

УДК 621.313.333

В. Е. КРИВОНОСОВ (канд. техн. наук), **С. В. ВАСИЛЕНКО**
Приазовский государственный технический университет
jackkarter@rambler.ru

УПРАВЛЕНИЕ СРОКОМ СЛУЖБЫ ИЗОЛЯЦИИ ПО СКОРОСТНЫМ ХАРАКТЕРИСТИКАМ НАГРЕВА ОБМОТОК

В работе проведено моделирование режимов работы асинхронного двигателя при пониженном качестве электроэнергии (учет отклонений и несимметрии напряжений и токов) и повышенной температуре окружающей среды при регулируемом моменте на валу двигателя.

Срок службы изоляции, асинхронный двигатель, несимметрия напряжений, температура окружающей среды.

В металлургическом производстве асинхронные двигатели (АД) в ряде случаев работают с постоянным моментом на валу при качестве сети, выходящего за пределы регламентируемые ГОСТ 13109-97, при отклонениях напряжений в пределах $\Delta U = \pm 10 \div 15\%$ и несимметрии напряжений $k_{2U} = 5 \div 10\%$. На прокатных станах в весенне-осенний период наблюдается повышение температуры окружающего воздуха до $50 \div 60^\circ\text{C}$. В таких условиях срок службы изоляции снижается в 1,5–3 раза. Увеличение времени эксплуатации АД является актуальной задачей.

В установившемся режиме срок службы изоляции определяется по выражению

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

где D_H – номинальный срок службы изоляции, $\Theta_{уст}$ – установившееся превышение температуры обмоток АД

над температурой окружающего воздуха, Θ – текущее значение температуры обмоток, $\Delta\Theta = \frac{\Theta \cdot \Theta_{уст} \cdot R}{E_a}$ –

принимается равным 11,5 для класса изоляции А, E_a – энергия активации, $R = 8,317$ Дж/(моль·град) – универсальная газовая постоянная.

Повышение температуры обмоток АД определяется дополнительными потерями в элементах конструкции двигателя, возникающими при технологических перегрузках, появлении несимметрии и отклонений напряжений питающей сети, а также повышении температуры окружающего воздуха.

В результате многочисленных исследований для изоляции класса А было сформулировано восьмиградусное правило (правило Монтзигера). Повышение температуры обмоток АД на каждые 8°C выше допустимой снижает срок службы изоляции вдвое.

В [1] дополнительные потери мощности, обусловленные несимметрией напряжения, определяются из эмпирического выражения

$$\Delta P_{k_{2U}} = 2.41 \cdot k_n^2 \cdot k_{2U}^2 \cdot \Delta P_{ном}, \quad (2)$$

где $\Delta P_{ном}$ – потери в обмотке статора при номинальном токе и напряжении ($U_1 = U_{ном}$), k_n – кратность пускового тока двигателя, k_{2U} – коэффициент несимметрии по обратной последовательности.

В работах [2], [3], [4], [5] рассматриваются различные тепловые модели АД, работающие с вентиляторной нагрузкой, в которых дополнительные потери от несимметрии, отклонений и несинусоидальности напряжений просто суммируются. В описанных выше методах не затронуты вопросы влияния температуры окружающего воздуха на нагрев обмоток АД, различного распределения токов в фазах, при регулируемой нагрузке, что позволяет управлять сроком службы изоляции АД.

Для управления сроком службы изоляции нужен учета дополнительных потерь, вызванных особенностями работы АД в сетях с низкими показателями качества электроэнергии.

В АД, работающих с регулируемым моментом на валу, представляет интерес исследование процессов распределения температуры изоляции обмоток при различном распределении токов в фазах. Зная закон изменения скоростных характеристик нагрева обмоток АД можно не только определить остаточный ресурс изоляции, но и управлять сроком службы изоляции обмоток АД.

Цель работы определение скоростных зависимостей температуры изоляции АД в условиях регулируемого момента на валу двигателя, несимметрии и отклонения напряжения питающей сети и изменяющейся температуре окружающего воздуха; получение предельных значений скорости изменения температуры АД для управления сроком службы изоляции.

Исследования проведены на АД типа 4AA71B6Y3 мощностью 0,55 кВт. Двигатель работает в продолжительном режиме с постоянным моментом на валу. Модель установки описана в [6].

Математические модели описывают тепловые потери в АД с погрешностью 5–10 %. Для получения достоверных тепловых зависимостей работающих АД от коэффициента несимметрии и температуры окружающего воздуха целесообразно проводить экспериментальные исследования.

Для учета влияния температуры окружающего воздуха на перегрев АД при отсутствии несимметрии и отклонения напряжения проведено экспериментальное исследование. Результаты приведены на рис. 1.

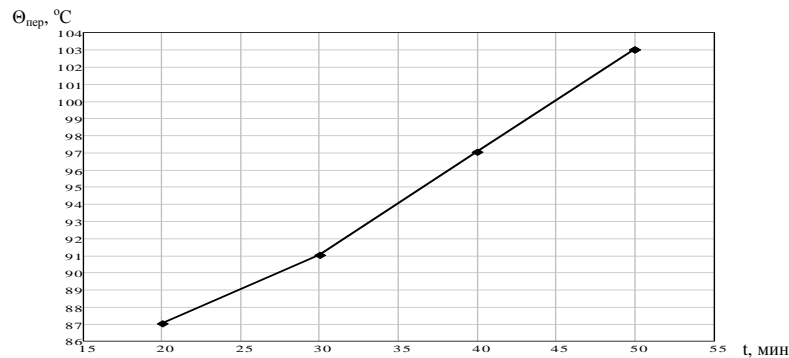


Рисунок 1 График зависимости $\Theta_{обм} = f(t_{o.c.})$

При температуре окружающего воздуха $t_{o.c.}=20^{\circ}\text{C}$ АД работает с установившейся температурой изоляции обмоток, при увеличении $t_{o.c.}$ до 30°C температура обмоток двигателя возросла на 4°C , при увеличении $t_{o.c.}$ до 40°C температура двигателя возросла на 10°C , а при $t_{o.c.}=50^{\circ}\text{C}$ увеличилась на 16°C .

На рис. 2–4 представлены графики нагрева АД при изменении коэффициента несимметрии питающего напряжения (от 0 % до 4 %) и температуры окружающего воздуха (от 20°C до 40°C), для различных распределений токов по фазам двигателя:

1. $I_{аном} < I_b$ и I_c
2. $I_a < I_{сном} < I_b$
3. $I_{вном} > I_a$ и I_c

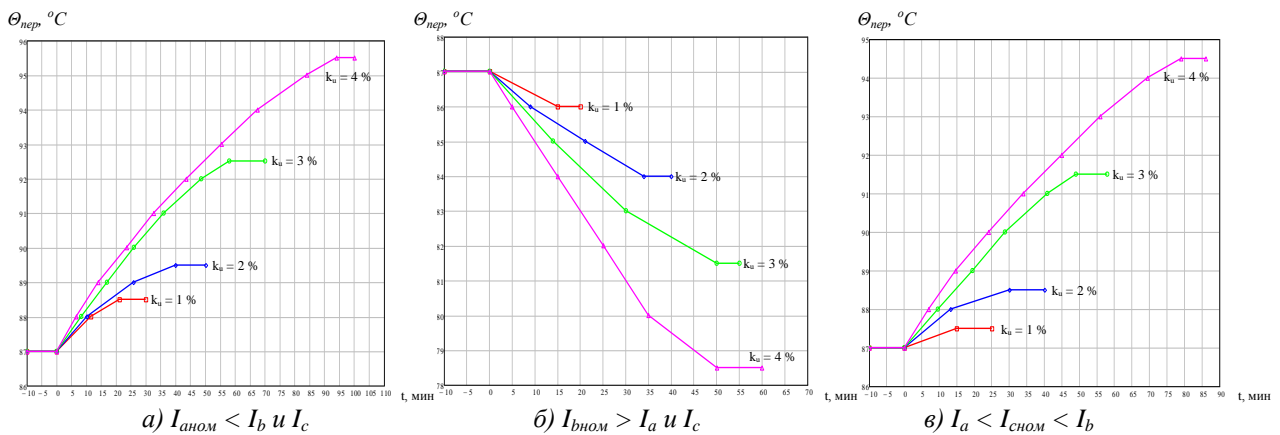


Рисунок 2 Графики нагрева АД при $t_{o.c.} = 20^{\circ}\text{C}$ и $k_{2U} = 1, 2, 3, 4\%$

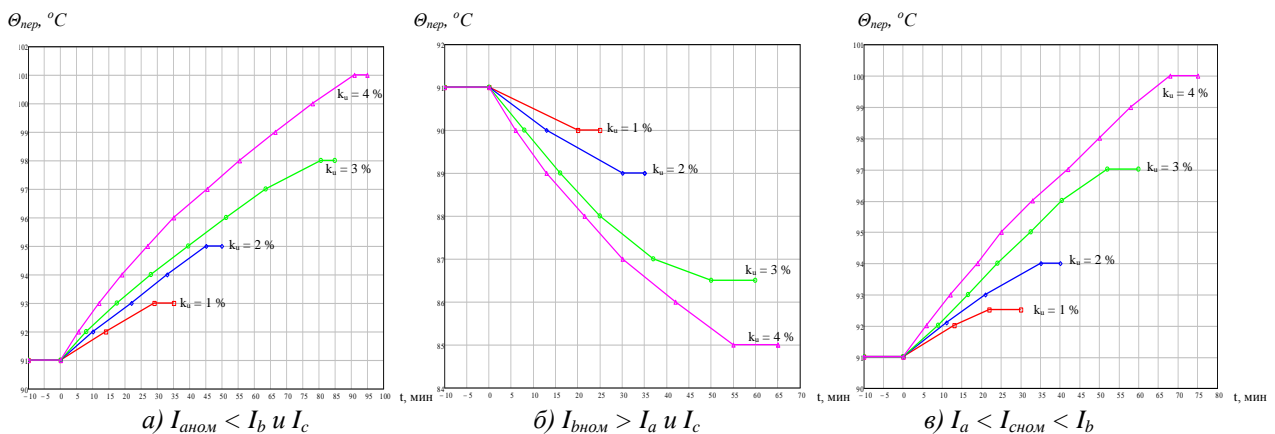


Рисунок 3 Графики нагрева АД при $t_{o.c.} = 30^{\circ}\text{C}$ и $k_{2U} = 1, 2, 3, 4\%$

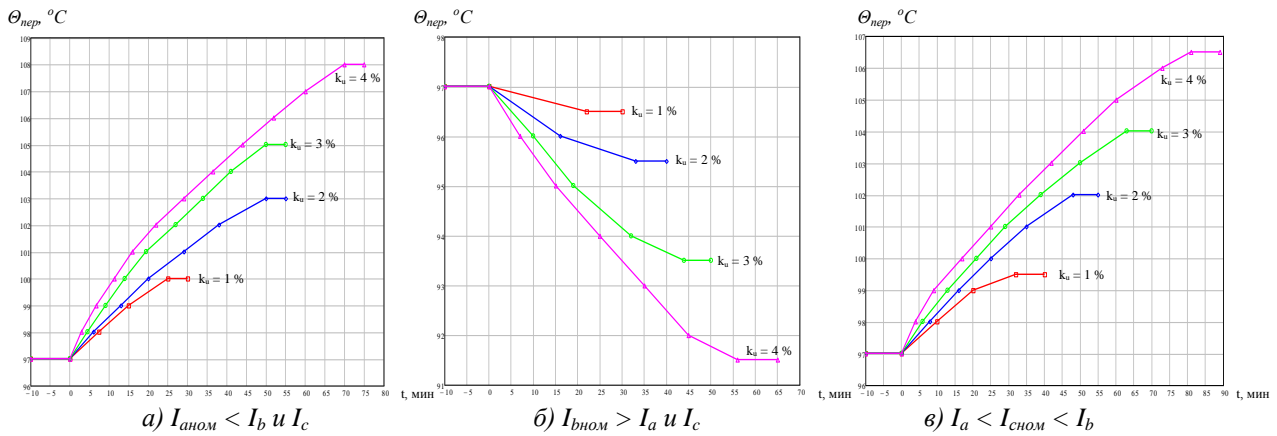


Рисунок 4 Графики нагрева АД при $t_{o.c.} = 40^{\circ}\text{C}$ и $k_{2U} = 1, 2, 3, 4\%$

Из графиков, приведенных на рис. 2–4 видно, при одном и том же значении коэффициента несимметрии нагрев двигателей происходит по-разному. Рассмотрены два крайних случая: максимальный, когда температура обмоток достигает наибольшего значения в режиме $I_{аном} < I_b$ и I_c (на рис. 1–3 графики а)), минимальный, когда температура снижается в режиме $I_{бном} > I_a$ и I_c (на рис. 1–3 графики б)); и промежуточный когда температура немного меньше максимальной (на рис. 1–3 графики в)). Например, при коэффициенте несимметрии $k_{2U} = 4\%$ для режима, когда $I_{аном} < I_b$ и I_c превышение температуры обмоток АД над установившейся при $t_{o.c.} = 20^{\circ}\text{C}$ составило $8,5^{\circ}\text{C}$, при $t_{o.c.} = 30^{\circ}\text{C}$ составило 10°C , а при $t_{o.c.} = 40^{\circ}\text{C}$ составило 11°C ; для режима $I_{бном} > I_a$ и I_c снижение температуры обмоток АД ниже установившейся при $t_{o.c.} = 20^{\circ}\text{C}$ составило $7,5^{\circ}\text{C}$, при $t_{o.c.} = 30^{\circ}\text{C}$ составило 6°C , а при $t_{o.c.} = 40^{\circ}\text{C}$ составило 5°C ; а при $I_a < I_{сном} < I_b$ температура возросла при $t_{o.c.} = 20^{\circ}\text{C}$ на $7,5^{\circ}\text{C}$, при $t_{o.c.} = 30^{\circ}\text{C}$ на 9°C , при $t_{o.c.} = 40^{\circ}\text{C}$ на $9,5^{\circ}\text{C}$.

На рис. 5 представлены зависимости температуры перегрева двигателя от коэффициента несимметрии при различных $t_{o.c.}$.

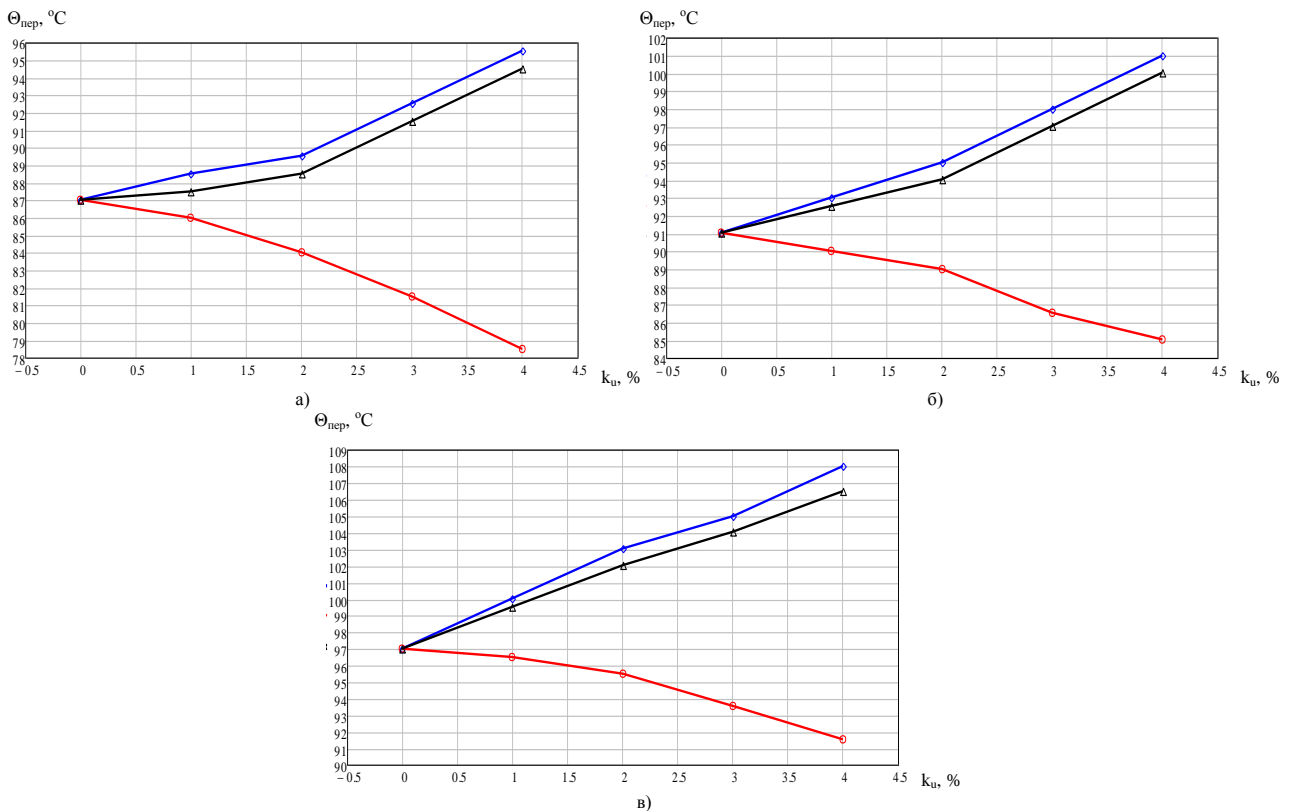


Рисунок 5 График зависимости $\Theta_{пер} = f(k_{2U})$ при а) $t_{o.c.} = 20^{\circ}\text{C}$, б) $t_{o.c.} = 30^{\circ}\text{C}$, в) $t_{o.c.} = 40^{\circ}\text{C}$ где
— $I_{аном} < I_b$ и I_c — $I_a < I_{сном} < I_b$ — $I_{бном} > I_a$ и I_c

На рис. 5 установившаяся температура перегрева АД практически линейно зависит от коэффициента несимметрии напряжения. Для подтверждения данной зависимости определим эмпирический коэффициент корреляции определяется формулой [7]

$$r = \frac{1}{s_{k_{2U}} s_{\Theta_{nep}}} \cdot \frac{1}{n-1} \cdot \sum_{i=1}^n (k_{2U} - k_{2U(cp)}) (\Theta_{nepi} - \Theta_{nep(cp)}), \tag{3}$$

где $s_{k_{2U}}, s_{\Theta_{nep}}$ – эмпирические дисперсии; $k_{2U(cp)}, \Theta_{nep(cp)}$ – соответственно средние значения коэффициента несимметрии напряжения и температуры перегрева изоляции обмоток АД.

Расчеты приведенных выше коэффициентов корреляции представлены в таблице 1.

Таблица 1 – Коэффициенты корреляции между $\Theta_{nep} = f(k_{2U})$

	t _{о.с.} = 20 °С			t _{о.с.} = 30 °С			t _{о.с.} = 40 °С		
	$I_{аном} < I_b u I_c$	$I_a < I_{еном} < I_b$	$I_{аном} > I_a u I_c$	$I_{аном} < I_b u I_c$	$I_a < I_{еном} < I_b$	$I_{аном} > I_a u I_c$	$I_{аном} < I_b u I_c$	$I_a < I_{еном} < I_b$	$I_{аном} > I_a u I_c$
$r(\Theta_{nep}(k_{2U}))$	0,977	0,952	-0,984	0,994	0,985	-0,984	0,998	0,999	-0,971

Графики на рис. 2–4 с большой точностью (погрешность расчета не превышает 0,5 %) аппроксимируются квадратичной функцией вида:

$$\Theta_{nep} = a_1 \cdot u^2 + b_1 \cdot u + c_1, \tag{4}$$

где a_1, b_1, c_1 – параметры функции, $u = \frac{t-t_{cp}}{h}$ – функция времени, t – время, мин, t_{cp} – среднее время на интервале от 0 до значения когда температура перегрева достигнет нового установившегося значения, h – шаг.

В уравнении (4) коэффициент c_1 характеризует зависимость температуры перегрева изоляции обмоток АД от температуры окружающего воздуха и коэффициента несимметрии, показывая их тесную взаимосвязь.

Уравнение (1) можно записать в следующем виде

$$D = D_H e^{-\left(\frac{\Theta_{k_{2U}} + \Theta_{t_{о.с.}} - \Theta_{уст}}{\Delta\Theta}\right)}, \tag{5}$$

где $\Theta_{k_{2U}}$ – температура перегрева изоляции обмоток АД, обусловленная наличием несимметрии напряжений в питающей сети, $\Theta_{t_{о.с.}}$ – температура перегрева изоляции обмоток АД, обусловленная превышением температуры окружающего воздуха над заданной, которая регламентируется условиями работы АД.

Скорость нарастания температуры обмоток на каждом интервале измерений определяется взятием производной от сложной функции. Если $\Theta_{nep} = f(u)$, а $u = f(t)$, то производная температуры по времени

$(\Theta_{nep})'_t$ запишется выражением

$$\frac{d\Theta_{nep}}{dt} = \frac{d\Theta_{nep}}{du} \frac{du}{dt}, \tag{6}$$

$$\frac{d\Theta_{nep}}{dt} = \frac{d(a_1 u^2 + b_1 u + c_1)}{du} \frac{d\left(\frac{t-t_{cp}}{h}\right)}{dt}, \tag{7}$$

где $\frac{d\Theta_{nep}}{dt}$ – скорость нарастания температуры обмотки АД.

Для простоты расчетов выражение (8) преобразуется к виду

$$v_{\Theta_{nep}} = \Theta'_{nep} = (2a_1 u + b_1) \cdot \frac{1}{h}. \tag{8}$$

Для своевременного получения исходящих данных интервалы времени опроса системы контроля и прогнозирования должны меняться в зависимости от скорости протекания процесса нагрева изоляции обмоток АД и скорости изменения показателей качества электроэнергии.

Интенсивность протекания процесса нагрева обмоток (зависит от величины k_{2U} , $t_{o.c.}$ и распределения токов в фазах АД) определяет дискретность между измерениями, которая определяется следующим образом

$$\tau_{i+1} = \frac{2\delta(t_{\max})}{\Delta t} \tau_i, \quad (9)$$

где δ – доверительный интервал, t_{\max} – предельная температура изоляции обмоток АД, Δt – приращение температуры изоляции на предыдущем интервале, τ_i – начальный интервал измерений.

Скорости нарастания температуры АД при появлении возмущающего воздействия на первом интервале измерений показаны в таблице 2.

Таблица 2 – Скорость нарастания температуры обмоток $v_{\theta_{\text{неп}}}$ [°C/мин] при различных значениях коэффициента несимметрии (k_{2U}), температуры окружающего воздуха ($t_{o.c.}$) и различного распределения токов в фазах АД

k_{2U}	$I_{\text{аном}} < I_b \text{ и } I_c$	$I_a < I_{\text{сном}} < I_b$	$I_{\text{бном}} > I_a \text{ и } I_c$
$t_{o.c.} = 20 \text{ }^\circ\text{C}$			
0	0	0	0
1	0,075	0,026	-0,052
2	0,083	0,071	-0,103
3	0,122	0,118	-0,144
4	0,137	0,125	-0,230
$t_{o.c.} = 30 \text{ }^\circ\text{C}$			
0	0	0	0
1	0,086	0,069	-0,045
2	0,103	0,090	-0,075
3	0,137	0,131	-0,130
4	0,159	0,154	-0,143
$t_{o.c.} = 40 \text{ }^\circ\text{C}$			
0	0	0	0
1	0,128	0,098	-0,029
2	0,148	0,125	-0,057
3	0,199	0,147	-0,108
4	0,210	0,185	-0,129

Анализ скорости нарастания температуры обмоток АД при возникновении несимметричных режимов работы представляет практический интерес для возможности прогнозировать скорость старения изоляции.

Выводы. 1. Коэффициент корреляции показывает практически пропорциональную зависимость установившейся температуры перегрева изоляции АД при различных $t_{o.c.}$ от k_{2U} .

2. При установившемся режиме работы ($\theta_{\text{дв}} = \theta_{\text{уст}}$) с ростом температуры окружающей среды $t_{o.c.}$ от 20 °C до 50 °C с интервалом 10 °C температура обмоток АД увеличивалась на 4 °C (при 30 °C), 10 °C (при 40 °C) и на 16 °C (при 50 °C).

3. Интервал дискретности зависит от интенсивности протекания процесса нагрева изоляции обмоток АД при возникновении возмущающих воздействий.

4. Получены следующие зависимости: 1) если при $t_{o.c.} = 20 \text{ }^\circ\text{C}$ скорость нарастания температуры не превышает 0,125 °C/мин, то двигатель может работать длительно, даже при несимметрии 4 %; 2) если при $t_{o.c.} = 20 \text{ }^\circ\text{C}$ $v_{\theta_{\text{неп}}} > 0,125 \text{ }^\circ\text{C/мин}$, необходимо принимать меры по её снижению, уменьшением коэффициента несимметрии, либо снижением момента на 0,5–1,5 %, что переведет АД на кривые соответствующие условиям $I_a < I_{\text{сном}} < I_b$ или $I_{\text{бном}} > I_a$ и I_c ; 3) если при $t_{o.c.} = 30 \text{ }^\circ\text{C}$ $v_{\theta_{\text{неп}}}$ не превышает 0,103 °C/мин, двигатель может работать длительно при $k_{2U} \leq 2 \text{ } \%$, при условиях $I_{\text{аном}} < I_b$ и I_c и $I_a < I_{\text{сном}} < I_b$ и при любом значении k_{2U} когда $I_{\text{бном}} > I_a$ и I_c ; 4) если при $t_{o.c.} = 30 \text{ }^\circ\text{C}$ $v_{\theta_{\text{неп}}}$ превышает 0,103 °C/мин, необходимо снижать момент на 0,5–3 %, или выравнять несимметрию в сети; 5) при $t_{o.c.} = 40 \text{ }^\circ\text{C}$ при любых k_{2U} двигатель должен работать при условии $I_{\text{бном}} > I_a$ и I_c , при этом момент снижается на 1–5 % от номинального.

ЛИТЕРАТУРА

1. Жежеленко И.В. Показатели качества электроэнергии и их контроль на промышленных предприятиях / Жежеленко И.В., Саенко Ю.Л. – [3-е изд., перераб. и доп.] – М.: Энергоатомиздат, 2000. – 252 с.
2. Сыромятников И.А. Режимы работы асинхронных и синхронных двигателей / Сыромятников И.А.; под ред. М.Л. Мамиконянца. – М.: Энергоатомиздат, 1984. – 240 с.
3. Пинчук О.Г. Оценка токов и температур асинхронных двигателей мощностью до 400 кВт при различных характеристиках несимметрии сети: методические подходы / Пинчук О.Г. // Вестник национального технического университета "ХПИ": сб. науч. тр.: темат. вып. – Х.: НТУ "ХПИ", 2008. – Вып. 7: Проблемы совершенствования электрических машин и аппаратов. – С. 89-98.
4. Жежеленко И.В. Влияние качества электроэнергии на надёжность асинхронных двигателей / Жежеленко И.В., Саенко Ю.Л., Горпинич А.В. // Промислова електроенергетика та електротехніка (Промелектро). – 2004. – № 1. – С. 15-21.
5. Закладний О.О. Оцінка залишкового ресурсу асинхронного електропривода / Закладний О.О. // Вісник Національного технічного університету України «Київський політехнічний інститут». Серія «Гірництво»: Збірник наукових праць. – Київ: НТУУ «КПІ», ЗАТ «Техновібух», 2010. – Вип. 19. – С. 137-146.
6. Кривонос В.Е. Моделирование тепловых режимов работы асинхронных двигателей / Кривонос В.Е., Василенко С.В. // 36. науч. пр. VI Міжнар. наук. конф. “Ефективність і якість електропостачання промислових підприємств”. – Маріуполь, 2008. – С. 311-314.
7. Румшидский Л.З. Математическая обработка результатов эксперимента / Румшидский Л.З. – М.: Наука, 1971. – 192 с.
8. Вольдек А.И. Электрические машины: учебник / Вольдек А.И. – Л.: Энергия, 1974. – 840 с.
9. Копылов И.П. Электрические машины: учебник / Копылов И.П. – М.: Высшая школа, 2000. – 607 с.
10. Копылов И.П. Математическое моделирование электрических машин / Копылов И.П. – М.: Высшая школа, 1994. – 318 с.

Надійшла до редколегії 01.04.2011

Рецензент: М.В.Гребченко

В. Є. КРИВОНОСОВ, С. В. ВАСИЛЕНКО
Приазовський державний технічний університет

V. KRIVONOSOV, S. VASILENKO
Pryazovskyi State Technical University

Управління терміном служби ізоляції за швидкісними характеристиками нагріву обмоток. У роботі проведено моделювання режимів роботи асинхронного двигуна при зниженій якості електроенергії (облік відхилень і несиметрії напруги і струмів) і підвищеній температурі довкілля при регульованому моменті на валу двигуна.
Термін служби ізоляції, асинхронний двигун, несиметрія напруг, температура навколишнього середовища.

Insulation Life Control Using High-Speed Characteristics of Coils Heating. We performed a simulation modes of the induction motor at reduced power quality (taking into account variations and unbalance of voltages and currents) and high ambient temperature at a controlled moment on the motor shaft.
Insulation life, induction motors, unbalance voltages, ambient temperature.