

осуществляется торможением двух винтовых колес (рис. 3, б) под действием генераторного момента $M_{ген}$. С силами F_1 и F_2 , действуя на полуколеса с помощью рычага, винтовые колеса стараются сдвинуть их в противоположенном направлении. После этого винтовые колеса подвергаются полному торможению. Изменение сил F_1 и F_2 пропорционально значению момента M_1 дает возможность создать надежную механическую связь по всему диапазону генераторного режима.

ВЫВОДЫ

Разработана часть бортовой электрической сети – схема одномашинной системы преобразования – стартер-генератор, дан анализ принципам работы конструктивного комплекса при переводе системы в разные режимы: стартера и генератора.

Предложен новый конструктивный элемент системы – пускопереключающее устройство с функциональными особенностями, проанализирована его работа в комплексе с ДВС.

Дана оценка технико-экономическим параметрам при замене комплекса стартер-генератор, действующего в

настоящее время, что позволило уменьшить количество крепежных деталей и соответственно, уменьшить общий вес стартер-генераторного комплекса.

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. *Копылов, И. П.* Проектирование электрических машин / [Копылов И. П., Горяинов Ф. А., Клопов Б. К. и др.]. – М. : Энергия, 1980. – 470 с.
2. Пат. Азербайджанская Республика. Одномашинная система электромеханического преобразования / З. Н. Мусаев. – № 1990212; опубл. 01.12.1999.
3. Техническая эксплуатация автомобилей / под ред. Г. В. Крамаренко. – М. : Транспорт. – 1983. – 488 с.
4. *Копылов, И. П.* Электрические машины / И. П. Копылов. – М. : Высшая школа, 2004. – 395 с.
5. *Мусаев, З. Н.* Применение одномашинной системы в бортовой сети электрооборудования / З. Н. Мусаев / Вісник Кременчуцького державного політехнічного університету. – 2008. – Вип. 3. (Ч. 2.). – С. 31–33.

*Стаття надійшла до редакції 04.02.2011.
Після доробки 05.09.2012.*

С. А. Ханахмедова

Стартер-генератор на борті рухливих установок

Робота присвячена розв'язку питання створення одномашинної електричної мережі на борті рухливих установок. Дано поняття про конструктивні особливості нової системи стартер-генератора, проаналізовані режими стартера й генератора, надана силова електрична схема з аналізом переходу системи в стартерний і генераторний режими. Наведено принцип дії приводного обладнання і принципи переводу стартер-генератора в той або інший режим.

Ключові слова: стартер-генератор, колектор, випрямляч, гальмовий диск, шків, важіль, пусковий перемикаючий обладнання, колінчатий вал.

S. A. Khanakhmedova

Starter-generator at the onboard of mobile installations

Work is devoted to the decision of a question of creation of a one-machine electric network on board of mobile installations. It is given concept about design features of the new starter-generator system, starter and generator modes are analyzed, the power electric scheme with the analysis of system transition in a starter and a generating mode is given. The principle of their action and principles of the starter-generator transfer in this or that mode is given.

Key words: starter-generator; collector; rectifier; brake disk; pulley; lever; starting switching device, a crankshaft.

УДК 621.313

А. М. Зюзев¹, В. П. Метельков²

¹Д-р. тех. наук, профессор Уральского федерального университета имени первого Президента России Б. Н. Ельцина, г. Екатеринбург

²Канд. тех. наук, доцент Уральского федерального университета имени первого Президента России Б. Н. Ельцина, г. Екатеринбург

ОПРЕДЕЛЕНИЕ ПАРАМЕТРОВ ДВУХМАССОВОЙ ТЕПЛОВОЙ СХЕМЫ АСИНХРОННОГО ЭЛЕКТРОДВИГАТЕЛЯ ПО РЕЗУЛЬТАТАМ ЭКСПЕРИМЕНТА

Рассмотрена задача определения параметров упрощенной термодинамической модели асинхронного двигателя с учетом результатов эксперимента. Приведены результаты расчета нагрева обмотки статора, выполненные с использованием предлагаемой модели.

Ключевые слова: термодинамическая модель, асинхронный двигатель, параметры.

Для исследования процессов нагрева асинхронного двигателя (АД) в режимах работы с интенсивным тепло-

выделением практически не пригодна широко известная простейшая одномассовая термодинамическая мо-

дель, где двигатель рассматривается как однородное тело. Для этих случаев требуются более подробные термодинамические модели, позволяющие более адекватно оценивать температуру обмотки статора, так как изоляция обмотки является наиболее критичным к уровню нагрева элементом конструкции двигателя [1, 2]. При формировании таких более подробных моделей возникает проблема, связанная с определением их параметров в условиях недостатка исходных данных о двигателе, которые бы позволили расчетным путем получить эти параметры. Одним из путей, позволяющих частично обойти указанные трудности, является использование результатов эксперимента.

Целью данной работы является разработка методики определения параметров термодинамической модели АД с использованием экспериментальных данных.

Эксперимент проводился на двигателе МТФ012-6 (2,2 кВт, ПВ 40 %) в режиме холостого хода ($I_{\text{лхх}} = 5,3 \text{ А}$). Нагрев обмотки статора двигателя фиксировался с помощью трех термопар, расположение которых показано на рис. 1.

Аппроксимацию экспериментальных кривых нагрева можно выполнить с использованием термодинамических моделей разного уровня сложности. Термодинамическая модель электрического двигателя может быть представлена в виде более или менее сложной тепловой схемы, каждому узлу которой соответствует свое дифференциальное уравнение. Известно, что аналитическим решением системы линейных дифференциальных уравнений является функция, содержащая сумму экспонент, количество которых равно количеству элементов узлов тепловой схемы. Каждая экспонента в решении содержит свою постоянную времени, величина которых в общем случае различна. Некоторые постоянные времени могут не слишком значительно различаться по величине. Поэтому представляются непродуктивными попытки «выделить» близкие по постоянным времени экспоненты из экспериментально полученных графиков нагрева, содержащих погрешности и помехи разного рода.

Вместе с тем, как было показано в [3], для последования особенностей нагрева статора АД, во многих случаях может быть использована двухмассовая термодинамическая модель, где в качестве одного из узлов рассматривается медь обмотки, а в качестве второго – сталь статора с другими элементами конструкции двигателя. В такой термодинамической модели процессы нагрева

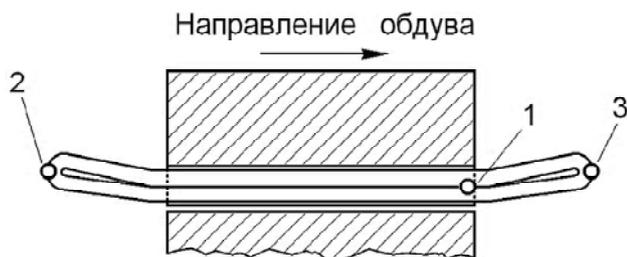


Рис. 1. Схема расположения термопар

определяются двумя экспонентами с существенно отличающимися по величине постоянными времени [2]. Большое различие между двумя постоянными времени упрощает их нахождение по экспериментальным кривым. Поэтому представляется целесообразным использование именно такой двухмассовой модели с целью обработки экспериментальных результатов.

В соответствии с изложенным выше используем для аппроксимации экспериментальных графиков двухмассовую термодинамическую схему, показанную на рис. 2. Эта схема содержит два узла 1 и 2 с источниками тепла ΔP_1 и ΔP_2 , теплоемкостями C_1 и C_2 , а также тепловые проводимости $\lambda_{10}, \lambda_{12}, \lambda_{20}$.

Процессы в схеме описываются системой из двух дифференциальных уравнений:

$$\begin{aligned} C_1 \frac{d\tau_1}{dt} + \lambda_{11}\tau_1 - \lambda_{12}\tau_2 &= \Delta P_1; \\ C_2 \frac{d\tau_2}{dt} + \lambda_{22}\tau_2 - \lambda_{12}\tau_1 &= \Delta P_2, \end{aligned} \tag{1}$$

где $\lambda_{11} = \lambda_{10} + \lambda_{12}$ и $\lambda_{22} = \lambda_{20} + \lambda_{12}$.

Решение системы (1) можно представить в следующем виде:

$$\tau_1 = \tau_{1\text{уст}} - A_1 e^{-\frac{t}{T_1}} - A_2 e^{-\frac{t}{T_2}}, \tag{2}$$

где τ_1 – превышение температуры меди статора над температурой окружающей среды, а $\tau_{1\text{уст}}$ – его установившееся значение; A_1 и A_2 – коэффициенты, величина которых определяется параметрами двухмассовой термодинамической модели; T_1 и T_2 – постоянные времени, определяемые корнями характеристического уравнения системы (1). Очевидно, что $\tau_{1\text{уст}} = A_1 + A_2$.

Величины A_1, A_2, T_1 и T_2 будем рассматривать как неизвестные, значения которых следует подобрать таким образом, чтобы модельная функция (2) наилучшим образом соответствовала экспериментальной зависимости τ_{13} . В качестве τ_{13} будем использовать среднее значение по трем термопарам. Для компенсации тепловой инерционности термопар выполним сдвиг по времени числовых рядов показаний термопар таким образом, чтобы исключить нулевые значения на начальном этапе измерений. Задача подбора A_1, A_2, T_1 и T_2 в данном случае может рассматриваться как оптимизационная задача, то есть задача нахождения минимума некоторой це-

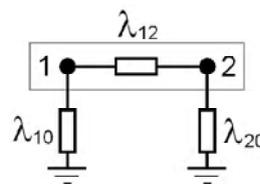


Рис. 2. Схема двухмассовой термодинамической модели статора

левой функции, формируемой с использованием временных рядов τ_1 и $\tau_{1\text{уст}}$ в пространстве с координатами $x_1 = A_1$; $x_2 = A_2$; $x_3 = T_1$; $x_4 = T_2$. В качестве целевой функции выберем σ_τ – среднее квадратичное отклонение τ_1 от $\tau_{1\text{уст}}$.

В настоящее время существует достаточно хорошо разработанный инструментарий для решения таких оптимизационных задач. Исследование зависимости целевой функции от A_1, A_2, T_1 и T_2 показывают, что она имеет единственный глобальный экстремум. В таком случае целесообразно использовать простые градиентные методы поиска экстремума, например функцию *fminunc* из пакета *Matlab*, реализующую алгоритм *'Quasi-Newton line search'*. С использованием указанного инструмента получаем следующие результаты: $A_1 = 0,8058$ мВ; $A_2 = 3,7829$ мВ; $T_1 = 1,8846$ мин; $T_2 = 51,6529$ мин. Среднее квадратичное отклонение $\sigma_\tau = 0,03510$ мВ (или 0,76 % от установившегося значения).

При использовании термодинамической модели электродвигателя для исследования процессов нагрева малой длительности (до нескольких десятков секунд) приходится принимать во внимание тот факт, что на коротких промежутках времени обмотка греется почти адиабатически и ее температура изменяется по закону, близкому к линейному с большим значением производной $d\tau / dt$ [4]. Это обстоятельство требует, чтобы производная аппроксимирующей кривой $\tau(t)$ при $t \rightarrow 0$ стремилась к адиабатическому значению $\Delta P_1 / C_1$. Такую уточненную аппроксимацию можно выполнить, если располагать информацией о двигателе, позволяющей определить теплоемкость обмотки статора C_1 . В частности, в литературе можно найти информацию о массе обмотки статора для некоторых серий АД [5,6]. При наличии сведений о плотности тока в обмотке статора при номинальном токе (такие сведения, например, приведены в [7] для двигателей МТКФ и МТКН) есть возможность непосредственно рассчитать $\dot{\tau}_{1\text{нач}} / \tau_{1\text{уст}}$, а также определить теплоемкость C_1 .

Также можно рассчитать теплоемкость обмотки непосредственно по данным эксперимента для определения постоянных времени, используя замеры на начальном промежутке времени. Получим аппроксимирующее выражение, учитывающее заданный темп изменения температуры обмотки на начальном этапе нагрева. Для нагрева от температуры окружающей среды решение может быть представлено в следующем виде:

$$\tau_1 = \tau_{1\text{уст}} \left[1 - \frac{T_1 T_2}{T_2 - T_1} \left(\frac{\dot{\tau}_{1\text{нач}}}{\tau_{1\text{устN}}} - \frac{1}{T_2} \right) e^{-\frac{t}{T_1}} + \frac{T_1 T_2}{T_2 - T_1} \left(\frac{\dot{\tau}_{1\text{нач}}}{\tau_{1\text{устN}}} - \frac{1}{T_1} \right) e^{-\frac{t}{T_2}} \right] \quad (3)$$

Здесь $\dot{\tau}_{1\text{нач}} = (d\tau / dt)_{\text{нач}} = \Delta P_1 / C_1$; $\tau_{1\text{устN}} = 115^\circ\text{C}$ (для изоляции класса *F*). При таком подходе в качестве неизвестных, подлежащих определению выступают величины $\tau_{1\text{уст}}$, T_1 и T_2 . Как видно из рис. 3, целевая функция при использовании аппроксимирующего выражения (3) имеет единственный глобальный экстремум относительно T_1 и T_2 .

С использованием алгоритма *'Quasi-Newton line search'* получаем следующие результаты: $\tau_{1\text{уст}} = 4,5457$ мВ; $T_1 = 1,4233$ мин; $T_2 = 49,5961$ мин. Среднее квадратичное отклонение $\sigma_\tau = 0,0384$ мВ (или 0,845 % от установившегося значения).

На рис. 4 показан начальный участок температурной кривой при аппроксимации с помощью выражения (3), откуда видно достаточно хорошее соответствие экспериментальным точкам на начальном участке нагрева.

Записав систему (1) для установившегося номинального режима и дополнив ее выражениями для постоянных времени, получим систему из четырех уравнений, которую можно использовать для определения неизвестных параметров тепловой схемы:

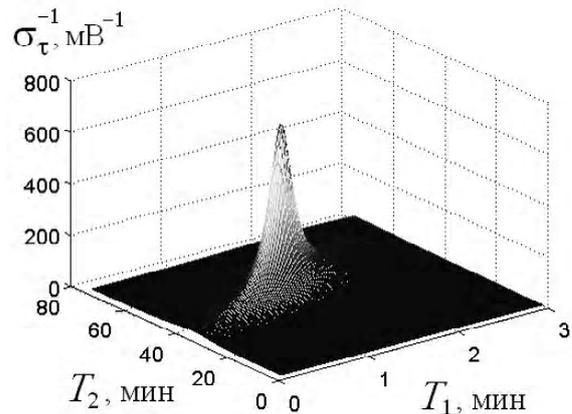


Рис. 3. Зависимость σ_τ от T_1 и T_2 для аппроксимирующей функции (3)

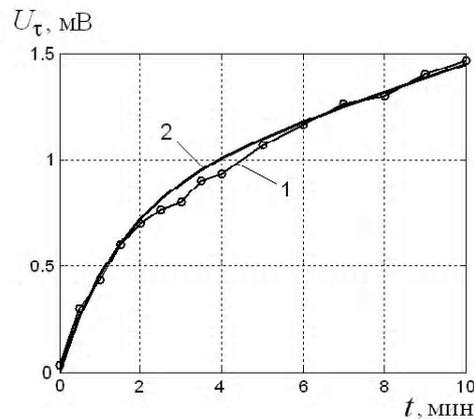


Рис. 4. Экспериментальные точки и аппроксимация функцией (3)

$$\begin{aligned} \frac{\lambda_{11}}{C_1} - \frac{\lambda_{12}}{C_1} \vartheta &= \frac{\dot{\tau}_{1\text{нач}N}}{\tau_{1\text{уст}N}}; \\ \frac{\lambda_{22}}{C_1} \vartheta - \frac{\lambda_{12}}{C_1} &= \frac{\Delta P_2}{\Delta P_1} \cdot \frac{\dot{\tau}_{1\text{нач}N}}{\tau_{1\text{уст}N}}, \\ T_1 &= \frac{2C_1C_2}{\lambda_{11}C_2 + \lambda_{22}C_1 + W}; \\ T_2 &= \frac{2C_1C_2}{\lambda_{11}C_2 + \lambda_{22}C_1 - W}, \end{aligned} \quad (4)$$

где

$$W = \left(C_1^2 \lambda_{22}^2 - 2C_1C_2\lambda_{11}\lambda_{22} + C_2^2 \lambda_{11}^2 + 4C_1C_2\lambda_{12}^2 \right)^{0,5}.$$

Здесь $\vartheta = \tau_{2\text{уст}} / \tau_{1\text{уст}}$ – коэффициент соотношения превышений температур в установившемся режиме (значение $\vartheta < 1$, так как температура стали машины в номинальном установившемся режиме, как правило на несколько градусов ниже температуры меди обмотки); $\dot{\tau}_{1\text{нач}} = \Delta P_1 / C_1$ – начальный темп изменения температуры узла 1 в режиме нагрева, а ΔP_1 – мощность потерь в этом узле.

Решив систему (1) для установившегося режима, получим установившиеся значения перегрева узлов термодинамической системы:

$$\begin{aligned} \tau_{1\text{уст}} &= \frac{\Delta P_1 \lambda_{22} + \Delta P_2 \lambda_{12}}{\lambda_{10} \lambda_{20} + \lambda_{10} \lambda_{12} + \lambda_{20} \lambda_{12}}; \\ \tau_{2\text{уст}} &= \frac{\Delta P_2}{\lambda_{22}} + \frac{\lambda_{12}}{\lambda_{22}} \cdot \frac{\Delta P_1 \lambda_{22} + \Delta P_2 \lambda_{12}}{\lambda_{10} \lambda_{20} + \lambda_{10} \lambda_{12} + \lambda_{20} \lambda_{12}}, \end{aligned}$$

откуда выразим ϑ :

$$\vartheta = \frac{1}{\lambda_{22}} \left[\lambda_{12} + \frac{\lambda_{10} \lambda_{20} + \lambda_{10} \lambda_{12} + \lambda_{20} \lambda_{12}}{\frac{\Delta P_1}{\Delta P_2} \lambda_{22} + \lambda_{12}} \right].$$

Система (4) является нелинейной системой из четырех уравнений, содержащей четыре неизвестные – λ_{11} , λ_{22} , λ_{12} , C_2 , и, следовательно, может быть решена численными методами. Для ее решения можно воспользоваться стандартными программными продуктами, например, функцией *fsolve* из пакета *Matlab*. Величина C_1 в рассматриваемом случае равна 936 Вт·с/°С.

Соотношения (2) и (3), использованные для аппроксимации результатов эксперимента, являются решениями системы (1) для случая постоянной во времени мощности потерь ΔP_1 и ΔP_2 . Однако, при проведении экспе-

римента, величина ΔP_1 изменялась из-за увеличения сопротивления обмотки статора по мере ее нагрева. Подобное изменение мощности потерь создает эффект изменения постоянных времени.

Запишем систему (1) при учете температурного роста сопротивления обмотки:

$$\begin{aligned} C_1 \frac{d\tau_1}{dt} + \lambda_{11}\tau_1 - \lambda_{12}\tau_2 &= \Delta P_{10}(1 + k_\tau \tau_1); \\ C_2 \frac{d\tau_2}{dt} + \lambda_{22}\tau_2 - \lambda_{12}\tau_1 &= \Delta P_2, \end{aligned} \quad (5)$$

где ΔP_{10} – мощность потерь в обмотке при сопротивлении для исходной температуры эксперимента; k_τ – температурный коэффициент для меди.

Очевидно, что систему (5) можно переписать в следующем виде:

$$\begin{aligned} C_1 \frac{d\tau_1}{dt} + \lambda'_{11}\tau_1 - \lambda_{12}\tau_2 &= \Delta P_{10}; \\ C_2 \frac{d\tau_2}{dt} + \lambda_{22}\tau_2 - \lambda_{12}\tau_1 &= \Delta P_2, \end{aligned}$$

где $\lambda'_{11} = \lambda_{11} - \Delta P_{10}k_\tau$.

Поскольку $\lambda'_{11} < \lambda_{11}$, это приводит к эффекту, проявляющемуся как увеличение постоянных времени нагрева. Это обстоятельство следует учитывать при определении параметров термодинамической схемы. Поэтому определение параметров термодинамической модели проведем в два этапа.

На первом этапе, решив систему (4), определим тепловые проводимости по исходным (не скорректированным) значениям постоянных времени. Величину $\tau_{1\text{уст}N}$ принимаем 115°С, при расчете $\dot{\tau}_{1\text{нач}}$ принимаем $\Delta P_1 = 418,6$ Вт – номинальную величину потерь в меди для продолжительного режима работы, получаем $\lambda_{11} = 10,54$ Вт/°С. Скорректируем λ_{11} , добавив $\Delta P_{10}k_\tau = 240 \cdot 0,0039$. С новым значением λ_{11} найдем скорректированные значения постоянных времени: $T_1 = 78,9$ с и $T_2 = 2688,0$ с. На втором этапе снова решим систему (4) при скорректированных значениях постоянных времени и найдем искомые параметры термодинамической модели: $\lambda_{11} = 11,33$ Вт/°С; $\lambda_{22} = 14,04$ Вт/°С; $\lambda_{12} = 9,55$ Вт/°С; $C_2 = 15319$ Вт·с/°С.

На рис. 5 показаны экспериментальные точки и кривая нагрева, полученная с помощью построенной в *Simulink* двухмассовой термодинамической модели с параметрами, определенными по описанной выше методике при учете температурного изменения сопротивления обмотки статора.

Как видим, двухмассовая термодинамическая модель весьма точно отражает особенности изменения температуры обмотки статора асинхронного двигателя в интен-

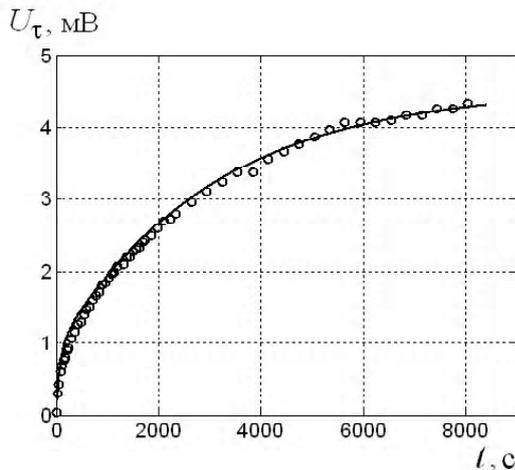


Рис. 5. Экспериментальные точки и расчетная кривая нагрева, полученная с помощью модели

сивных процессах нагрева и может быть использована для оценки теплового состояния двигателя при работе в кратковременном и повторно-кратковременном режимах.

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. Синайлов, Г. А. Тепловые гидравлические и аэродинамические расчеты в электрических машинах / Си-

пайлов Г. А., Санников Д. И., Жадан В. А. – М. : Высш. шк., 1989. – 239 с.

2. Федоров, М. М. Динамические тепловые модели узлов электрических машин / Федоров М. М. // Электромашинобудовання та електрообладнання : міжвід. наук.-техн. зб. – 1999. – Вип. 53. – С. 70–73.

3. Зюзев, А. М. Термодинамическая модель асинхронного двигателя для электроприводов с интенсивными процессами тепловыделения: / А. М. Зюзев, В. П. Метельков. – Известия ТулГУ. Технические науки. Вып. 3: в 5 ч. Тула : ТулГУ, 2010. – Ч.1. – С. 138–145.

4. Филиппов, И. Ф. Теплообмен в электрических машинах [Текст] : учеб. пособие / Филиппов И. Ф. – Л. : Энергоатомиздат, 1986. – 256 с.

5. Асинхронные двигатели серии 4А : справочник / А. Э. Кравчик, М. М. Шлаф, В. И. Афонин, Е. А. Соболенская. – М. : Энергоиздат, 1982. – 504 с.

6. Крановое оборудование : справочник / Алексеев Ю. И., Богословский А. П., Певзнер Е. М. и др.; под ред. А. А. Рабиновича. – М. : Энергия, 1979. – 240 с.

7. Яуре, А. Г. Крановый электропривод / А. Г. Яуре, Е. М. Певзнер. – М. : Энергоатомиздат, 1988. – 344 с.

Стаття надійшла до редакції 07.02.2011.
Після доробки 25.04.2012.

А. М. Зюзев, В. П. Метельков

Визначення параметрів двомасової теплової схеми асинхронного електродвигуна за результатами експерименту

Розглянута задача визначення параметрів спрощеної термодинамічної моделі асинхронного двигуна з урахуванням результатів експерименту. Наведені результати розрахунку нагріву обмотки статора, виконані з використанням моделі, яка пропонується.

Ключові слова: термодинамічна модель, асинхронний двигун, параметри.

A. M. Zuzev, V. P. Metelkov

Determination of the parameters of two-mass thermal circuit of induction motors based on the results of experiment

The problem of determination of the parameters of the simplified thermodynamic model of the induction motor with experimental data was observed. The results of heating process calculations, fulfilled with proposed model, are presented.

Key words: thermodynamic model, induction motor, parameters.