

ОЦЕНКА ВЛИЯНИЯ КОЛЕБАНИЙ НАГРУЗКИ НА РЕСУРС ИЗОЛЯЦИИ АСИНХРОННЫХ ДВИГАТЕЛЕЙ

И.Я. Браславский, В.П. Метельков, Д.В. Есаулкова, А.В. Костылев

Уральский федеральный университет, г. Екатеринбург, Россия

Актуальность исследований обусловлена необходимостью повышения надежности и снижения аварийности асинхронных электроприводов из-за выхода из строя обмотки статора. Целью исследований является разработка способа учета влияния изменений температуры обмотки при колебаниях нагрузки на термический ресурс изоляции. Исследования проводились с использованием 5-массовой термодинамической модели закрытого асинхронного двигателя, работающего в режиме случайного нагружения. Была использована кластеризация серии двигателей с последующим созданием обобщенной термодинамической модели для каждого кластера. При подборе параметров обобщенной модели использовался метод генетических алгоритмов. С помощью моделирования на основе обобщенных термодинамических моделей были получены выражения для приближенного учета влияния колебаний температуры обмотки на ускорение расхода термического ресурса изоляции. Предложен простой способ учета этого влияния на этапе выбора и проверки двигателя при конструировании электропривода.

Ключевые слова: асинхронный двигатель, нагрев обмотки, обмотка статора, кластерный анализ, случайное нагружение, скорость старения изоляции.

Введение

Большое количество электроприводов в различных отраслях работает в режимах, для которых характерно периодическое изменение нагрузки или периодов работы и паузы. При работе в таких режимах температура элементов двигателя может изменяться в широком диапазоне. Широко распространенный классический метод оценки теплового состояния электродвигателей на основе средних потерь так, как и методы эквивалентных величин, основанные на нем, не учитывают это обстоятельство. Вывод выражений для этих методов предполагает линейную связь между скоростью термического старения изоляции и ее температурой, так как только в этом случае средняя температура отражает среднюю скорость старения изоляции.

В действительности скорость термического старения изоляции (v) связана с температурой (θ) экспоненциальной зависимостью. Эта зависимость может быть получена, исходя из законов кинетики химических реакций [1], и может быть представлена выражением

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

где B и G – постоянные коэффициенты; $\theta_A = 273$ °C; $k = 3600$, если срок службы измеряется в секундах.

Расход термического ресурса изоляции за время t_{work} может быть представлен как

$$\Delta R = \int_0^{t_{work}} v[\theta(t)] dt. \quad (2)$$

Расход термического ресурса изоляции за время работы в номинальном режиме с температурой θ_N будет $\Delta R_N = v(\theta_N) t_{work}$. В этом случае можно

ввести коэффициент ускорения расхода термического ресурса изоляции $k_v = \Delta R / \Delta R_N$, позволяющий оценить влияние изменений температуры обмотки на ее долговечность.

Выражение (1) описывает монотонно возрастающую функцию с положительной второй производной. Из этого следует, что увеличение скорости старения изоляции при увеличении температуры вверх от средней не компенсируется ее снижением при снижении температуры. Поэтому любые колебания температуры ведут к увеличению скорости расхода термического ресурса изоляции, а при колебаниях температуры с разной амплитудой, но одинаковым средним ее значением, средняя скорость старения изоляции будет разной (k_v всегда больше единицы). Это ведет к сокращению срока службы двигателя, что не учитывается классическими методами оценки теплового состояния двигателя [2]. Однако факт влияния колебаний температуры на ускорение расхода термического ресурса изоляции обмотки при определенных условиях может оказываться весьма существенным [2–5].

На рис. 1 показано влияние колебаний нагрузки, характеризуемых относительной величиной среднего квадратичного отклонения мощности потерь ($\sigma_{\Delta P}$), на коэффициент ускорения расхода ресурса изоляции k_v . Графики показаны для $\Delta t / t_6 = 0,01$ при соблюдении условия равенства средней за цикл ($\Delta P_{\Sigma cp}$) и номинальной ($\Delta P_{\Sigma N}$) мощностей потерь; Δt – характерное время постоянства нагрузки; $t_6 = C_{\Sigma} \tau_{lim} / \Delta P_{\Sigma N}$; C_{Σ} – суммарная теплоемкость двигателя; τ_{lim} – максимально допус-

тимое превышение температуры обмотки статора в соответствии с ГОСТ [6]. Графики получены с использованием термодинамической модели асинхронного двигателя.

В предыдущих работах [2–5] и [7, 8], посвященных влиянию колебаний температуры обмотки на старение изоляции, авторы использовали компьютерное моделирование на основе термодинамических моделей с сосредоточенными параметрами (от 2 до 6 узлов). Однако на этапе выбора двигателя (при проектировании электропривода) и во многих других случаях, связанных с необходимостью оценки теплового состояния, инженер не располагает достаточным объемом информации о внутренних параметрах двигателя, который необходим для создания термодинамической модели. В этом случае требуются более простые методы учета влияния нелинейности зависимости скорости старения изоляции от температуры при оценке теплового состояния двигателя.

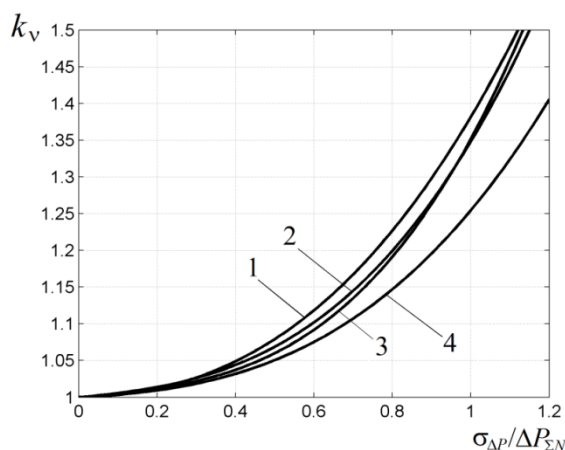


Рис. 1. Зависимости k_v от среднего квадратического отклонения мощности потерь (1, 2 – лобовые части обмотки; 3, 4 – пазовые части; 1, 3 – однополярное равномерное распределение; 2, 4 – симметричное нормальное распределение)

1. Предмет исследования и постановка задачи

Исследование проводилось для асинхронных двигателей с короткозамкнутым ротором, так как эти двигатели составляют абсолютное большинство в различных отраслях экономики. Для этих двигателей доля выходов из строя по причинам, связанным с повреждением изоляции обмотки статора, в некоторых отраслях очень велика – до 68 % для крановых приводов [9] и даже до 80 % в сельском хозяйстве [10]. Ежегодный выход этих двигателей из строя составляет от 10–12 до 20–25 % [11–14].

Исследовалось влияние колебаний температуры обмотки статора при работе электропривода в режиме случайного нагружения. Причина исследований для случайного режима заключается в том, что существует огромное количество конкретных типов графиков нагрузки, которые слож-

но охватить при анализе. В то же время многие режимы с детерминированными циклами нагружения также могут быть описаны в терминах средних и средних квадратичных величин нагрузок и потерь. Режим случайного нагружения представляет собой наиболее общий случай. Отметим, что в литературе по случайному нагружению электроприводов, в частности [15, 16], не учитываются аспекты, связанные с влиянием колебаний температуры обмотки на ресурс изоляции.

В качестве закона случайного распределения нагрузки использовался равномерный закон. Причина использования этого закона в том, что, как было показано в [17], с учетом ограничений величины реального момента при функционировании электропривода, законы распределения нагрузки имеют тенденцию приближения к равномерному закону.

В работе ставилась задача получения приближенных аналитических выражений для коэффициента k_v , который позволял бы оценить сокращение срока службы изоляции при работе в режимах с существенными колебаниями температуры обмотки статора по сравнению с работой в режиме с постоянной температурой. Коэффициент k_v можно использовать на стадии выбора и проверки двигателя на этапе проектирования электропривода. В работе [8] получено аналитическое выражение, которое связывает коэффициент k_v с корректирующим коэффициентом при расчете средних потерь для оценки теплового состояния асинхронного двигателя.

2. Описание метода определения коэффициента ускорения расхода термического ресурса изоляции

2.1. Кластеризация серии двигателей

Исследования были проведены на основе двигателей серии 4А закрытого исполнения (82 двигателя со вспяными обмотками статора мощностью от 60 Вт до 90 кВт). Эта группа двигателей была разделена на две подгруппы – 50 двигателей с изоляцией класса В и 32 двигателя с изоляцией класса F. Был выделен набор параметров, наиболее существенно влияющий на процессы в термодинамической модели (использовалась модель на основе тепловой схемы с 5 узлами). Создание и использование таких термодинамических моделей для 82 двигателей крайне трудоемко. Поэтому был использован подход на основе кластеризации серии двигателей, описанный подробно в [3].

В результате кластеризации серия двигателей была разделена на 7 кластеров (4 для двигателей с изоляцией класса В и 3 для двигателей с изоляцией класса F), для каждого класса была получена обобщенная термодинамическая модель (ТДМ) в относительных единицах. Параметры обобщенных ТДМ находились с использованием метода генетических алгоритмов.

2.2. Получение аппроксимирующих выражений для k_v

Процесс нагружения моделировался с использованием равномерного однополярного закона распределения момента. Вариабельность нагрузки характеризовалась средним квадратичным отклонением (СКО) мощности потерь, так как СКО момента – менее информативная величина с точки зрения нагрева двигателя, поскольку мощность потерь зависит не только от момента. Средняя величина нагрузки выбиралась, исходя из соблюдения равенства $\Delta P_{\Sigma \text{ср}} = \Delta P_{\Sigma N}$.

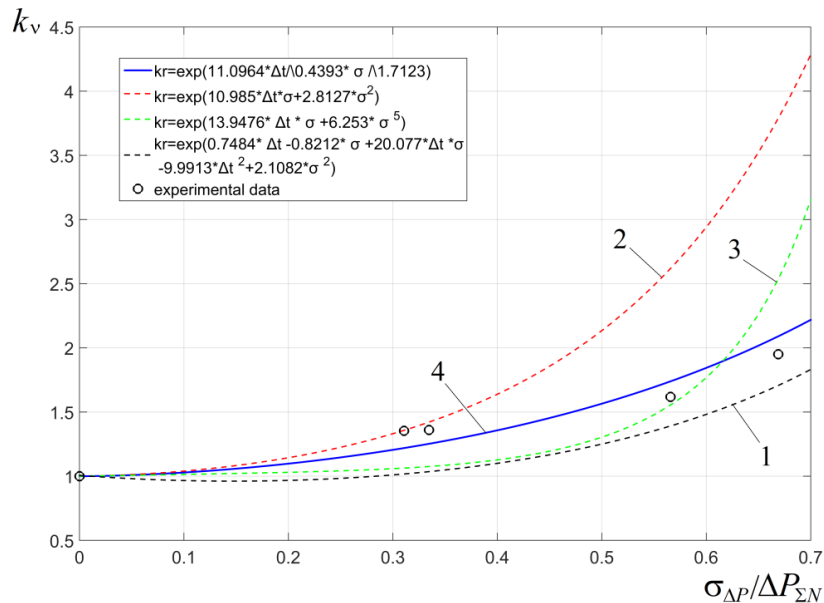


Рис. 2. К выбору аппроксимирующей функции $k_v(\Delta t, \sigma_{\Delta P})$ для кластера F1 при $\Delta t/t_6 = 0,01$ (цифры соответствуют номерам вариантов)

Для каждого кластера с помощью обобщенной ТДМ был получен набор величин k_v для пар значений Δt и $\sigma_{\Delta P}$. Полученный набор точек был аппроксимирован в трехмерном пространстве поверхностью $k_v = f(\Delta t, \sigma_{\Delta P})$.

В качестве аппроксимирующей функции была принята экспоненциальная зависимость с различными формами степени. Это представляется логичным, так как сами зависимости скорости старения изоляции от температуры носят экспоненциальный характер. Кроме этого, экспонента гарантирует необходимое условие – коэффициент k_v должен стремиться к единице при стремлении к нулю значений Δt и $\sigma_{\Delta P}$. Для характеристики точности аппроксимации использовался квадрат отклонения набора значений k_v от аппроксимирующей поверхности. Также учитывалась необходимость выполнения условия $f(\Delta t, \sigma_{\Delta P}) > 1$, очевидного с физической точки зрения. На рис. 2 показаны варианты аппроксимирующих функций для кластера F1. Рассматривались четыре различных варианта построения аппроксимирующей функции.

Вариант 1. В качестве степени экспоненты принимался полный квадратичный полином. В этом

случае отрицательные коэффициенты в полиноме приводят при малых $\sigma_{\Delta P}$ к значениям $k_v < 1$.

Вариант 2. Для обеспечения $k_v = 1$ при $\sigma_{\Delta P} = 0$, а также $k_v > 1$ для малых $\sigma_{\Delta P} > 0$ в качестве степени экспоненты принимался неполный квадратичный полином. В этом случае получаем большое расхождение с результатами моделирования для малых Δt .

Вариант 3. Здесь степень, в которой присутствует $\sigma_{\Delta P}$ в полиноме, увеличена до 5. Аппроксимация показывает неудовлетворительные результаты при больших значениях $\sigma_{\Delta P}$.

Вариант 4. В качестве степени экспоненты принималось произведение степенных функций $\sigma_{\Delta P}$ и Δt :

$$k_v = \exp(c_k \Delta t^\alpha \sigma_{\Delta P}^\beta), \quad (3)$$

что обеспечивает наилучшую аппроксимацию для любых значений $\sigma_{\Delta P}$ и Δt .

На рис. 3 и 4 показаны аппроксимирующие поверхности $k_v(\Delta t, \sigma_{\Delta P})$ и некоторые точки, полученные моделированием для кластеров двигателей с изоляцией классов В и F.

Значения коэффициентов c_k , α и β в формуле (3) для различных кластеров представлены в таблице.

Значения коэффициентов для формулы (3)

Кластер	c_k	α	β
B1	10,47	0,713	2,073
B2	8,39	0,626	1,854
B3	10,49	0,646	2,059
B4	9,885	0,655	2,121
F1	11,10	0,439	1,712
F2	13,44	0,467	2,383
F3	31,15	0,908	1,923

3. Проверка полученных результатов

Выражение (3) дает несколько различных значений k_v при одинаковых наборах $\Delta t, \sigma_{\Delta P}$ для различных кластеров, что видно на рис. 3 и 4. Связь между размерами и скоростью двигателя и попаданием его в тот или иной кластер прослеживается, но не позволяет достаточно надежно отнести выбранный двигатель к конкретному кластеру [3].

Проверим, насколько точно значения k_v , даваемые формулой (3), соответствуют значениям, получаемым для этих двигателей с помощью моделирования. На рис. 5 и 6 показаны графики $k_v(\sigma_{\Delta P})$ для кластеров с изоляцией класса В, а на рис. 7 и 8 – аналогичные графики для двигателей с изоляцией класса F. На этих рисунках также показаны точки, полученные средствами моделирования. Пунктирными линиями обозначены верхние

границы значений, даваемых выражением (3) для всех кластеров, то есть зависимости $k_{v,max}(\sigma_{\Delta P})$. На рис. 5–7 хорошо видно, что почти все точки, полученные моделированием, не превосходят значения $k_{v,max}$.

Методика использования полученной аппроксимирующей функции для k_v на этапе конструирования привода заключается в следующем. Для выбранного (проверяемого) двигателя необходимо рассчитать значения k_v для интересующего набора значений $\sigma_{\Delta P}$ и Δt , используя выражение (3) для всех кластеров с данным классом изоляции. После этого необходимо выбрать наибольшее значение из числа рассчитанных ($k_{v,max}$). Это значение даст наиболее вероятное сокращение термического ресурса изоляции по сравнению с работой в режиме с постоянной нагрузкой и таким же уровнем средних потерь.

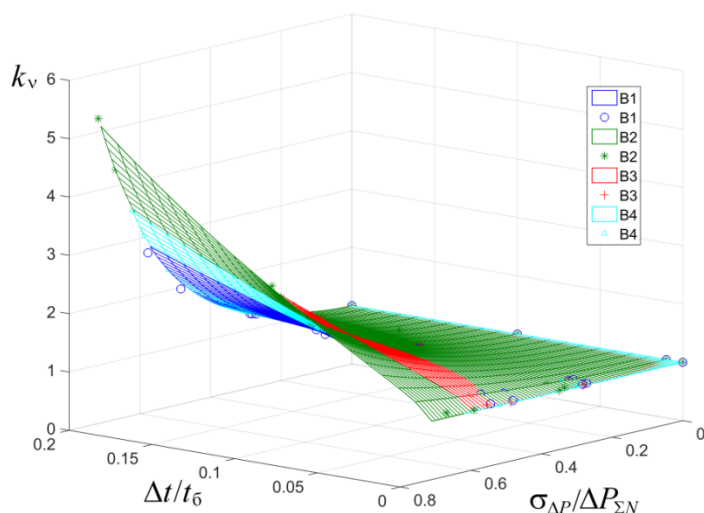


Рис. 3. Аппроксимирующие поверхности $k_v(\Delta t, \sigma_{\Delta P})$ для кластеров В

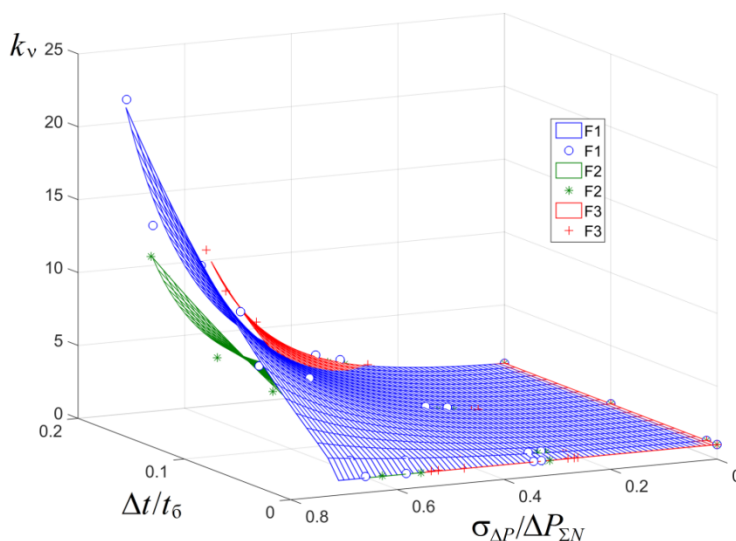


Рис. 4. Аппроксимирующие поверхности $k_v(\Delta t, \sigma_{\Delta P})$ для кластеров F

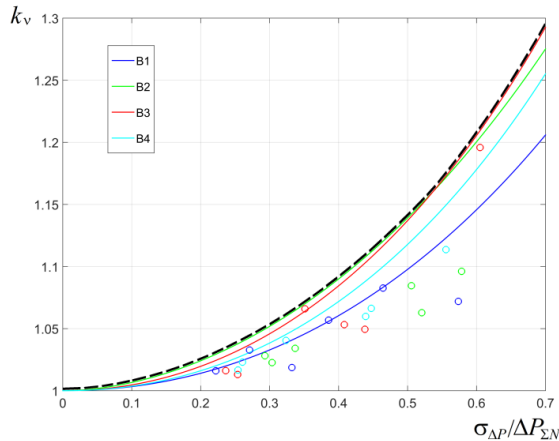


Рис. 5. Зависимости $k_v(\sigma_{\Delta P})$ для изоляции класса В при $\Delta t/t_6 = 0,01$

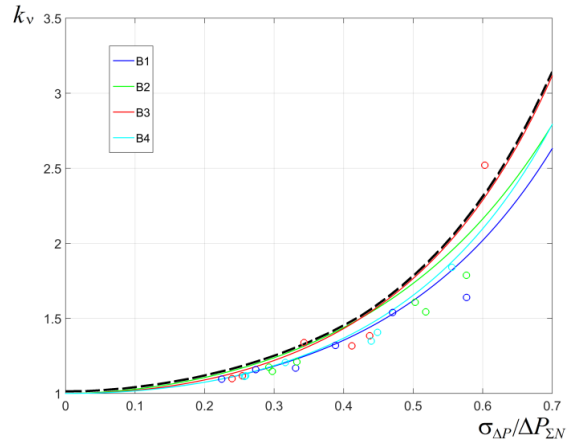


Рис. 6. Зависимости $k_v(\sigma_{\Delta P})$ для изоляции класса В при $\Delta t/t_6 = 0,1$

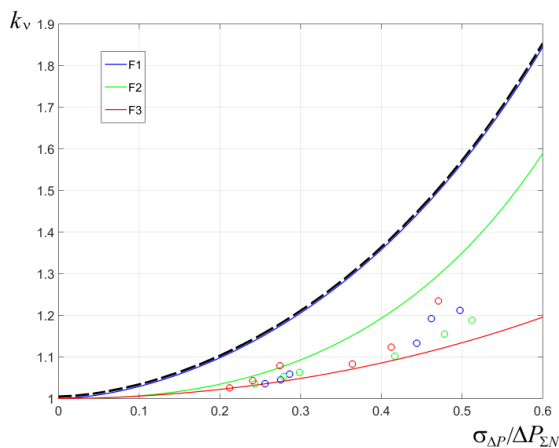


Рис. 7. Зависимости $k_v(\sigma_{\Delta P})$ для изоляции класса F при $\Delta t/t_6 = 0,01$

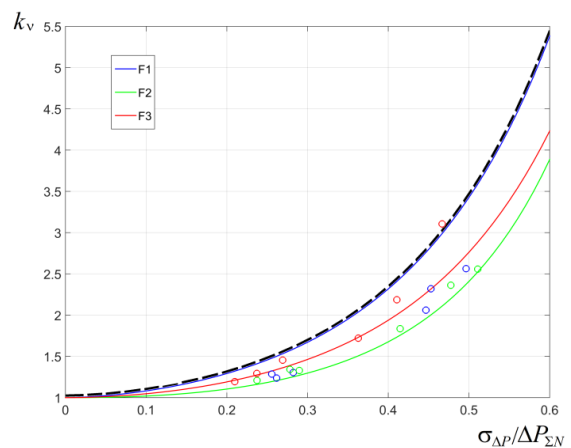


Рис. 8. Зависимости $k_v(\sigma_{\Delta P})$ для изоляции класса F при $\Delta t/t_6 = 0,1$

Заключение

Получены выражения для приближенного учета влияния колебаний температуры обмотки статора асинхронного двигателя на сокращение термического ресурса ее изоляции. Предложен простой способ учета этого влияния на этапе выбора и проверки асинхронного двигателя для электроприводов, работающих в режимах случайного нагружения.

Литература

1. Dakin, T.W. *Electrical Insulation Deterioration Treated as a Chemical Rate Phenomenon* / T.W. Dakin // *AIEE Trans.* – 1948. – Vol. 67. – P. 113–122. DOI: 10.1109/T-AIEE.1948.5059649
2. Zyuzev, A.M. *Toward the Evaluation of the Thermal State of an Induction Motor in the Recursive Short-Term Mode* / A.M. Zyuzev, V.P. Metelkov // *Russian Electrical Engineering.* – 2014. – Vol. 85, no. 9. – P. 554–558. DOI: 10.3103/S1068371214090090
3. *Evaluation of dynamic properties of the TEFC induction motors thermal models* / I.Ya. Braslavskiy, V.P. Metelkov, A.V. Kostylev, D.V. Esaulkova // *Conf. Proc. 2016 9th Int. Conf. on Power Drives Systems, ICPDS 2016, Perm, Russian Federation, 3–7 Oct. 2016.* DOI: 10.1109/ICPDS.2016.7756677
4. *Toward the evaluation of the influence of tem-*

perature fluctuations on the durability of the stator winding insulation of asynchronous motors in random mode loading / I.Ya. Braslavsky, V.P. Metelkov, D.V. Esaulkova, A.V. Kostylev, K.A. Kondakov // *Conf. Proc. 2016 Int. Symp. on Power Electronics, Electrical Drives, Automation and Motion (SPEEDAM), Anacapri, Italy, 22–24 June. – 2016. – P. 447–451.* DOI: 10.1109/SPEEDAM.2016.7525821

5. *Some aspects of the reliability increasing of the transport electric drives* / I.Ya. Braslavsky, V.P. Metelkov, S. Valtchev, D.V. Esaulkova, A.V. Kostylev, A.V. Kirillov // *Conf. Rec. 2016 IEEE International Power Electronics and Motion Control Conference (PEMC), Varna, 25–30 Sept. – 2016. – P. 706–710.* DOI: 10.1109/EPEPEMC.2016.7752080

6. ГОСТ IEC 60034-1–2014. *Машины электрические вращающиеся. Ч. 1. Номинальные значения параметров и эксплуатационные характеристики.* – М.: Стандартинформ, 2015. – 58 с.

7. Метельков, В.П. *Оценка ресурса изоляции обмотки статора асинхронного двигателя при работе в циклических режимах* / В.П. Метельков // *Вестник ЮУрГУ. Серия «Энергетика».* – 2013. – Т. 13, № 2. – С. 96–100.

8. Зюзев, А.М. *Учет влияния колебаний температуры обмотки статора на термический ре-*

курс асинхронного двигателя / А.М. Зюзев, В.П. Метельков // *Электротехника: сетевой электронный научный журнал*. – 2015. – Т. 2, № 1. – С. 62–71. DOI: 10.24892/RJEE/20150109

9. Ведяшкин, М.В. Оценка параметров законов распределения отказов обмоток статоров при эксплуатации крановых асинхронных двигателей / М.В. Ведяшкин, О.П. Муравлев // *Известия Томского политехн. ун-та*. – 2011. – Т. 319, № 4. – С. 117–121.

10. Тонких, В.Г. Метод диагностики асинхронных электродвигателей в сельском хозяйстве на основе анализа параметров их внешнего магнитного поля: дис. ... канд. техн. наук / В.Г. Тонких. – Барнаул, 2009. – 181 с.

11. *Fundamentals of a Motor Thermal Model and its Applications in Motor Protection* / B. Venkataraman, B. Godsey, W. Premerlani, E. Shulman et al. // *Proc. of 58th Annual Conf. Protective Relay Engineers*. – Kansas City, USA, 2005. – P. 127–144. DOI: 10.1109/CPRE.2005.1430428

12. Грундулис, А.О. Защита электродвигателей в сельском хозяйстве / А.О. Грундулис. – М.: Колос, 1982. – 140 с.

13. Полковниченко, Д.В. Послеремонтная оценка технического состояния короткозамкнутых асинхронных электродвигателей / Д.В. Полковниченко // *Научные журналы НТУ «ХПИ»: Электротехника и электромеханика*. – 2005. – № 1. – С. 59–62.

14. Пономарев, В.А. Комплексный метод диагностики асинхронных электродвигателей на основе использования искусственных нейронных сетей / В.А. Пономарев, И.Ф. Суворов // *Новости электротехники*. – 2011. – № 2 (68).

15. Ратнер, Н.И. Расчет электроприводов в случайных режимах / Н.И. Ратнер. – М.: Энергия, 1969. – 127 с.

16. Гайдукевич, В.И. Случайные нагрузки силовых электроприводов / В.И. Гайдукевич, В.С. Тутов. – М.: Энергоатомиздат, 1983. – 160 с.

17. *Some peculiarities of the simulation of electric drives with random mode loading* / I.Ya. Braslavskiy, V.P. Metelkov, D.V. Esaulkova, A.V. Kostylev // *Conf. Rec. 2017 International Conference on Industrial Engineering, Applications and Manufacturing (ICIEAM), St. Petersburg, Russia, 16–19 May 2017*. DOI: 10.1109/ICIEAM.2017.8076306

Браславский Исаак Яковлевич, д-р техн. наук, профессор, кафедра «Электропривод и автоматизация промышленных установок», Уральский федеральный университет, г. Екатеринбург; i.ya.braslavskiy@urfu.ru.

Метельков Владимир Павлович, канд. техн. наук, доцент, кафедра «Электропривод и автоматизация промышленных установок», Уральский федеральный университет, г. Екатеринбург; v.p.metelkov@urfu.ru.

Есаулкова Дина Владимировна, ст. преподаватель, кафедра «Электропривод и автоматизация промышленных установок», Уральский федеральный университет, г. Екатеринбург; d.v.esaulkova@urfu.ru.

Костылев Алексей Васильевич, канд. техн. наук, доцент, кафедра «Электропривод и автоматизация промышленных установок», Уральский федеральный университет, г. Екатеринбург; a.v.kostylev@urfu.ru.

Поступила в редакцию 24 мая 2018 г.

DOI: 10.14529/power180310

EVALUATION OF LOAD FLUCTUATIONS IMPACT ON INDUCTION MOTORS INSULATION RESOURCE

I.Ya. Braslavskiy, i.ya.braslavskiy@urfu.ru,

V.P. Metelkov, v.p.metelkov@urfu.ru,

D.V. Esaulkova, d.v.esaulkova@urfu.ru,

A.V. Kostylev, a.v.kostylev@urfu.ru

Ural Federal University, Ekaterinburg, Russian Federation

The research is considered relevant as there is a need for higher reliability and lower fault rate of asynchronous electric drives caused by the failure of the stator winding. The research aims to develop a method to account for the effect of winding temperature changes under load fluctuations on the thermal resource of winding insulation. The investigations were carried out using a 5-node thermodynamic model of a TEFC asynchronous motor operating in the random loading mode. The motor series was clustered with the subsequent creation of a generalized thermodynamic model for each cluster. The parameters of the generalized model were determined with the genetic algorithms method. The simulations based on generalized thermodynamic models allowed generating the expressions for approximate accounting of the impact that the temperature fluctuations have on the acceleration of the insulation thermal resource expenditure. The paper suggests a simple method of accounting of this influence on the stage of selection and verification of the motor during the electric drive design.

Keywords: induction motor, winding heating, stator winding, cluster analysis, random loading, the insulation aging rate.

References

1. Dakin T.W. Electrical Insulation Deterioration Treated as a Chemical Rate Phenomenon, *AIEE Trans.*, 1948, vol. 67, pp. 113–122. DOI: 10.1109/T-AIEE.1948.5059649
2. 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. DOI: 10.3103/S1068371214090090
3. Braslavskiy I.Ya., Metelkov V.P., Kostylev A.V., Esaulkova D.V. Evaluation of Dynamic Properties of the TEFC Induction Motors Thermal Models. *Conf. Proc. 2016 9th Int. Conf. on Power Drives Systems, ICPDS 2016*, Perm, Russian Federation, 3–7 Oct. 2016. DOI: 10.1109/ICPDS.2016.7756677
4. Braslavskiy I.Ya., Metelkov V.P., Esaulkova D.V., Kostylev A.V., Kondakov K.A. Toward the evaluation of the influence of temperature fluctuations on the durability of the stator winding insulation of asynchronous motors in random mode loading. *Conf. Proc. 2016 Int. Symp. on Power Electronics, Electrical Drives, Automation and Motion (SPEEDAM)*, Anacapri, Italy, 22–24 June, 2016. pp. 447–451. DOI: 10.1109/SPEEDAM.2016.7525821
5. Braslavskiy I.Ya., Metelkov V.P., Valtchev S., Esaulkova D.V., Kostylev A.V., Kirillov A.V. Some aspects of the reliability increasing of the transport electric drives. *Conf. Rec. 2016 IEEE International Power Electronics and Motion Control Conference (PEMC)*, Varna, 25–30 Sept. 2016, pp. 706–710. DOI: 10.1109/EPEPEMC.2016.7752080
6. GOST IEC 60034-1–2014. *Mashiny elektricheskoye vrashchayushchiesya. Ch. 1. Nominal'nyye znacheniya parametrov i ekspluatatsionnyye kharakteristiki* [State Standard 60034-1–2014. Rotating electrical machines. Part 1: Rating and performance]. Moscow, Standartinform Publ., 2015. 58 p.
7. Metelkov V.P. [Estimation of a Resource of Induction Motors Stator Winding Insulation in Cyclic Operation]. *Bulletin of the South Ural State University. Ser. Power Engineering*, 2013, vol. 13, no. 2, pp. 96–100. (in Russ.)
8. Zyuzev A.M., Metelkov V.P. [Allowance for the Influence of Temperature Fluctuations on the Induction Motor Stator Winding Thermal Resource]. *Russian Internet Journal of Electrical Engineering*, 2015, vol. 2, no. 1, pp. 62–71. (in Russ.) DOI: 10.24892/RIJEE/20150109
9. Vedyashkin M.V., Muravlev O.P. [Estimation of the Distribution Laws Parameters of the Stator Windings Failures During the Operation of Crane Induction Motors]. *Bulletin of the Tomsk Polytechnic University. Power Engineering*, 2011, vol. 319, no. 4, pp. 117–121. (in Russ.)
10. Tonkikh V.G. *Metod diagnostiki asinkhronnykh elektrodvigateley v sel'skom khozyaystve na osnove analiza parametrov ikh vneshnego magnitnogo polya*. Dis. kand. tekhn. nauk. [The Method of Asynchronous Electric Motors Diagnostics in Agriculture Based on their External Magnetic Field Parameters Analysis. Cand. sci. diss.]. Barnaul, 2009. 181 p.
11. Venkataraman B., Godsey B., Premerlani W., Shulman E. et al. Fundamentals of a Motor Thermal Model and its Applications in Motor Protection. *Proc. of 58th Annual Conf. Protective Relay Engineers*. Kansas City, USA, 2005, pp. 127–144. DOI: 10.1109/CPRE.2005.1430428
12. Grundulis A.O. *Zashchita elektrodvigateley v sel'skom khozyaystve* [Protection of Electric Motors in Agriculture]. Moscow, Kolos Publ., 1982. 140 p.
13. Polkovnichenko D.V. [Post-repair Evaluation of Technical Condition of Squirrel Cage Induction Motors]. *Scientific journals of NTU "KhPI": Electrical engineering and electromechanics*, 2005, no. 1. pp. 59–62. (in Russ.)
14. Ponomarev V.A., Suvorov I.F. [Complex Method of Asynchronous Electric Motors Diagnostics Based on the Use of Artificial Neural Networks]. *News of electrical engineering*, 2011, no. 2 (68). (in Russ.)
15. Ratner N.I. *Raschet elektroprivodov v sluchaynykh rezhimakh* [Calculating Electric Drives in Random Mode]. Moscow, Energiya Publ., 1969. 127 p.
16. Gaidukevich V.I., Titov V.S. *Sluchaynye nagruzki silovykh elektroprivodov* [Random Load of Electrical Power Drive]. Moscow, Energoatomizdat Publ., 1983. 160 p.
17. Braslavskiy I.Ya., Metelkov V.P., Esaulkova D.V. and Kostylev A.V. Some peculiarities of the simulation of electric drives with random mode loading. *Conf. Rec. 2017 International Conference on Industrial Engineering, Applications and Manufacturing (ICIEAM)*, St. Petersburg, Russia, 16–19 May 2017. DOI: 10.1109/ICIEAM.2017.8076306

Received 24 May 2018

ОБРАЗЕЦ ЦИТИРОВАНИЯ

Оценка влияния колебаний нагрузки на ресурс изоляции асинхронных двигателей / И.Я. Браславский, В.П. Метельков, Д.В. Есаулкова, А.В. Костылев // Вестник ЮУрГУ. Серия «Энергетика». – 2018. – Т. 18, № 3. – С. 81–87. DOI: 10.14529/power180310

FOR CITATION

Braslavskiy I.Ya., Metelkov V.P., Esaulkova D.V., Kostylev A.V. Evaluation of Load Fluctuations Impact on Induction Motors Insulation Resource. *Bulletin of the South Ural State University. Ser. Power Engineering*, 2018, vol. 18, no. 3, pp. 81–87. (in Russ.) DOI: 10.14529/power180310