УДК 621.313.333.2 DOI: 10.34031/ES.2022.2.005

АЛГОРИТМ ПЕРЕСЧЕТА ТЕМПЕРАТУРЫ АСИНХРОННОГО ДВИГАТЕЛЯ НА ОСНОВЕ ЭКВИВАЛЕНТНОЙ ТЕПЛОВОЙ СХЕМЫ

Валиуллин К.Р., Тушев С.И.

Оренбургский государственный университет, Оренбург

Аннотация

Диагностика электрооборудования на промышленных предприятиях является актуальной задачей, так как отказ основного и вспомогательного электропривода может привести к значительным экономическим потерям предприятия. Основная доля отказов асинхронных двигателей вызвана их перегрузкой и, соответственно, перегревом статорной обмотки. Такой перегрев приводит либо к межвитковому замыканию и выходу двигателя из строя, либо к значительному снижению его ресурса. Таким образом, контроль температуры обмоток является важной задачей. В данной работе предложен алгоритм расчета температуры асинхронного двигателя с короткозамкнутым ротором при изменяющейся нагрузке на валу с использованием эквивалентной тепловой схемы, состоящей из 10 основных узлов. В работе применены методы математического моделирования с использованием ранее разработанного программного обеспечения, а также Excel.

В работе поставлена задача проверить возможность применения эквивалентной тепловой схемы для динамических режимов работы электрооборудования. Результаты работы позволяют сделать вывод о возможности применения разработанного алгоритма для дальнейшего моделирования как стационарных, так и нестационарных тепловых моделей асинхронных двигателей с короткозамкнутым ротором.

Ключевые слова: *асинхронный двигатель, тепловая модель, нагрев, алгоритмы, режимы работы, электропривод.*

ALGORITHM FOR RECALCULATION OF TEMPERATURE OF ASYNCHRONOUS MOTOR BASED ON EQUIVALENT THERMAL CIRCUIT

Kamil Valiullin, Sergey Tushev

Orenburg State University, Orenburg

Abstract

Diagnostics of electrical equipment at industrial enterprises is an urgent task, since the failure of the main and auxiliary electric drives can lead to significant economic losses for the enterprise. The main share of failures of asynchronous motors is caused by their overload and, accordingly, overheating of the stator winding. Such overheating leads either to an interturn circuit and engine failure, or to a significant reduction in its resource. Therefore, winding temperature control is an important task. In this paper, we propose an algorithm for calculating the temperature of an induction motor with a squirrel-cage rotor with a changing load on the shaft using an equivalent thermal circuit consisting of 10 main nodes. In the work, methods of mathematical modeling were applied using previously developed software, as well as Excel. The task was set to check the possibility of using an equivalent thermal circuit for dynamic modes of operation of electrical equipment. The results of the work allow us to conclude that the developed algorithm can be used for further modeling of both stationary and non-stationary thermal models of asynchronous motors with a squirrel-cage rotor.

Keywords: *asynchronous motor, thermal model, heating, algorithms, operating modes, electric drive.*

Введение

Оценка текущей температуры электродвигателя является актуальной задачей для оценки режима его работы и предотвращения аварийных ситуаций. В некоторых существующих, а также в перспективных системах, данные от температурных датчиков являются входной информацией для системы диагностики и автоматики. На мощных асинхронных двигателях, например АДЧР71 применяются термосопротивления Pt100. Наиболее распространенным типом датчиков являются термосопротивления PTC, сопротивление которых увеличивается по мере их нагрева [1]. Но главным недостатком применения прямого метода измерения температуры является невозможность установки датчиков на уже эксплуатируемые двигатели. Так как наиболее ответственным узлом двигателя является обмотка статора, то установку датчиков необходимо производить именно в эту часть электрической машины, что возможно только на стадии укладки обмоток в пазы статора. Установка датчиков на поверхности корпуса нецелесообразна по двум основным причинам:

1. Наружные датчики будут подвергаться загрязнению, механическому и химическому воздействию;

2. Показания датчиков будут занижены и не будет возможности получения реальной информации о температуре обмоток, а также железа статора, из-за зазора между статором и корпусом, корпус обладает достаточной тепловой инерцией.

Таким образом, для оценки температуры необходимо применять непрямые методы контроля. К таким методам можно отнести стационарные модели на основе эквивалентной тепловой схемы [2-6]. Предложенная модель позволяет получать температуру отдельных узлов асинхронного двигателя с точностью до 10 градусов, а на наиболее важных участках: статорная и лобовая часть обмотки – с точностью до 1-3 градусов. Ключевым недостатком предложенной модели является ее стационарность, то есть данная модель неприменима для изменяющейся нагрузки на валу двигателя.

Материалы и методы

В данной статье поставлена задача устранения этого недостатка путем изменения алгоритма пересчета текущей температуры двигателя при изменяющемся токе статора без применения систем дифференциальных уравнений.

В основе стационарной модели лежит эквивалентная тепловая схема, состоящая из 10 узлов. Схема представлена на рис. 1.

Изменение температуры каждого узла электродвигателя определяется по общей формуле:

$$\Delta T = G^{-1} \cdot \Delta P, \tag{1}$$

где G^{-1} – обратная матрица проводимостей;

ΔP – матрица потерь двигателя, которая складывается из потерь в железе статора, активных потерь обмотки статора, а также добавочных потерь.

При этом потери в обмотке статора ΔP_{ost}, Вт [7]:

$$\Delta P_{ost} = 3 \cdot I_{st}^2 \cdot R_{st}, \tag{2}$$

Изменение нагрузки на валу двигателя приводит к изменению тока статора, следовательно, будут изменяться и потери, которые будут приводить к изменению температуры.

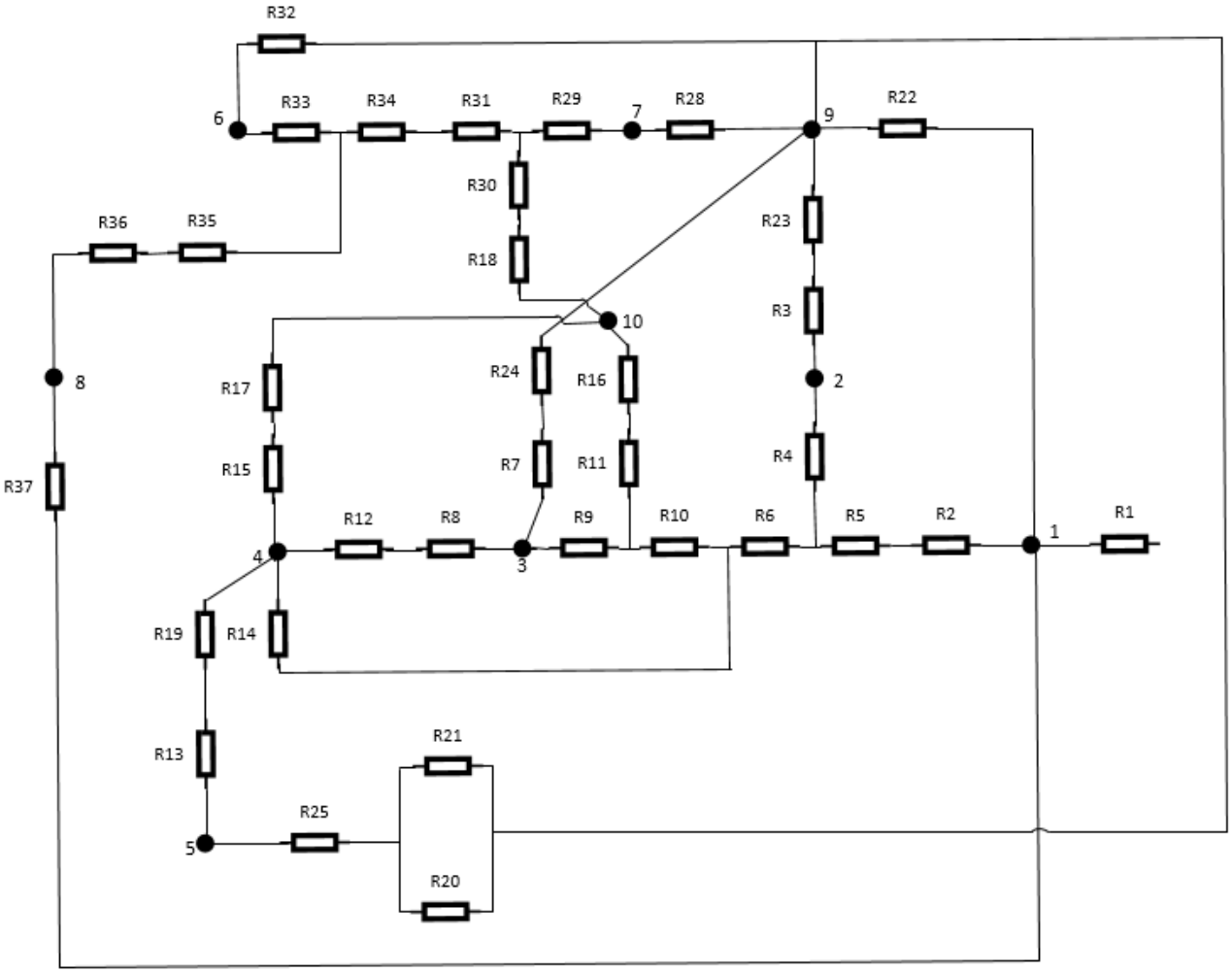

Рис. 1. Эквивалентная тепловая схема

Пересчет температуры производится исходя из ближайшего значения температуры, которое было получено в качестве выходного значения стационарной модели и применения уравнения теплового баланса [8]:

$$\Delta P dt = A\tau dt + Cd\tau, \tag{3}$$

где C – теплоемкость, $\frac{Дж}{К}$;

A – количество тепла, отдаваемого в окружающую среду за 1с при разности температур двигателя и окружающей среды 1 °C

Решением данного уравнения будет:

$$\tau = \left(\tau_{нач} - \tau_{уст}\right)e^{\frac{-t}{T_н}} + \tau_{уст}, \tag{4}$$

где $\tau_{нач}$ – начальное превышение температуры, °C

$\tau_{уст}$ – установившееся превышение температуры, °C

$T_н$ – постоянная времени нагрева [7]:

$$T_н = \frac{c \cdot m}{a \cdot S}, \tag{5}$$

где с – удельная теплоемкость, $\frac{Дж}{кг \cdot °C}$

m – масса элемента машины, кг

a – коэффициент теплоотдачи поверхности, $\frac{Вт}{м^2 \cdot °C}$

S – площадь поверхности, $м^2$.

На рис. 2 показано семейство кривых нагрева двигателя при различной нагрузке

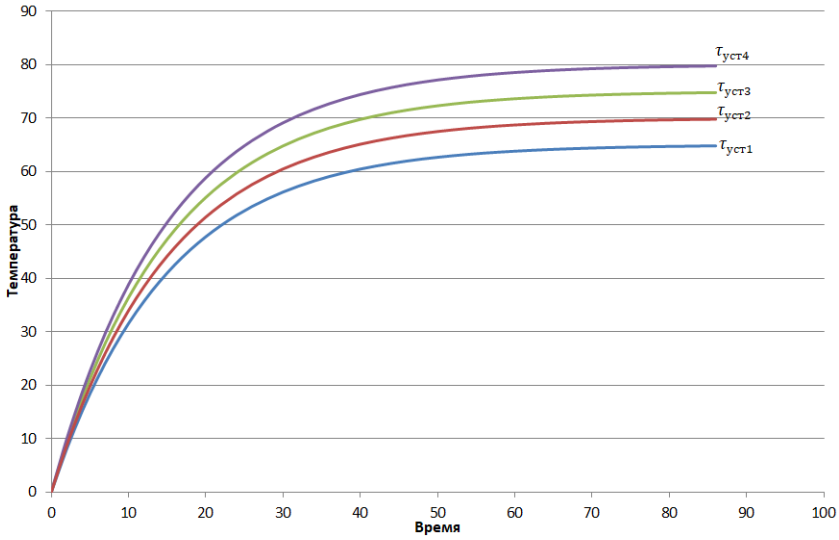

Рис. 2. Семейство кривых нагрева при различной нагрузке на валу двигателя

Данный метод справедлив для оценки изменения температуры при изменении момента от нуля - момента пуска, до установившегося режима, когда известно значение установившегося превышения температуры. Другими словами, для анализа процесса нагрева электродвигателя необходимо знать $\tau_{уст}$, что не всегда возможно, так как электродвигатели могут как не прогреваться до установившегося режима, так и выходить за допустимые значения. В этом случае процесс нагрева разбивают на временные участки, в которых анализируют отдельные зоны нагрева – охлаждения [8]. При непрерывном бездатчиковом контроле температуры данный метод имеет ряд недостатков, связанных с необходимостью определения временных интервалов. Для устранения этих недостатков предлагается алгоритм пересчета температуры электродвигателя на фиксированных интервалах времени при пересчитанных значениях установившегося превышения температуры $\tau_{уст}$ с использованием стационарной модели, представленной на рис. 1.

Алгоритм расчета изменения температуры представлен на рис. 3. Результаты расчета представлены на рис. 4.

При переходе от одного значения тока на другое происходит пересчет установившегося значения превышения температуры, в момент времени изменения тока происходит переход с одной кривой нагрева на другую.

Результаты

Предложенный алгоритм позволяет оценивать изменение температуры отдельного узла электродвигателя, включенного в эквивалентную тепловую схему, при изменяющемся токе статора. Результаты показывают, что данный алгоритм можно применять совместно с стационарной эквивалентной тепловой схемой для анализа тепловых режимов асинхронного двигателя при изменяющейся нагрузке.

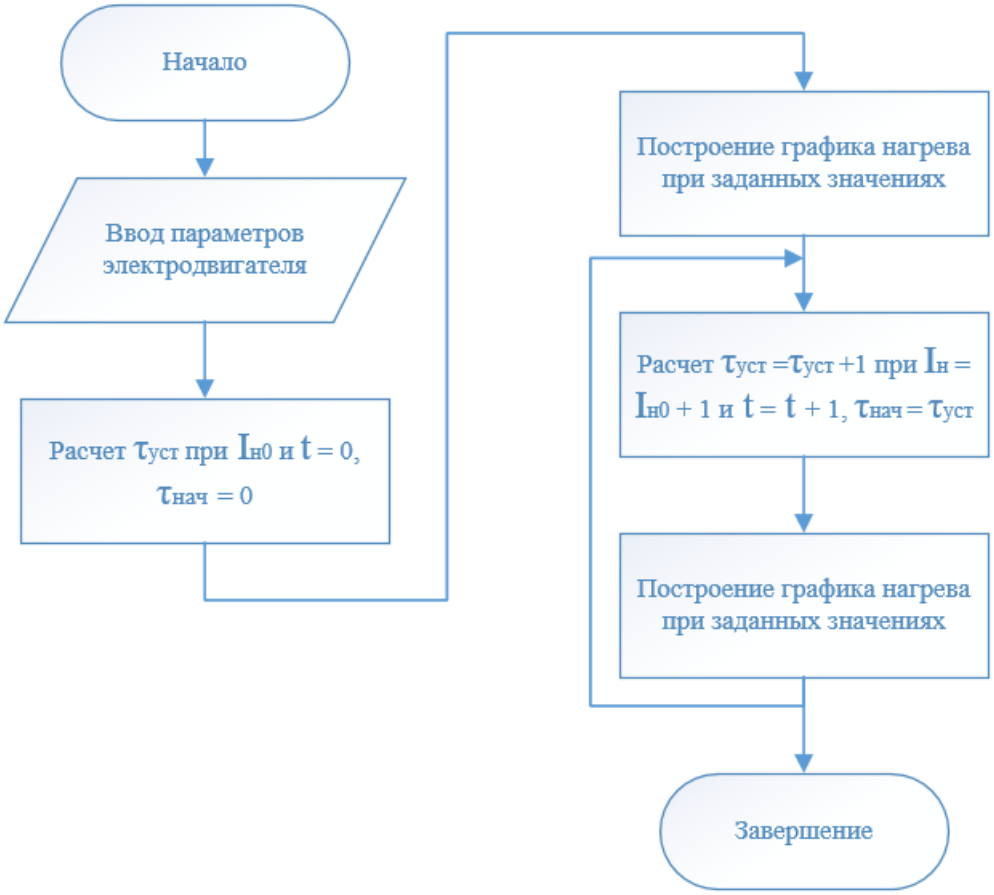

Рис. 3. Блок-схема пересчета температуры при изменяющемся токе нагрузки и установившегося превышения температуры

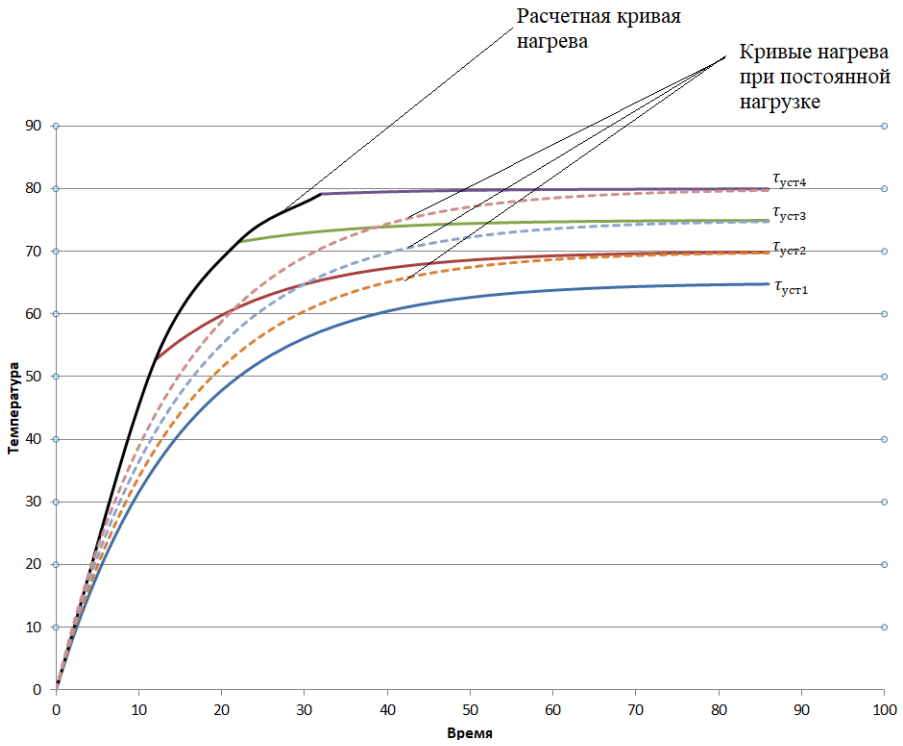

Рис. 4. Пересчет кривой нагрева при изменении нагрузки на валу двигателя

Выводы

В данной работе представлен алгоритм пересчета температуры асинхронного двигателя с короткозамкнутым ротором на основе эквивалентной тепловой схемы. Предложенный алгоритм занимает промежуточное положение между стационарными и нестационарными моделями нагрева

Библиографический список

1. Андрусевич А., Губа А. Термометры сопротивления: от теории к практике // Компоненты и технологии. 2011. №7. 2011. С. 61-66. EDN: NUSJTP
2. Бондаренко Д.А., Кобищанов В.В. Автоматическая система управления температурой тягового асинхронного двигателя тепловоза // Фундаментальные и прикладные проблемы техники и технологии. 2017. № 5(325). С. 177-183. EDN: YOGOGQ
3. Popova L., Nerg, J., Pyrhönen J. Combined electromagnetic and thermal design platform for totally enclosed induction machines // 8th IEEE Symposium on Diagnostics for Electrical Machines, Power Electronics & Drives. Bologna: IEEE, 2011. P. 153-158. DOI: 10.1109/DEMPED.2011.6063617
4. Kylander G. Thermal modelling of small cage induction motors: Diss. … PhD. Göteborg: Chalmers University of Technology, 1995. 113 p.
5. Зюзев А.М., Метельков В.П. Двухканальная термодинамическая модель асинхронного двигателя для систем тепловой защиты // Электротехнические системы и комплексы. 2018. №2(39). С. 4-11. EDN: XRORUT. DOI 10.18503/2311-8318-2018-2(39)-4-11
6. Зюзев А.М., Метельков В.П. Учет колебаний температуры обмотки статора асинхронного двигателя при проверке по нагреванию в повторно-кратковременном режиме // Известия Томского политехнического университета. 2015. № 4. С. 146–153. EDN: UCHDRZ
7. Копылов, И. П., Гольдберг О.Д., Клюков Б.К. Проектирование электрических машин. М.: Высшая школа, 2002. 757 с.
8. Бекишев Р.Ф., Дементьев Ю.Н. Общий курс электропривода:. Томск: Изд-во ТПУ, 2010. 302 с.

References

1. Andrusevich, A., & Guba, A. (2011). Termometry soprotivleniya: ot teorii k praktike [Resistance thermometers: from theory to practice]. *Components and technologies, 7*, 61-66.
2. Bondarenko, D. A., & Kobishchanov, V. V. (2017). Avtomaticheskaya sistema upravleniya temperaturoy tyagovogo asinkhronnogo dvigatelya teplovoza [Automatic temperature control system for a diesel locomotive traction asynchronous engine]. *Fundamental'nye i prikladnye problemy tekhniki i tekhnologii. 5(325),* 177-183.
3. Popova, L., Nerg, J. & Pyrhönen J. (2011). Combined electromagnetic and thermal design platform for totally enclosed induction machines. In *Proc. 8th IEEE Symposium on Diagnostics for Electrical Machines, Power Electronics & Drives* (pp. 153-158). IEEE. http://dx.doi.org/10.1109/DEMPED.2011.6063617.
4. Kylander, G. (1995). Thermal modelling of small cage induction motors [Doctoral dissertation, Chalmers University of Technology]. http://webfiles.portal.chalmers.se/et/PhD/KylanderGunnarPhD.pdf
5. Zyuzev, A. M., & Metelkov, V. P. (2018). Dvukhkanal'naya termodinamicheskaya model' asinkhronnogo dvigatelya dlya sistem teplovoy zashchity [Two-channel thermodynamic model of an asynchronous motor for thermal protection systems]. *Elektrotekhnicheskie sistemy i kompleksy , 2 (39)*, 4-11. https://www.doi.org/10.18503/2311-8318-2018-2(39)-4-11
6. Zyuzev, A. M., & Metelkov, V. P. (2015). Uchet kolebaniy temperatury obmotki statora asinkhronnogo dvigatelya pri proverke po nagrevaniyu v povtorno-kratkovremennom rezhime [Accounting for fluctuations in the temperature of the stator winding of an asynchronous motor when checking for heating in the intermittent mode]. *Bulletin of the Tomsk Polytechnic University, 4,* 146-153.
7. Kopylov, I. P., Goldberg, O. D., & Klyukov, B. K. (2002). Proyektirovaniye elektricheskikh mashin [*Design of electrical machines*]. Higher School.

8. Bekishev, R. F., & Dementiev, Yu. N. (2010). *Obshchiy kurs elektroprivoda: uchebnoye posobiye* [*General course of electric drive: study guide*]. Publishing House of Tomsk Polytechnic University

Сведения об авторах

Валиуллин Камиль Рафкатович, канд. техн. наук, доцент. Кафедра электро- и теплоэнергетики; Институт энергетики, электроники и связи; Оренбургский государственный университет, Оренбург.

E-mail: valiullinkamil91@gmail.com

SPIN-код: 5609-2844

Тушев Сергей Игоревич, аспирант. Кафедра автоматизированного электропривода, электромеханики и электротехники; Институт энергетики, электроники и связи; Оренбургский государственный университет, Оренбург.

E-mail: s_tushev@inbox.ru

Authors about

Kamil R. Valiullin, candidate of technical sciences, associate professor. Department of Electric and Thermal Power Engineering; Institute of Energy, Electronics and Communications; Orenburg State University, Orenburg. valiullinkamil91@gmail.com

Sergey I. Tushev, post-graduate student. Department of automated electric drive, electromechanics and electrical engineering; Institute of Energy, Electronics and Communications; Orenburg State University, Orenburg. s_tushev@inbox.ru