УДК 621.313.33

DOI: 10.31563/1684-7628-2019-49-1-126-132

И.Р. Кафиев, Р.Р. Нугуманов

МОДЕЛИРОВАНИЕ ТЕПЛОВОГО СОСТОЯНИЯ ДВУХСТОРОННЕГО ЛИНЕЙНОГО АСИНХРОННОГО ДВИГАТЕЛЯ

Ключевые слова: *тепловое состояние; математическая модель; двухсторонний линейный асинхронный двигатель; схема замещения; устройство для помола зерна с жерновами.*

Введение. Линейные асинхронные двигатели (ЛАД) благодаря своим преимуществам перед вращающимися машинами, такими, как конструктивная простота, отсутствие электриче-

ского контакта со вторичным элементом (ВЭ), возможность получения большого диапазона линейных скоростей и перемещений без использования кинематических связей, находят все более широкое применение в приводах сельскохозяйственных машин. На их основе разработаны: транспортер влажного сахара [1]; установка, предназначенная для сепарации зернового материала [2]; режущий аппарат, который может быть использован в кормоуборочных машинах [3]; насосная установка для применения в системах водоснабжения сельскохозяйственных предприятий [4] и т. д. Одной из распространенных причин отказов асинхронных двигателей является повреждение обмоток, которое обусловлено

тепловым старением изоляции [5]. Поэтому большой интерес представляет моделирование теплового состояния двухстороннего ЛАД.

Цель исследования: определение математическим моделированием изменение температуры составных частей двухстороннего ЛАД в приводе устройства для помола зерна с жерновыми.

Задачи исследования: разработать математическую модель теплового состояния двухстороннего ЛАД и программу, реализующую данную модель; с использованием предложенной модели определить, как изменяется температура составных частей двухстороннего ЛАД в приводе устройства для помола зерна с жерновыми.

Рисунок 1

Конструкция ЛАД в приводе устройства для помола зерна с жерновыми:

1 – корпус; 2 – загрузочный бункер; 3 – приемные емкости; 4 – ось; 5, 6 – индукторы ЛАД; 7 – вторичный элемент ЛАД, выполненный в виде диска; 8 – верхний жернов; 9 – нижний жернов; 10 – подшипниковая опора; I, II, III, IV – мелющие поверхности жерновов

Условия, материалы и методы исследования. Объектом исследования является двухсторонний плоский ЛАД, используемый в приводе устройства для помола зерна с жерновыми, конструкция которого приведена на рисунке 1 [6]. Характеристики двигателя: фазное напряжение – 220 В; частота питающей сети – 50 Гц; мощность – 4,0 кВт; коэффициент полезного действия $\eta = 0,6$; номинальное скольжение $S = 0,3$; режим работы – продолжительный (S1); класс изоляции – F. Двухсторонний ЛАД состоит из двух одинаковых индукторов и ВЭ, расположенного между индукторами. Габаритные размеры индукторов – 168 × 168 × 45 мм. ВЭ представляет собой алюминиевый диск наружным диаметром 0,7 м и толщиной 0,004 м. Между индук-

торами и ВЭ одинаковый воздушный зазор, равный 0,002 м. Параметры жерновой мельницы: диаметр жерновов – 0,2 м; масса подвижного жернова мельницы $m = 2,8$ кг; коэффициент вязкого трения (зерно яровой пшеницы в рабочем зазоре) $\beta = 49,5$ Н·с/м; скорость движения потока зерна $V_2 = 3,74$ м/с; сила сухого трения (коэффициент трения продукта и камня $f_c = 0,71$) $F_{сmp} = 19,75$ Н.

Математическое описание теплового состояния ЛАД проводим в соответствии с принятыми допущениями: теплоемкости составных частей двигателя постоянны; ВЭ вращается с постоянной линейной скоростью; температура окружающей среды принимается постоянной и равной 40 °С; подача зернового материала из

загрузочного бункера производится после выхода ЛАД в установившийся режим.

Эквивалентная тепловая схема замещения ЛАД представлена на рисунке 2.

Рисунок 2

Тепловая схема замещения двухстороннего линейного ЛАД:

1 – обмотка первого индуктора; 2 – сердечник первого индуктора; 3 – вторичный элемент (вторичная цепь) ЛАД; 4 – обмотка второго индуктора; 5 – сердечник второго индуктора; G_1, G_2, G_3, G_4, G_5 – тепловые проводимости от обмотки и сердечника первого индуктора, ВЭ, обмотки и сердечника второго индуктора во внешнюю среду; $G_{12}, G_{23}, G_{31}, G_{34}, G_{45}, G_{53}$ – тепловые проводимости между составными частями ЛАД

Результаты исследования. Разработанная математическая модель теплового состояния

двухстороннего ЛАД – это система из пяти уравнений:

$$\begin{cases} C_1 \frac{d\theta_1}{dt} = P_1 - G_1\theta_1 + G_{12}(\theta_2 - \theta_1) + G_{31}(\theta_3 - \theta_1); \\ C_2 \frac{d\theta_2}{dt} = P_2 - G_2\theta_2 + G_{12}(\theta_1 - \theta_2) + G_{23}(\theta_3 - \theta_2); \\ C_3 \frac{d\theta_3}{dt} = P_3 - G_3\theta_3 + G_{23}(\theta_2 - \theta_3) + G_{13}(\theta_1 - \theta_3) + G_{34}(\theta_4 - \theta_3) + G_{35}(\theta_5 - \theta_3); \\ C_4 \frac{d\theta_4}{dt} = P_4 - G_4\theta_4 + G_{45}(\theta_5 - \theta_4) + G_{34}(\theta_3 - \theta_4); \\ C_5 \frac{d\theta_5}{dt} = P_5 - G_5\theta_5 + G_{45}(\theta_4 - \theta_5) + G_{53}(\theta_3 - \theta_5), \end{cases} \quad (1)$$

где $\theta_1, \theta_2, \theta_3, \theta_4, \theta_5$ – соответственно превышение температуры обмотки и сердечника первого индуктора, ВЭ, обмотки и сердечника второго индуктора относительно температуры окружающей среды, °С; P_1, P_2, P_3, P_4, P_5 – соответственно выделяемые тепловые мощности обмоткой и сердечником первого индуктора, ВЭ, обмоткой и сердечником второго индуктора, Вт; C_1, C_2, C_3, C_4, C_5 – теплоемкости составных частей ЛАД, Дж/°С; G_1, G_2, G_3, G_4, G_5 – тепловые проводимости обмотки первого индуктора, сердечника первого индуктора, ВЭ, обмотки второго индуктора, сердечника второго индуктора в окружающую среду, Вт/°С; $G_{12}, G_{23}, G_{31}, G_{34}, G_{45}, G_{53}$ – тепловые проводимости между составными частями двигателя, Вт/°С.

На основе предложенной математической модели разработана программа в среде моделирования Matlab (Simulink), которая приведена на рисунке 3.

Результаты расчетов параметров модели по методикам, представленным в [7] и [8], приведены в таблицах 1–3.

Параметры модели P_1, P_2, P_3, P_4, P_5 определены с использованием электрической Т-образной схемы замещения ЛАД, приведенной на рисунке 4 [9]. Расчет параметров эквивалентной электрической схемы двухстороннего ЛАД проводился в соответствии с формульными зависимостями, приведенными в [10] и [11]. Результаты расчетов приведены в таблице 4.

Потери мощностей на составных частях двухстороннего ЛАД определялись в соответствии с методиками, приведенными в [12] и [13–19] (таблица 5). Подставляя рассчитанные параметры в разработанную программу и принимая температуру окружающей среды равной 40 °С, получаем графики изменения температур элементов двухстороннего ЛАД (рисунок 5).

Рисунок 3
Программа в среде моделирования Matlab (Simulink)

Таблица 1 Результаты расчетов теплоемкостей составных частей ЛАД

Параметр	Теплоемкости составных частей ЛАД				
	C_1	C_2	C_3	C_4	C_5
Значение, Дж/°C	588	1895	2775	588	1895

Таблица 2 Результаты расчетов тепловых проводимостей от составных частей ЛАД
во внешнюю среду

Параметр	Тепловые проводимости от составных частей ЛАД во внешнюю среду				
	G_1	G_2	G_3	G_4	G_5
Значение, Вт/°C	10,4	15,6	32,0	10,4	15,6

Таблица 3 Результаты расчетов тепловых проводимостей между составными частями двухстороннего ЛАД

Параметр	Тепловые проводимости между составными частями ЛАД					
	G_{12}	G_{23}	G_{31}	G_{34}	G_{45}	G_{53}
Значение, Вт/°С	53,34	0,095	0,105	0,105	53,34	0,095

Рисунок 4

T – образная электрическая схема двухстороннего ЛАД: R_1 и X_1 – активное и реактивное сопротивления обмотки первичной цепи; R'_2 и X'_2 – приведенные активное и реактивное сопротивления вторичной цепи; X_m – индуктивное сопротивление взаимоиндукции между первичной и вторичной цепями; S – скользящее; $\dot{U}_1$ – фазное напряжение; $\dot{I}_1$ – ток первичной цепи; $\dot{I}'_2$ – приведенный ток вторичной цепи; $\dot{I}_m$ – намагничивающий ток

Таблица 4 Результаты расчетов параметров эквивалентной электрической схемы ЛАД

Параметр	Сопротивления эквивалентной электрической схемы ЛАД				
	R_1	X_1	R'_2	X'_2	X_m
Значение, Ом	1,56	6,9	5,49	11,56	8,94

Таблица 5 Потери мощностей на составных частях ЛАД

Параметр	Потери мощностей на составных частях ЛАД				
	P_1	P_2	P_3	P_4	P_5
Значение, Вт	652,0	26,7	226,3	652,0	26,7

Рисунок 5

График изменения температуры элементов двухстороннего ЛАД

Выводы. Во время работы жерновой мельницы наиболее подверженным перегреву элементом являются обмотки индукторов ЛАД, температура которых в установившемся режиме достигает 70 °С; температура сердечников в установившемся режиме составляет 63 °С, а температура вторичного элемента – 47,3 °С; после начала работы устройства для помола зерна

с жерновами постоянный тепловой режим на составных частях двухстороннего ЛАД устанавливается через 13 минут; результаты моделирования могут быть использованы при проведении тепловых расчетов на стадии проектирования двухстороннего линейного асинхронного двигателя для привода устройства для помола зерна с жерновами.

Библиографический список

1. Акчурин, С.В. Инерционный транспортер влажного сахара на базе линейного асинхронного двигателя с подвижным индуктором [Текст] / С.В. Акчурин, А.В. Линенко // Достижения науки – агропромышленному производству: материалы ЛП международной научно-технической конференции. Челябинск: Челябинская ГАА, 2013. С. 89–96.
2. Туктаров, М.Ф. Экспериментальная установка зерноочистительной машины на базе плоского линейного электропривода [Текст] / М.Ф. Туктаров // Молодежная наука и АПК: проблемы и перспективы. Материалы международной научно-практической конференции молодых ученых, посвященной 80-летию ФГОУ ВПО Башкирский ГАУ. Уфа: Башкирский ГАУ, 2010. С. 84–86.
3. Аипов, Р.С. Разработка электропривода косилок с возвратно-поступательным движением ножевых полос [Текст] / Р.С. Аипов, Д.Е. Валишин, Д.С. Леонтьев // Вестник Башкирского государственного аграрного университета. 2014. № 1 (29). С. 68–73.
4. Валишин, Д.Е. Применение линейного асинхронного двигателя для привода насосной установки [Текст] / Д.Е. Валишин // Научное обеспечение развития АПК в современных условиях: материалы Всероссийской научно-практической конференции. Ижевск: Ижевская ГСХА. 2011. С. 56–60.
5. Котеленец, Н.Ф. Испытания и надежность электрических машин [Текст] / Н.Ф. Котеленец, Н.Л. Кузнецов. М.: Высшая школа, 1988. 232 с.
6. Аипов, Р.С. Устройство для измельчения зерна с безредукторным асинхронным двигателем в приводе [Текст] / Р.С. Аипов, Р.Р. Нугуманов // Наука молодых – инновационному развитию АПК: материалы VI Всероссийской научно-практической конференции молодых ученых. Уфа: Башкирский ГАУ, 2013. С. 197–202.
7. Копылов, И.П. Проектирование электрических машин [Текст]: учебник для бакалавров / И.П. Копылов; отв. ред. И.П. Копылов. 4-е изд., пер. и доп. М.: Юрайт, 2017. 767 с.
8. Филиппов, И.Ф. Теплообмен в электрических машинах [Текст] / И.Ф. Филиппов. Л.: Энергоатомиздат, 1986. 256 с.
9. Веселовский, О.Н. Линейные асинхронные двигатели [Текст]: учебное пособие / О.Н. Веселовский, А.Ю. Коняев, Ф.Н. Сарапулов. М.: Энергоатомиздат, 1991. 256 с.
10. Аипов, Р.С. Линейные электрические машины и приводы на их основе [Текст] / Р.С. Аипов. Уфа: Башкирский ГАУ, 2003. 201 с.
11. Аипов, Р.С. Линейные электрические машины и линейные асинхронные электроприводы технологических машин [Текст]: монография / Р.С. Аипов, А.В. Линенко. Уфа: Башкирский ГАУ, 2013. 308 с.
12. Сарапулов, Ф.Н. Электротехнологическая виртуальная лаборатория [Текст]: учебное пособие / Ф.Н. Сарапулов, С.Ф. Сарапулов, Д.Н. Томашевский. Екатеринбург: УГТУ-УПИ, 2003. 233 с.
13. Сарапулов, Ф.Н. Развитие математических моделей тепловых процессов в линейных асинхронных двигателях [Текст] / Ф.Н. Сарапулов, В.В. Гоман // Электротехника. 2009. № 8. С. 17–22.
14. Linenko, A. Experimental Vibro-Centrifugal Grain Separator with Linear Asynchronous Electric Drive / A. Linenko, R. Aipov, R. Yarullin, I. Gabitov, M. Tuktarov, S. Mudarisov, V. Kabashov, T. Kamalov, V. Gilvanov and B. Khalilov // Journal of Engineering and Applied Sciences. 2018. V. 13. P. 6551–6557.
15. Yarullin, R. Adjustable Driver of Grain Cleaning Vibro-Machine with Vertical Axis of Eccentric Masses Rotation / R. Yarullin, R. Aipov, I. Gabitov, A. Linenko, S. Akchurin, R. Safin, S. Mudarisov, E. Khasanov, Z. Rakhimov, Z. Rakhimov and I. Masalimov // Journal of Engineering and Applied Sciences. 2018. V. 13. P. 6398–6406.
16. Aipov, R. Mechatronic System Linear Swing Vibrating Screen of a Grain Cleaner / R. Aipov, R.B. Yarullin, I.I. Gabitov, S.G. Mudarisov, A.V. Linenko, M.N. Farhshatov, E.R. Khasanov, F.Z. Gabdrifkov, G.P. Yukhin and R.R. Ga-

liullin // Journal of Engineering and Applied Sciences. 2018. V. 13. P. 6473–6477.

17. Gabitov, I. Risk Reduction of Thermal Damages of Units in Machinery Heat Preparation for Load Acceptance / I. Gabitov, A. Negovora, E. Khasanov, R. Galiullin, M. Farhshatov, R. Khamaletdinov, V. Martynov, D. Gusev, N. Yunusbaev and M. Razyapov // Journal of Engineering and Applied Sciences. 2019. V. 14. P. 709–716.

18. Gabitov, I. Diagnostics and Regulation of Fuel Equipment of Diesels on Stands with Injection

to Medium with Counter-Pressure / I. Gabitov, S. Insafuddinov, D. Kharisov, F. Safin, A. Negovora, N. Yunusbaev, A. Akhmetov, T. Farhutdinov and A. Sharafiev // Journal of Engineering and Applied Sciences. 2018. V.13. P. 8782–8788.

19. Gabdrifkov, F. Control System for Pre-Start Heating of a Diesel Engine/ F. Gabdrifkov, U. Galiakberov, E. Gaysin, M. Abrarov and V. Gindullin // Journal of Engineering and Applied Sciences. 2018. V. 13. P. 8836–8842.

Сведения об авторах

1. **Кафиев Иршат Рашитович**, кандидат технических наук, доцент кафедры электрических машин и электрооборудования, ФГБОУ ВО Башкирский ГАУ, г. Уфа, ул. 50-летия Октября, 34, e-mail: kafiev02@mail.ru.

2. **Нугуманов Раушан Римович**, кандидат технических наук, старший преподаватель кафедры электрических машин и электрооборудования, ФГБОУ ВО Башкирский ГАУ, г. Уфа, ул. 50-летия Октября, 34, e-mail: nugraush@rambler.ru.

Статья посвящена моделированию теплового состояния составных частей плоского двухстороннего линейного асинхронного двигателя в приводе устройства для помола зерна с жерновыми. В работе выбрана тепловая схема замещения данного двигателя, разработана математическая модель теплового состояния двигателя и программа в среде моделирования Matlab (Simulink). С применением разработанной про-

граммы получены графические зависимости изменения температур составных частей двухстороннего линейного асинхронного двигателя. Результаты моделирования могут быть использованы при проведении тепловых расчетов на стадии проектирования двухстороннего линейного асинхронного двигателя привода устройства для помола зерна с жерновыми.

I. Kafiev, R. Nugumanov

MODELING A THERMAL STATE OF A DOUBLE-SIDED LINEAR INDUCTION MOTOR

Key words: *thermal state; mathematical model; double-sided linear induction motor; equivalent circuit; device for grinding grain with millstones.*

Authors' personal details

1. **Kafiev Irshat**, Candidate of technical sciences, assistant professor of the Electric Machines and Equipment department, Federal State Budgetary Educational Institution of Higher Education «Bashkir State Agrarian University», Ufa, 50-letiya Oktyabrya St., 34, e-mail: kafiev02@mail.ru.

2. **Nugumanov Raushan**, Candidate of technical sciences, senior lecturer of the Electric Machines and Equipment department, Federal State Budgetary Educational Institution of Higher Education «Bashkir State Agrarian University», Ufa, 50-letiya Oktyabrya St., 34, e-mail: nugraush@rambler.ru.

The paper is devoted to modeling thermal state of flat two-sided linear induction motor parts in the drive of a grain grinder with millstones. The authors took a thermal equivalent circuit for this engine, developed a mathematical model of the thermal state of the engine and a program in the Matlab simulation environment (Simulink). Using the developed

program graphical dependences of the temperature changes in two-sided linear asynchronous motor are obtained. The simulation results can be used for thermal calculations at the stage of designing a double-sided linear induction motor for grain grinding with millstones.

© Кафиев И.Р., Нугуманов Р.Р.