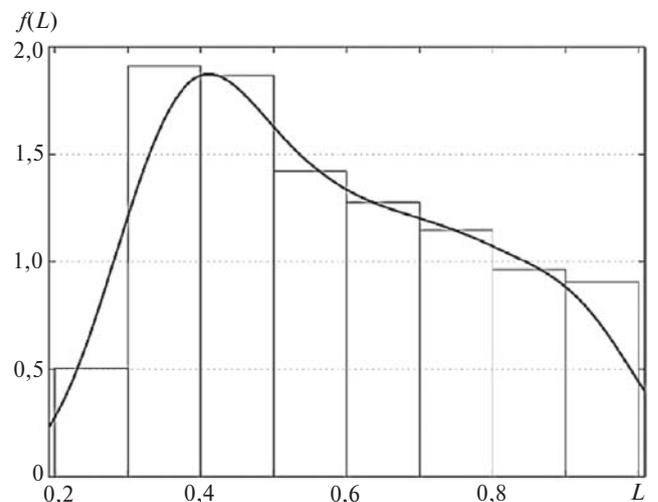


Рис. 6. Гистограмма и плотность теоретического распределения относительного срока службы изоляции L за рассматриваемый период времени T

ратурой обмотки статора значения температурного индекса изоляции $J_{об}(t) > J_A$ составляет $M(L) = 0,6$. Следовательно, за период превышения температурного индекса изоляции (т.е. 15,89% расчётного периода времени) было сработано в среднем 40% теплового ресурса.

Вероятность отказа изоляции за расчётный период времени T

$$q = K_T \int_{L_{min}}^{L_{max}} f(L) dL \quad (10)$$

где $K_T = 0,1589$ – относительное время превышения температурного индекса изоляции $J_A = 105^\circ\text{C}$ за расчётный период T .

Из рис. 6 следует, что пределы интегрирования составляют $L_{min} = 0,2$ до $L_{max} = 1$, тогда вероятность отказа изоляции АД за период T от дополнительного её перегрева токами ВГ и ОП равна

$$q = 0,1589 \int_{0,2}^1 f(L) dL = 0,1589(1 - 0,966) = 0,0054.$$

На рис. 7 построена зависимость вероятности отказа q от коэффициента искажения напряжения $K_{УС}$, значения которого приведены в табл. 2.

Таким образом, ухудшенное качество питающего напряжения приводит к сокращению срока службы АД и увеличению вероятности отказа его изоляции. Преждевременный выход из строя АД обуславливает нарушение технологического процесса, в котором участвует исполнительный механизм, увеличивает расходы на проведение ремонтно-восстановительных работ, приобретение запасных частей и материалов, а также снижение надёжности электроснабжения при его работе в

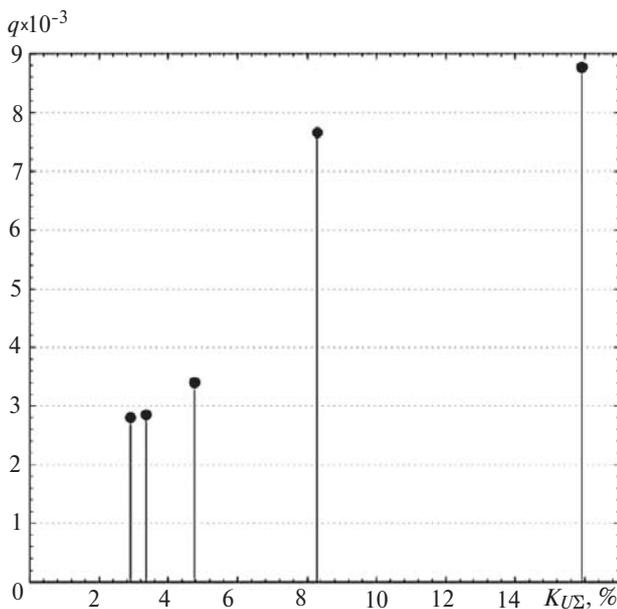


Рис. 7. Зависимость вероятности отказа от коэффициента искажения напряжения

системе с.н. крупных энергетических объектов. При высокой ответственности выполняемых асинхронным электроприводом функций в технологическом процессе предусматривается резервирование путём организации складского резерва или установки резервного двигателя с автоматическим вводом его в работу. Поэтому последствия от сокращения срока службы АД будут проявляться по-разному.

Вывод. Разработанная методика оценки влияния токов высших гармоник и токов обратной последовательности основной частоты на тепловой режим работы, срок службы изоляции и вероятность отказа АД с учётом годового изменения температуры окружающей среды позволила установить, что:

превышение температурного индекса изоляции класса нагревостойкости А $J_A = 105^\circ\text{C}$ наблюдается в течение 15,89% расчётного периода времени (год);

математическое ожидание относительного срока службы изоляции, имеющей класс нагревостойкости А, в период превышения температурного индекса равно $M(L) = 0,6$;

при увеличении процентного вклада в суммарный перегрев высших гармоник (табл. 2), образующих обратную последовательность чередования фаз, в кривой питающего напряжения $K_{У(5)}$ вероятность отказа q резко возрастает.

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. Гусаров Ан.А., Гусаров Ал.А., Ковалёв Е.Б. Анализ современных систем температурных защит асинхронных двигателей с короткозамкнутым ротором. — Наукові праці Донецького національного технічного університету, 2011, №10(180), с. 45—47.
2. Гольдберг О.Д., Хелемская С.П. Надёжность электрических машин. — М.: Издат. центр «Академия», 2010, 288 с.
3. ГОСТ 10518-88. Системы электрической изоляции. Общие требования к методам ускоренных испытаний на нагревостойкость. — М.: Госстандарт, 1987.
4. Ковчин С.А., Сабинин Ю.А. Теория электропривода. — СПб: Энергоатомиздат, 2000, 496 с.
5. Беспалов В.Я., Котеленец Н.Ф. Электрические машины. — М.: Издат. центр «Академия», 2006, 320 с.
6. Филлипов И.Ф. Теплообмен в электрических машинах. — Л.: Энергоатомиздат, 1986, 256 с.
7. Иванов-Смоленский А.В. Электрические машины. М.: Издат. дом МЭИ, 2006, т. 1, 652 с.
8. Проектирование электрических машин. 4-е изд., перераб. и доп./Под ред. И.П.Копылова. — М.: Изд-во Юрайт, 2011, 767 с.
9. Бородин А.И. Восстановление годового графика температуры атмосферного воздуха по нормативным данным. — Вестник Томского государственного архитектурно-строительного университета, 2012, №1, с. 133—140.
10. Валянский А.В., Каргашев И.И., Шаров Ю.В. Влияние качества электроэнергии на надёжность силового трансформатора. — Электротехника, 2014, №3, с. 20—27.
11. Вентцель Е.С., Овчаров Л.А. Теория вероятностей и её инженерные приложения. — М.: Высшая школа, 2000, 480 с.

12. Кузнецов Н.Л. Надёжность электрических машин. — М.: Издат. дом «МЭИ», 2006, 432 с.

[16.04.15]

Авторы: Валянский Андрей Владимирович в 2007 г. окончил Инженерно-технический институт Приднестровского государственного университета им. Т.Г. Шевченко. Научный сотрудник кафедры электроэнергетических систем Научно-исследовательского университета «Московский энергетический институт» (ЭЭС НИУ «МЭИ»).

Карташев Илья Ильич окончил в 1962 г. электроэнергетический факультет (ЭЭФ) Московского энергетического института (МЭИ). В 1975 г. защитил кандидатскую диссертацию «Разработка и применение статических источников реактивной мощности с тиристорным управлением». Ведущий научный сотрудник кафедры ЭЭС НИУ «МЭИ».

Шаров Юрий Владимирович окончил в 1986 г. ЭЭФ МЭИ. В 1993 г. защитил кандидатскую диссертацию «Разработка методов и средств оценки эффективности управления переходными режимами электроэнергетических систем при больших возмущениях». Заведующий кафедрой ЭЭС НИУ «МЭИ».

Elektrichestvo (Electricity), 2015, No. 6, pp. 24–29.

A Procedure for Estimating the Effect the Electric Power Quality has on the Squirrel-Cage Induction Motor Operational Reliability

A.V. VALYANSKII, I.I. KARTASHEV, Yu.V. SHAROV

The article analyzes the effect the waveform distortion and imbalance of the applied power supply voltage have on the growth of losses in an induction motor, which leads to an increase of stator winding temperature and, as a consequence, to more intense exhaustion of the motor service life. A procedure for estimating the influence of higher harmonic components of currents and the fundamental-frequency negative sequence currents on the thermal operating conditions and service life of a squirrel-cage induction motor is proposed. The scope of analysis covers the induction motors used in the composition of electric drives for the auxiliaries of large power facilities, the actuators of which support normal operation of the main equipment of power plants and substations.

Key words: electric power supply, electric powerquality, induction motor, thermal service life, reliability

REFERENCES

1. Gusarov An. A., Gusarov Al. A., Kovalev Ye. B. *Naukovi pratsi Donetskogo natsional'nogo tekhnichnogo universitetu* (Proc. of the Donetsk National technical University), 2011, No. 10(180), pp. 45–47.
2. Gol'dberg O.D., Khelemskaya S.P. *Nadezhnost' elektricheskikh mashin* (the reliability of electric machines). Moscow, Publ. Center «Akademiya», 2010, 288 p.
3. ГОСТ 10518–88. *Sistemy elektricheskoi izolyatsii. Obshchiye trebovaniya k metodam uskorennykh ispytaniy na nagrevostoikost'* (Systems of electrical insulation. General requirements for methods of accelerated tests for heat resistance). Moscow, Publ. Gosstandart, 1987.
4. Kovchin S.A., Sabinin Yu.A. *Teoriya electropriroda* (Theory of electric drive). St. Petersburg, Publ. Energoatomizdat, 2000, 496 p.
5. Bepalov V.Ya., Kotelenets N.F. *Elektricheskiye mashiny* (Electric machines). Moscow, Publ. Center «Akademiya», 2006, 320 p.
6. Fillipov I.F. *Teploobmen v elektricheskikh mashinakh* (Heat transfer in electrical machines). Leningrad, Publ. Energoatomizdat, 1986, 256 p.
7. Ivanov-Smolenskii A.V. *Elektricheskiye mashiny* (Electric machines). Moscow, Publ. House of the Moscow Power Engineering Institute, 2006, vol. 1, 653 p.
8. *Proektirovaniye elektricheskikh mashin*. 4-ye izdaniye/Pod redaktsiyey I. P. Kopylova (Design of electrical machines. 4th Edition / Edit. by I. P. Kopylov). Moscow, Publ. Yuright, 2011, 767 p.
9. Borodin A.I. *Vestnik Tomskogo gosudarstvennogo arkhitekturno-stroitel'nogo universiteta* (Bulletin of the Tomsk State University of Architecture and Construction), 2012, No. 3, pp. 133–140.
10. Valyanskii A.V., Kartashev I.I., Sharov Yu.V. *Elektrotehnika (Electrical engineering)*, 2014, No. 3, pp. 20–27.
11. Venttsel' Ye.S., Ovcharov L.A. *Teoriya veroyatnostyey i yeye inzhernyye prilozheniya* (Probability theory and its engineering applications). Moscow, Publ. Vysshaya shkola, 2000, 480 p.
12. Kuznetsov N.L. *Nadezhnost' elektricheskikh mashin* (The reliability of electrical machines). Moscow, Publ. House of the Moscow Power Engineering Institute, 2006, 432 p.

Authors: Valyanskii Andrei Vladimirovich (Moscow, Russia) – Scientific Researcher of the Department at the Scientific and Research University (SRU) «Moscow Power Engineering Institute» (MPEI).

Kartashev Ilya Ilich (Moscow, Russia) – Cand. Sci. (Eng.), Leading Scientific Researcher of the Department at the SRU «MPEI».

Sharov Yuri Vladimirovich (Moscow, Russia) – Cand. Sci. (Eng.), Head of the Department at the SRU «MPEI».

