

УДК 621.313

УЧЕТ КОЛЕБАНИЙ ТЕМПЕРАТУРЫ ОБМОТКИ СТАТОРА АСИНХРОННОГО ДВИГАТЕЛЯ ПРИ ПРОВЕРКЕ ПО НАГРЕВАНИЮ В ПОВТОРНО-КРАТКОВРЕМЕННОМ РЕЖИМЕ

Зюев Анатолий Михайлович,

д-р техн. наук, профессор каф. электропривода и автоматизации промышленных установок Уральского федерального университета им. первого Президента России Б.Н. Ельцина, Россия, 620002, г. Екатеринбург, ул. Мира, 19. E-mail: a.m.zyuzev@urfu.ru

Метельков Владимир Павлович,

канд. техн. наук, доцент каф. электропривода и автоматизации промышленных установок Уральского федерального университета им. первого Президента России Б.Н. Ельцина, Россия, 620002, г. Екатеринбург, ул. Мира, 19. E-mail: v.p.metelkov@urfu.ru

Актуальность работы обусловлена необходимостью снижения аварийности асинхронных электродвигателей, увеличения срока службы и эффективности их использования за счет повышения точности оценки теплового состояния на этапе конструирования электропривода и в период эксплуатации.

Цель работы: определение границ применимости метода средних потерь для оценки теплового состояния асинхронных двигателей в повторно-кратковременном режиме и уточнение этого метода с учетом нелинейной связи скорости старения изоляции с температурой, а также соотношения параметров цикла и постоянных времени нагрева двигателя.

Методы исследования: аналитические методы и вычислительный эксперимент, основанный на пятимассовой термодинамической модели асинхронного двигателя закрытого исполнения.

Результаты. Установлено, что существуют такие комбинации параметров цикла в повторно-кратковременном режиме, при которых оценка теплового состояния асинхронного двигателя методом средних потерь является некорректной. Так, при малой продолжительности включения средняя скорость термического старения изоляции обмотки статора за время цикла может существенно превосходить то ее значение, которое получается путем расчета по средней за цикл температуре. Выполнена оценка необходимости учета влияния колебаний температуры обмотки при проверке двигателя по нагреву в зависимости от размера двигателя. Предложен уточненный способ оценки теплового состояния асинхронного двигателя методом средних потерь путем введения поправочного коэффициента, учитывающего нелинейность зависимости скорости старения изоляции от температуры обмотки статора. Получены формулы для расчета этого коэффициента. Показано, что в пределах формальных границ повторно-кратковременного режима (10 мин) расхождение между результатами, полученными аналитически и с помощью пятимассовой термодинамической модели асинхронного двигателя, использованной в ходе вычислительного эксперимента, весьма невелико и не превышает 6...8 %.

Ключевые слова:

Асинхронный двигатель, метод средних потерь, термическое старение изоляции, обмотка статора, повторно-кратковременный режим.

Постановка задачи

Асинхронные двигатели (АД) являются наиболее распространенным типом электродвигателей в различных отраслях экономики. По данным ООО «Новатек-Электро» в России работает не менее 50 млн трехфазных АД напряжением 0,4 кВ [1]. При этом ежегодно выходят из строя от 10–12 [2] до 20–25 % установленных АД [3–6]. Например, в сельском хозяйстве средний ресурс электродвигателей переменного тока меньше расчетного в 2,5–3,5 раза [7]. Значительная доля выходов АД из строя связана с обмоткой статора [8]. В различных источниках приводятся разные цифры, характеризующие эту долю, доходящие до 68 % для крановых приводов в [9] и даже 80 % для электроприводов в сельскохозяйственной отрасли [10]. Большую роль в статистике отказов АД играют эксплуатационные причины, приводящие к перегреву обмоток [11].

Большинство выпускаемых в настоящее время асинхронных двигателей – это двигатели с корот-

козамкнутым ротором. У них роторная обмотка не изолирована, вследствие чего она является не самым критичным к нагреву элементом конструкции двигателя, в то время как надежность и долговечность изоляции статорной обмотки зависит от теплового режима при эксплуатации. Эти обстоятельства приводят к выводу о важности получения правильной оценки теплового состояния обмотки статора АД, в том числе на этапе проектирования электропривода, чтобы исключить в дальнейшем эксплуатационные перегрузки двигателя, ведущие к ускоренному исчерпанию ресурса изоляции обмоток и преждевременному выходу из строя.

Попутно отметим, что существует и другая сторона проблемы адекватного выбора двигателей для производственных механизмов. На большинстве работающих промышленных установок мощность электродвигателей завышена на 20–40 %, что говорит о возможности сокращения как затрат на создание электропривода, так и потребления электроэнергии в ходе эксплуатации за счет более ра-

ционального выбора установленной мощности двигателей [12].

Большое количество электроприводов в различных отраслях промышленности функционирует в повторно-кратковременных режимах (ПКР), для которых свойственны периодические изменения величины нагрузки либо чередование периодов работы и паузы. В ПКР температура элементов электродвигателя может существенно изменяться в пределах цикла, что создает проблемы при проверке его теплового состояния. Эти проблемы осложняются тем, что неравномерность графиков температуры зависит от соотношения постоянных времени нагрева двигателя и параметров графика его нагружения.

Точную оценку теплового состояния любого элемента электродвигателя можно получить численными методами с использованием термодинамических моделей электродвигателя [13, 14]. Однако для построения таких моделей требуется достаточный большой объем информации о конструктивных параметрах двигателя, который далеко не всегда доступен при проектировании электропривода. Поэтому представляет интерес рассмотрение косвенных методов оценки теплового состояния двигателя, требующих меньшего объема исходной информации.

Широко распространен классический метод на основе средних потерь, который считается наиболее точным из косвенных методов. Вывод соотношений для метода средних потерь предполагает следующие допущения:

- используется одномассовая модель нагрева, которая позволяет получить максимально простые аналитические зависимости между мощностью потерь и температурой двигателя, так как в этом случае на каждом участке нагрузочной диаграммы процесс изменения температуры двигателя описывается экспоненциальной зависимостью с единственной постоянной времени. Вместе с тем неадекватность этой модели неоднократно отмечалась в литературе [15];
- принимается линейная зависимость скорости старения изоляции (скорость расходования термического ресурса) от температуры, т. е. только в этом случае среднее значение температуры будет определять среднюю скорость старения изоляции.

Рассмотрим обоснованность этих допущений и найдем границы их применимости, которые и определяют границы применимости метода средних потерь.

В литературе, в частности в [16, 17], проведен анализ теплового состояния электродвигателя при циклическом характере его нагружения и установлена связь между частотными параметрами графика нагрузки и максимумами температуры двигателя. Однако этот анализ был выполнен для одномассовой модели нагрева двигателя, то есть для его усредненной температуры. В то же время электродвигатель является существенно неоднород-

ным телом с термодинамической точки зрения, и температуры его отдельных элементов значительно отличаются друг от друга. Поэтому при оценке теплового состояния электродвигателя наибольший интерес представляет тепловое состояние его элементов, наиболее критичных с точки зрения нагрева. Кроме того, существенно отличается динамика температуры разных элементов электродвигателя при переменных режимах его нагружения. Например, динамика температуры обмотки статора существенно выше динамики средней температуры двигателя из-за сравнительно малой теплоемкости меди статора по сравнению с теплоемкостью двигателя в целом, в то время как потери, выделяющиеся в этой обмотке, составляют значительную долю от суммарных потерь в двигателе. Поэтому в переменных режимах нагружения амплитуда колебаний температуры обмотки статора АД может на порядок превосходить амплитуду усредненной по всему двигателю температуры. Это создает возможности выхода отклонений температуры обмотки статора от средней далеко за пределы, при которых еще корректна оценка средней скорости старения изоляции по средней температуре.

Можно показать, что для нелинейной зависимости, связывающей скорость термического старения изоляции с температурой, при колебаниях температуры обмотки средняя скорость старения изоляции (v_{cp}) всегда больше той, которая была бы при неизменной температуре, равной средней (θ_{cp}) [18]. Однако метод средних потерь этот факт никак не учитывает.

Для оценки скорости старения изоляции (v) будем пользоваться формулой Буссинга, полученной исходя из законов кинетики химических реакций [19, 20]:

$$v = k^{-1} \cdot \exp\left(-\frac{B}{\theta + \theta_A} + G\right), \quad (1)$$

где θ – температура обмотки; $\theta_A = 273^\circ\text{C}$; B и G – постоянные коэффициенты, величина которых зависит от класса нагревостойкости изоляции; $k=1$, если срок службы изоляции измеряется в часах.

В работе ставятся следующие задачи:

1. Определение границ применимости метода средних потерь для оценки теплового состояния АД в повторно-кратковременном режиме.
2. Получение уточненных выражений для метода средних потерь, учитывающих:
 - нелинейность зависимости скорости старения изоляции от температуры;
 - соотношение параметров цикла и постоянных нагрева двигателя.

Объект и методы исследования

В общем случае для выяснения возможности использования средней температуры изоляции на интервале t_n с целью оценки среднего значения скорости старения изоляции на этом же интервале надо сравнивать усредненную по всему интервалу ско-

рость старения изоляции v_{cp} и скорость старения при усредненном значении температуры $v(\theta_{cp})$, где

$$v_{cp} = \frac{1}{t_{ц}} \int_0^{t_{ц}} v(t) dt, \quad \theta_{cp} = \frac{1}{t_{ц}} \int_0^{t_{ц}} \theta(t) dt. \quad (2)$$

На практике функции $v(t)$ и $\theta(t)$ зависят от вида конкретного графика нагружения электропривода, скорости двигателя и других факторов, учет которых аналитически выполнить весьма сложно. Соответственно, для применения оценок, использующих (2), требуются численные методы расчета термодинамических процессов при конкретных условиях функционирования электропривода. С целью оценки ошибки, которую вносят допущения, принимаемые при выводе соотношений метода средних потерь, рассмотрим работу АД в простейшем цикле повторно-кратковременного режима, включающем период работы (t_p) и паузу (рис. 1).

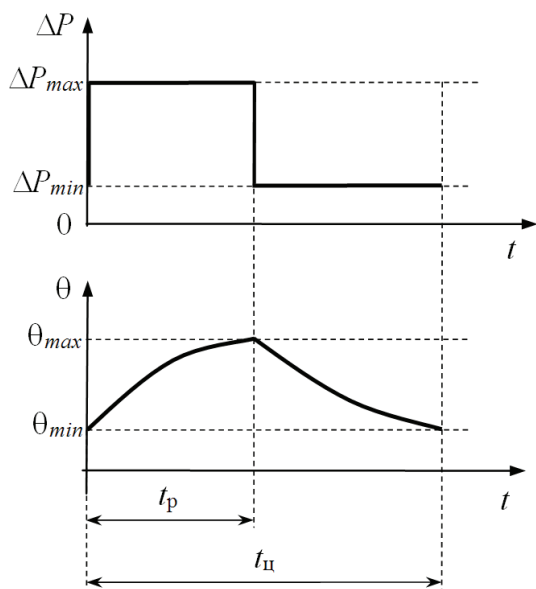


Рис. 1. Простейший цикл ПКР

Fig. 1. Simple cycle of intermittent mode

Будем использовать двухмассовую термодинамическую модель асинхронного двигателя, включающую в качестве своих узлов обмотку статора и остальную часть машины [21]. Такая модель позволяет достаточно точно описать динамику температуры обмотки статора, требуя сравнительно небольшого объема данных о двигателе для определения своих параметров [18].

Решение задачи 1

На рис. 2 показана зависимость отношения $v_{cp}/v(\theta_{cp})=k_v$ от параметров цикла ПКР, где v_{cp} и θ_{cp} вычислены по (2). Здесь ε – относительная продолжительность включения в цикле; $t_{ц}^0=t_{ц}/T_6$ – относительное время цикла; T_6 – базисное время, в качестве которого здесь принимается наибольшая постоянная времени нагрева двигателя по двухмассовой модели, которая для АД закрытого исполнения практически совпадает с постоянной времени одно-

массовой модели. Расчеты выполнялись для двигателей закрытого исполнения, работающих в режиме S3. На интервале t_p использовалась такая величина мощности потерь в двигателе, при которой средняя за цикл мощность потерь (с учетом ухудшения теплоотдачи при паузе) была равна номинальной величине. Коэффициент ухудшения теплоотдачи при неподвижном роторе принят равным 0,4.

Далее индекс «1» будем использовать применительно к величинам, относящимся к первому узлу двухмассовой термодинамической модели (обмотка статора), а индекс «2» применительно ко второму её узлу. Поверхность построена для $\Delta P_{1N}^0=\Delta P_{1N}/(\Delta P_{1N}+\Delta P_{2N})=0,5$ и $C_1^0=C_1/(C_1+C_2)=0,05$ (что близко к средним значениям для двигателей серии 4А в диапазоне номинальных моментов от 7 до 2000 Н·м), где обозначено: ΔP_{1N} и ΔP_{2N} – мощности потерь в узлах модели при работе в номинальном режиме, C_1 и C_2 – теплоемкости узлов.

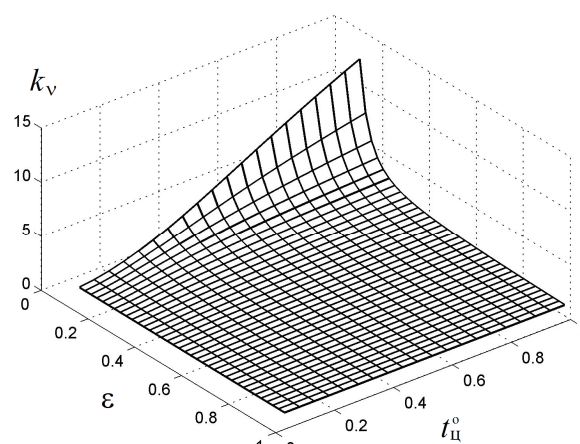


Рис. 2. Зависимость $k_v=v_{cp}/v(\theta_{cp})$ от параметров цикла ПКР для АД с изоляцией класса В при $\Delta P_{1N}^0=0,5$ и $C_1^0=0,05$

Fig. 2. Dependence of $k_v=v_{cp}/v(\theta_{cp})$ on the parameters of the intermittent mode cycle for induction motor with insulation of the class В at $\Delta P_{1N}^0=0,5$ and $C_1^0=0,05$

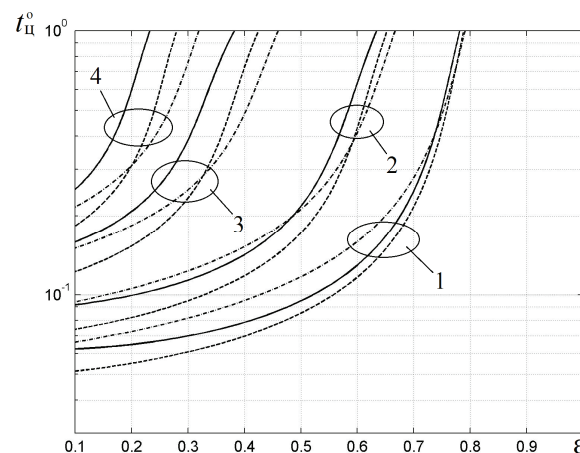


Рис. 3. Линии уровня поверхности $k_v=f(\varepsilon, t_{ц}^0)$, k_v : 1 – 1,1; 2 – 1,2; 3 – 1,5; 4 – 2,0

Fig. 3. Curves of the surface level $k_v=f(\varepsilon, t_{ц}^0)$, k_v : 1 – 1,1; 2 – 1,2; 3 – 1,5; 4 – 2,0

Из рис. 2 следует, что при малой продолжительности включения ε средняя скорость старения изоляции обмотки статора за цикл может существенно превосходить ее значение, которое получается путем расчета по средней за цикл температуре, причем, чем длительнее цикл, тем сильнее это проявляется. Отметим, что метод средних потерь неявно предполагает равенство $v_{cp} = v(\theta_{cp})$ и рис. 2 наглядно демонстрирует погрешность этого метода. На рис. 3 показаны линии уровня поверхности $k_v = f(\varepsilon, t_n^o)$ для АД с изоляцией класса В при $\Delta P_{1N}^o = 0,75$ и $C_1^o = 0,05$ (непрерывные линии), при $\Delta P_{1N}^o = 0,5$ и $C_1^o = 0,05$ (штрих-пунктир) и при $\Delta P_{1N}^o = 0,6$ и $C_1^o = 0,04$ (пунктир).

Кривые на рис. 3 делят плоскость в координатах t_n^o и ε на области, в которых расчет скорости старения изоляции по средней температуре приводит к большей (слева от кривой) или меньшей (справа от кривой) погрешности. Эти кривые выступают в роли границ области применимости метода средних потерь в случае, если мы считаем приемлемым некоторый уровень k_v , соответствующий данной кривой.

Исследование влияния различных факторов на положение линий уровня в координатах t_n^o и ε показало, что в пределах формальной границы ПКР (600 с) это положение при малых k_v (1,1...1,2) зависит в основном от величины отношения $\Delta P_{1N}^o / C_1^o$ [22]. Чем больше это отношение, тем правее и ниже лежит линия уровня при одинаковом значении k_v . Расчеты для двигателей серии 4А показали, что отношение $\Delta P_{1N}^o / C_1^o$ может существенно отличаться для разных двигателей, но максимальные значения не превосходят 15–17 [22]. На положение линий уровня оказывает влияние относительная величина теплоемкости обмотки статора C_1^o , чем она меньше при определенном значении $\Delta P_{1N}^o / C_1^o$, тем больше значение k_v при одинаковых величинах t_n^o и ε , что объясняется увеличением амплитуды колебаний температуры обмотки при уменьшении ее теплоемкости. Если точка в координатах t_n^o и ε лежит ниже кривой с соответствующими значениями ΔP_{1N}^o и C_1^o , то метод средних потерь может быть признан достаточно точным для оценки теплового состояния двигателя. В ином случае он не будет давать достоверный результат и для оценки теплового состояния АД необходимо проведение расчетов с учетом влияния нелинейной связи между скоростью старения изоляции и температурой.

Решение задачи 2

Как учесть увеличение скорости термического старения изоляции от колебаний температуры при оценке теплового состояния двигателя? Самым простым способом такого учета является введение поправочного коэффициента ($k_{\Delta P}$), на который надо умножать средние за цикл потери, чтобы учесть увеличение средней за цикл скорости старения изоляции из-за нелинейности ее зависимости от температуры.

В этом случае соотношение для проверки двигателя по нагреву с использованием метода средних потерь приобретает следующий вид:

$$\Delta P_{\Sigma cp} \cdot k_{\Delta P} \leq \Delta P_N,$$

где $\Delta P_{\Sigma cp}$ – средняя за цикл суммарная мощность потерь в двигателе; ΔP_N – суммарная мощность потерь при работе в номинальном режиме.

Аналитическим путем получено выражение для $k_{\Delta P}$ с использованием двухмассовой термодинамической модели АД:

$$k_{\Delta P} = \frac{[(1 - \Delta P_{1N} / \Delta P_N) - R] \lambda_{20} + QS}{k_3 (\lambda_{12} + \lambda_{20} (1 - R))}, \quad (3)$$

где $k_3 = \Delta P_{\Sigma cp} / \Delta P_N$; $R = \frac{\Delta P_{rN} / \Delta P_{1N}}{1 - (I_0 / I_{1N})^2 + \Delta P_{rN} / \Delta P_{1N}}$;

ΔP_{rN} – мощность потерь в обмотке ротора в номинальном режиме; λ_{12} и λ_{20} – тепловые проводимости между узлами двухмассовой термодинамической модели и между вторым узлом и охлаждающей средой; I_0 и I_{1N} – токи статора АД при холостом ходе и в номинальном режиме; Q и S – функции параметров двухмассовой термодинамической модели АД.

Выражение (3) весьма сложно в использовании, так как требует знания параметров термодинамической модели двигателя. Поэтому представляет интерес возможность его упрощения. Можно показать, что выражение (3) удастся преобразовать к более простому виду:

$$k_{\Delta P} = 1 + \ln k_{vN} \frac{(\theta_{доп} + \theta_A)^2}{B \tau_{1N}} L, \quad (4)$$

где B – параметр из выражения (1), определяемый классом изоляции; τ_{1N} – превышение температуры в номинальном режиме (например, 105 °С по ГОСТ Р 52776–2007 при изоляции класса F для двигателей с $P_N \leq 200$ кВт); k_{vN} – коэффициент k_v при условии $\Delta P_{\Sigma cp} = \Delta P_N$;

$$L = \frac{\lambda_{12} + \lambda_{20} \Delta P_{1N} / \Delta P_N}{\lambda_{12} + \lambda_{20} \frac{1 - (I_0 / I_{1N})^2}{1 - (I_0 / I_{1N})^2 + \Delta P_{rN} / \Delta P_{1N}}}. \quad (5)$$

Величина L , рассчитанная по формуле (5), при реальных параметрах АД весьма близка к единице (рис. 4).

Анализ значений параметра L , рассчитанных для 123 двигателей серии 4А закрытого исполнения в диапазоне мощностей от 60 Вт до 315 кВт позволил сформировать рекомендации, касающиеся значений этого параметра, отраженные в таблице.

На рис. 5 показаны кривые, иллюстрирующие погрешность упрощенной формулы (4) для вычисления $k_{\Delta P}$ по сравнению с точным выражением (3). Пунктирные кривые построены по точной формуле (3), а непрерывные – по (4) при $L=1$ для класса В и $L=0,9$ для класса F. Кривые по точной формуле построены при $k_3=0,8; 0,9; 1,0$ (снизу вверх).

Рассмотрим актуальность учета влияния колебаний температуры при проверке двигателя по на-

греву в зависимости от размера двигателя. Формальной границей ПКР является продолжительность цикла 600 с. На рис. 6 показаны зоны I, II, III, в которых находятся значения максимальной продолжительности цикла. Поясним характерные величины наибольшей постоянной времени T для закрытых АД разной мощности и соответствующие ей максимальные длительности цикла ПКР (в относительных единицах – $600/T$):

- I – АД порядка нескольких десятков киловатт 3500...4500 с ($600/T \approx 0,15...0,2$);
- II – АД порядка единиц кВт около 2000 с ($600/T \approx 0,3$);
- III – АД порядка десятков и сотен Вт 1000...1500 с ($600/T \approx 0,4...0,6$).

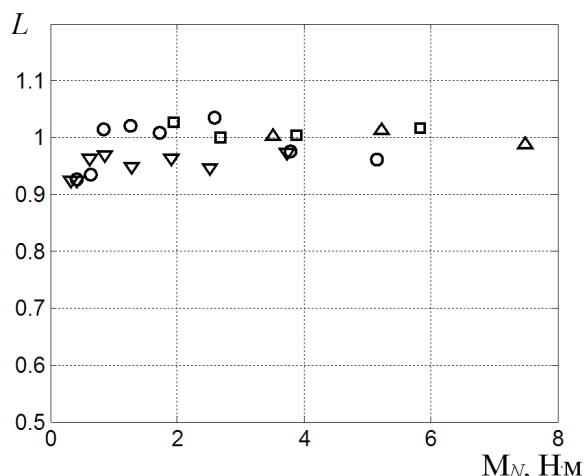


Рис. 4. Значения L для закрытых двигателей серии 4А малых габаритов ($M_N < 7,5 \text{ Н}\cdot\text{м}$), $2p = \nabla - 2$; $\circ - 4$; $\square - 6$; $\Delta - 8$

Fig. 4. Values of L for enclosed motors of the series 4A small size ($M_N < 7,5 \text{ N}\cdot\text{m}$), $2p = \nabla - 2$; $\circ - 4$; $\square - 6$; $\Delta - 8$

Таблица. Значения параметра L для закрытых АД

Table. Values of L for enclosed motors

$M_N, \text{Н}\cdot\text{м}/\text{N}\cdot\text{м} \rightarrow$	<10	$10...200$	$200...1000$	>1000
$\downarrow n_0, \text{об}/\text{мин}/\text{rev}/\text{min}$				
500	1	1	0,95	0,9...0,95
600				0,9
750		0,95...1	0,9...0,95	0,85...0,9
1000				0,8...0,85
1500	0,9...1	0,9...0,95	0,85...0,9	0,8...0,85
3000		0,8...0,9	0,7...0,8	

На рис. 6 показаны также кривые линий уровня поверхности $k_n = f(\varepsilon t_n^0)$ при $k_v = 1, 1, 1, 2, 1, 5, 2, 0$ ($\Delta P_{1N}^0 = 0,6$ и $C_1^0 = 0,04$), непрерывные линии для изоляции класса В, пунктиром для F. Хорошо видно, что учет нелинейности зависимости $v(\theta)$ при оценке теплового состояния АД более актуален для небольших двигателей (диапазон III), т. к. для них формальная граница ПКР соответствует большему относительному времени цикла.

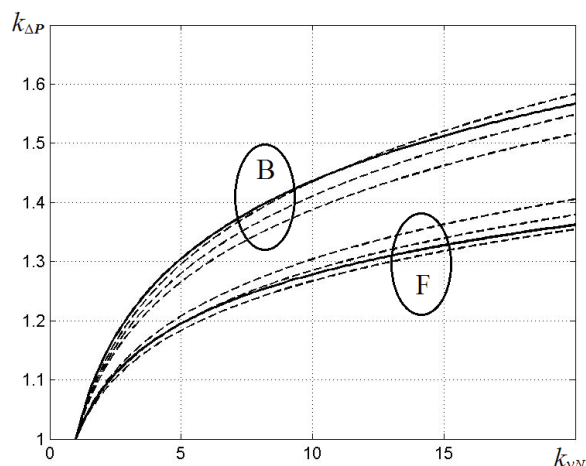


Рис. 5. Зависимости $k_{\Delta P}$ от k_{VN} для АД с изоляцией классов В и F

Fig. 5. Dependences of $k_{\Delta P}$ on k_{VN} for induction motor with insulation of B and F classes

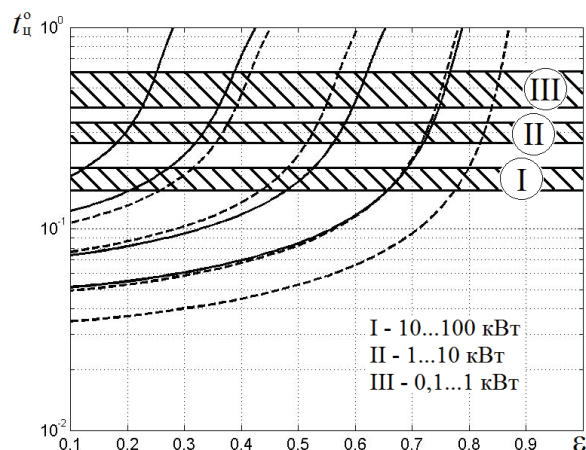


Рис. 6. Зоны характерных величин относительной продолжительности цикла для двигателей разного размера

Fig. 6. Regions of characteristic values of relative cycle time for different size motors

Вычислительный эксперимент

Проверка аналитически полученных выражений проведена с помощью вычислительного эксперимента с использованием комплексной модели, построенной в пакете Simulink [23]. Комплексная модель включает в себя пятимассовую термодинамическую модель закрытого АД, энергетическую модель с учетом температурной зависимости сопротивлений обмоток и модель термического старения изоляции.

На рис. 7 показаны результаты вычислительного эксперимента (\circ при $\varepsilon = 0,15$; \square при $\varepsilon = 0,25$ и Δ при $\varepsilon = 0,40$) в сравнении с расчетными значениями k_v (показаны непрерывными линиями).

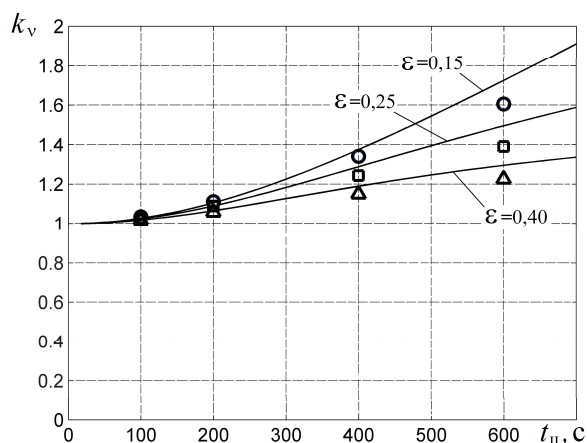


Рис. 7. Зависимости k_v от времени цикла в режиме S3 при условии $\Delta P_{\Sigma cp} = \Delta P_N$

Fig. 7. Dependence of k_v on cycle time in S3 mode at $\Delta P_{\Sigma cp} = \Delta P_N$

Из рис. 7 видно, что в пределах формальных границ ПКР (600 с) расхождение между результатами, полученными аналитически и с помощью более точной модели, использованной в ходе вычислительного эксперимента, весьма невелико и не превышает 6...8 %. Это расхождение объясняется

тем, что двухмассовая термодинамическая модель, на основе которой получены использованные аналитические зависимости, не в состоянии также точно, как пятимассовая модель, отразить особенности тепловых потоков между элементами электродвигателя, а также электродвигателем и охлаждающей средой.

Выводы

При формальном выполнении условия проверки по методу средних потерь скорость уменьшения остаточного теплового ресурса изоляции может существенно отличаться от той, которая соответствует обработке двигателем нормативного срока службы. Это обстоятельство приводит к следующим выводам:

1. При использовании косвенных методов проверки, таких как метод средних потерь, необходимо использовать корректирующий коэффициент $k_{\Delta P}$, учитывающий нелинейность зависимости $v(\theta)$.
2. Для сложных циклов целесообразно использование прямых методов проверки теплового состояния электродвигателя, основанных на расчете изменения остаточного ресурса изоляции.

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. Соркин М. Универсальная защита для асинхронного электродвигателя: миф или реальность? URL: http://novatek-electro.com/universalnaya_zaschita_dlya_asinhronnogo_elektrodvigatelya_mif_ili_realnost_.html (дата обращения: 09.11.2014).
2. Fundamentals of a Motor Thermal Model and its Applications in Motor Protection / B. Venkataraman, B. Godsey, W. Premerlani, E. Shulman et al. // Protective Relay Engineers: Proc. of 58th Annual Conference. – Kansas City, USA: Black Shulman & Veatch Corporation, 2005. – P. 127–144.
3. Грундулис А.О. Защита электродвигателей в сельском хозяйстве. – М.: Колос, 1982. – 140 с.
4. Полковниченко Д.В. Послеремонтная оценка технического состояния короткозамкнутых асинхронных электродвигателей // Научные журналы НТУ «ХПИ»: Электротехника и электромеханика. – 2005. – № 1. – С. 59–62.
5. Пономарев В.А., Суворов И.Ф. Комплексный метод диагностики асинхронных электродвигателей на основе использования искусственных нейронных сетей // Новости электротехники. Проекты. Методики. URL: <http://news.elteh.ru/project/neuron.php> (дата обращения: 12.02.2015).
6. Методы и приборы диагностирования изоляции асинхронных двигателей / Н.П. Воробьев, С.Н. Воробьева, Г.В. Суханкин, Н.Т. Герцен // Ползуновский вестник. – 2011. – № 2/2. – С. 261–269.
7. Пахомов А.И. Методы и средства диагностики изоляции асинхронных двигателей сельскохозяйственного производства на основе частичных разрядов: дис. ... д-ра техн. наук. – Краснодар, 2008. – 347 с.
8. Engelmann R.H., Middendorf W.H. Handbook of Electric Motors. – NY: Marcel Dekker, 1995. – P. 375–456.
9. Ведяшкин М.В., Муравлев О.П. Оценка параметров законов распределения отказов обмоток статоров при эксплуатации крановых асинхронных двигателей // Известия Томского политехнического университета. – 2011. – Т. 319. – № 4. – С. 117–121.
10. Тонких В.Г. Метод диагностики асинхронных электродвигателей в сельском хозяйстве на основе анализа параметров их вне-

шнего магнитного поля: дис. ... канд. техн. наук. – Барнаул, 2009. – 181 с.

11. Котеленец Н.Ф., Кузнецов Н.Л. Испытания и надежность электрических машин. – М.: Высш. шк., 1988. – 232 с.
12. Онищенко Г.Б., Юньков М.Г. Проблемы и перспективы развития электропривода // Труды VIII Международной (XIX Всероссийской) конф. по автоматизированному электроприводу АЭП-2014: в 2 т. Т. 1. – Саранск: Изд-во Мордов. ун-та, 2014. – С. 5–9.
13. Evolution and Modern Approaches for Thermal Analysis of electrical machines / A. Boglietti, A. Cavagnino, D. Staton, M. Shanel, M. Mueller, C. Mejuto // IEEE Transactions On Industrial Electronics. – 2009, March. – V. 56. – № 3. – P. 871–882.
14. Kylander G. Thermal Modelling of Small Cage Induction Motors: Technical Report No. 265. – Goteborg, Sweden: Chalmers University of Technology, 1995. – 113 p.
15. Усынин Ю.С., Бутаков С.М., Сидоренко Н.Ю. Тепловая модель электродвигателя прокатного стана // Вестник Южно-Уральского государственного университета. Серия Энергетика. – 2003. – № 11. – Вып. 3. – С. 71–75.
16. Ключев В.И. Теория электропривода. – М.: Энергоатомиздат, 1985. – 560 с.
17. Электромеханические и тепловые режимы асинхронных двигателей в системах частотного управления / Р.Т. Шрейнер, А.В. Костылев, В.К. Кривовяз, С.И. Шилин. – Екатеринбург: ГОУ ВПО «Рос. гос. проф.-пед. ун-т», 2008. – 361 с.
18. Зюзев А.М., Метельков В.П. Термодинамические модели для проверки асинхронного двигателя по нагреванию // Электротехника. – 2012. – № 9. – С. 48–52.
19. Кузнецов Н.Л. Надежность электрических машин. – М.: ИД МЭИ, 2006. – 432 с.
20. Brancato E.L. Estimation of lifetime expectancies of motors // IEEE Electrical Insulation Magazine. – 1992, May/Jun. – V. 8. – № 3. – P. 5–13.
21. Зюзев А.М., Метельков В.П. Термодинамическая модель асинхронного двигателя для электроприводов с интенсивными процессами тепловыделения // Известия ТулГУ. Технические науки. – 2010. – Ч. 1. – Вып. 3 – С. 138–145.

22. Зюев А.М., Метельков В.П. К оценке теплового состояния асинхронного двигателя в повторно-кратковременном режиме // Электротехника. – 2014. – № 9. – С. 19–23.
23. Зюев А.М., Метельков В.П., Максимова В.А. Современные подходы к исследованию тепловых и электродинамических процессов в асинхронном электроприводе // Электромехани-

ческие преобразователи энергии: Матер. VI Междунар. научно-техн. конф. – Томск, 9–11 октября 2013. – Томск: Изд-во ТПУ, 2013. – С. 40–44.

Поступила 25.02.2015 г.

UDC 621.313

ACCOUNTING TEMPERATURE FLUCTUATIONS IN STATOR WINDING OF INDUCTION MOTOR WHEN CHECKING FOR HEATING IN INTERMITTENT MODE

Anatoliy M. Zyuzev,

Ural Federal University, 19, Mira street, Ekaterinburg, 620002, Russia. E-mail: a.m.zyuzev@urfu.ru

Vladimir P. Metelkov,

Ural Federal University, 19, Mira street, Ekaterinburg, 620002, Russia. E-mail: v.p.metelkov@urfu.ru

The relevance of the work is caused by the need to reduce the accident rate of induction motors, increase the service life and efficiency of their use by improving the accuracy of the estimation of the thermal state at the design stage and during the exploitation.

The main aim of the study is to determine the limits of applicability of the average loss method for estimating the thermal state of induction motors in intermittent mode and refinement of this method, taking into account the nonlinear coupling between rate of aging of insulation and temperature, as well as the ratio of the cycle parameters and the thermal time constant of the motor.

The methods used in the study: analytical methods and computer experiment based on five masses thermodynamic model of the TEFC induction motor

The results. It was found that there are such combinations of parameters of cycle in intermittent mode for which evaluation of the thermal state of the induction motor by the average loss method is incorrect. Thus, at a low duty ratio the average insulation-aging rate per cycle may exceed its value obtained by calculation based on the average temperature for the cycle. The authors have evaluated the need to consider the effect of winding temperature fluctuations when checking engine for heating according to the size of the engine and proposed a refined method of estimating the thermal state of the induction motor by the average loss method by introducing a correction coefficient that takes into account the nonlinear coupling of the rate of aging of insulation from the stator winding temperature. The formulas for calculating this coefficient were obtained. It is shown that within the formal borders of intermittent mode (10 min), the divergence between the results obtained analytically and via five masses thermodynamic model of the induction motor used in the computational experiment is very small and does not exceed 6...8 %.

Key words:

Induction motor, average loss method, thermal deterioration of insulation, stator winding, intermittent mode.

REFERENCES

1. Sorkind M. *Universalnaya zashchita dlya asinkhronnogo dvigatelya: mif ili realnost?* [Versatile protection for induction motors: myth or reality?]. Available at: http://novatek-electro.com/universalnaya_zaschita_dlya_asinkhronnogo_elektrodvigatelya_mif_ili_realnost_.html (accessed 09 November 2014).
2. Venkataraman B., Godsey B., Premerlani W., Shulman E. etc. Fundamentals of a Motor Thermal Model and its Applications in Motor Protection. *Proceedings of 58th Annual Conference. Protective Relay Engineers.*, Kansas City, USA, Black & Veatch Corporation, 2005. pp. 127–144.
3. Grundulis A.O. *Zashchita elektrodvigatelye v sel'skom khozyaystve* [Electric motor protection in agriculture]. Moscow, Kolos Publ., 1982. 140 p.
4. Polkovnichenko D.V. Posleremontnaya otsenka tekhnicheskogo sostoyaniya korotkozamknutykh asinkhronnykh elektrodvigatelye [Post-maintenance technical evaluation of cage induction motors]. *Nauchnye zhurnaly NTU «KhPI»: Elektrotehnika i elektromekhanika*, 2005, no. 1, pp. 59–62.
5. Ponomarev V.A., Suvorov I.F. Kompleksny metod diagnostiki asinkhronnykh elektrodvigatelye na osnove ispolzovaniia iskusstvennykh neyronnykh setey [An integrated method for diagnosis of asynchronous motors based on the use of artificial neural networks]. *Novosti elektrotehniki. Proekty. Metodiki*. Available at: <http://news.elteh.ru/proect/neuron.php> (accessed 12 February 2015).
6. Vorobyov N.P., Vorobyova S.N., Sukhankin G.V., Gertsen N.T. Metody i pribory diagnostirovaniya izolyatsii asinkhronnykh elektrodvigatelye [Methods and tools for diagnosing the insulation of asynchronous motors]. *Polzunovskiy vestnik*, 2011, no. 2/2, pp. 261–269.
7. Pakhomov A.I. *Metody i sredstva diagnostiki izolyatsii asinkhronnykh dvigatelye sel'skokhozyaystvennogo proizvodstva na osnove chastichnykh razryadov*. Dis. Dokt. nauk [Methods and tools for the diagnosis of asynchronous motors isolation of agricultural production on the basis of partial discharges. Dr. Diss.]. Krasnodar, 2008. 347 p.
8. Engelmann R.H., Middelndorf W.H. *Handbook of Electric Motors*. New York, Marcel Dekker, 1995. pp. 375–456.

9. Vedyashkin M.V., Muravlyov O.P. Otsenka parametrov zakona raspredeleniya otkazov obmotok statorov pri ekspluatatsii kranovykh asinkhronnykh dvigateley [Estimation of parameters of the laws of distribution of stator windings failures in the operation of asynchronous motors for crane]. *Bulletin of the Tomsk Polytechnic University*, 2011, vol. 319, no. 4, pp. 117–121.
10. Tonkikh V.G. *Metod diagnostiki asinkhronnykh elektrodvigateley v selskom khozyaystve na osnove analiza ikh vneshnego magnitnogo polya*. Dis. Kand. nauk [Method of asynchronous motors diagnosis in agriculture on the basis of their external magnetic field. Cand. Diss.]. Barnaul, 2009. 181 p.
11. Kotelenets N.F., Kuznetsov N.L. *Ispytaniya i nadezhnost elektricheskikh mashin* [Electric Machines: Tests and Reliability]. Moscow, Vysshaya shkola Publ., 1988. 232 p.
12. Onishchenko G.B., Yunkov M.G. Problemy i perspektivy razvitiya elektroprivoda [Power drive systems development problems and prospects]. *Trudy VIII Mezhdunarodnoy (XIX Vserossiyskoy) konferentsii po avtomatizirovannomu elektroprivodu* [Proc. of the VIII Int. (XIX All-Russian) conf. on the automatic electric drive]. Saransk, 2014. Vol. 1, pp. 5–9.
13. Boglietti A., Cavagnino A., Staton D., Shanel M., Mueller M., Mejuto C. Evolution and Modern Approaches for Thermal Analysis of electrical machines. *IEEE Transactions on Industrial Electronics*, March 2009, vol. 56, no. 3, pp. 871–882.
14. Kylander G. Thermal Modelling of Small Cage Induction Motors: Technical Report No. 265. Goteborg, Sweden, Chalmers University of Technology, 1995. 113 p.
15. Usynin Yu.S., Butakov S.M., Sidorenko N.Yu. Teplovaya model elektrodvigateleya prokatnogo stana [Heat model of electric drive for rolling mill]. *Vestn. Yuzhno-Ural. Gos. Univ., Ser. Energet.*, 2003, no. 11, vol. 3, pp. 71–75.
16. Klyuchev V.I. *Teoriya elektroprivoda* [The Theory of Electric Drive]. Moscow, Energoatomizdat Publ., 1985. 560 p.
17. Shreiner R.T., Kostylev A.V., Krivovyaz V.K., Shilin S.I. *Elektromekhanicheskie i teplovye rezhimy asinkhronnykh dvigateley v sistemakh chastotnogo upravleniya* [Electromechanical and Heat Modes of Induction Motors in Frequency Control Systems]. Yekaterinburg, Russian State Professional Pedagogical University Press, 2008. 361 p.
18. Zyuzev A.M., Metelkov V.P. Thermodynamic Models for Asynchronous Motor Heating Tests *Russian Electrical Engineering*, 2012, vol. 83, no. 9, pp. 512–515.
19. Kuznetsov N.L. *Nadezhnost elektricheskikh mashin* [Electric Machines Reliability]. Moscow, MEI Publ. house, 2006. 432 p.
20. Brancato E.L. Estimation of lifetime expectancies of motors. *IEEE Electrical Insulation Magazine*, May/Jun. 1992, vol. 8, no. 3, pp. 5–13.
21. Zyuzev A.M., Metelkov V.P. Termodinamicheskaya model asinkhronnogo dvigatelya dlya elektroprivodov s intensivnymi protsessami teplovydeleniya [Thermodynamic Model of Induction Motor for Electric Drives with Intensive Heat Release]. *Izvestiya TulGU. Tekhnicheskie nauki – Bulletin of Tula State University. Engineering Sciences*, 2010, P. 1, Iss. 3, pp. 138–145.
22. Zyuzev A.M., Metelkov V.P. Toward the Evaluation of the Thermal State of an Induction Motor in the Recursive Short-Term Mode. *Russian Electrical Engineering*, 2014, vol. 85, no. 9, pp. 554–558.
23. Zyuzev A.M., Metelkov V.P., Maksimova V.A. Sovremennye podkhody k issledovaniyu teplovykh i elektrodinamicheskikh protsessov v asinkhronnom elektroprivode [Modern approaches to the study of thermal and electrodynamic processes in asynchronous electric drive]. *Elektromekhanicheskie preobrazovateli energii: Materialy VI Mezhdunarodnoy nauchno-tekhnicheskoy konferentsii* [Electromechanical energy transformers: Proc. VI Int. scientific conference]. Tomsk, 2013. pp. 40–44.

Received: 25 February 2015.