The paper discusses the main advantages and drawbacks of liquefied natural gas as a motor fuel used in internal combustion engines. Special attention is paid to studies of critical indicators of pressure and temperature in the fuel-delivery system of the gas engine and a cryotank filled with liquefied methane with heat insulation as well as to critical

parameters of methane flow in special circular pipes to transfer the gas in the two-phase environment. There are schemes to supply natural gas to the fuel-delivery system of the gas engine based on an electronic control system in order to increase energy efficiency and improve operational properties.

© Дидманидзе О.Н., Хакимов Р.Т., Неговора А.В.

УДК 621.313.33

DOI: 10.31563/1684-7628-2018-46-2-100-105

И.Р. Кафиев, Р.Р. Нугуманов, Л.Р. Галлямова

ВЛИЯНИЕ НЕСИНУСОИДАЛЬНОСТИ НАПРЯЖЕНИЯ ИСТОЧНИКА ПИТАНИЯ НА НАДЕЖНОСТЬ ЛИНЕЙНОГО АСИНХРОННОГО ДВИГАТЕЛЯ

Ключевые слова: *схема замещения; математическая модель; несинусоидальность напряжения; линейный асинхронный двигатель; срок службы.*

Введение. В настоящее время наметилась тенденция расширения области применения в сельском хозяйстве электроприводов, построенных на базе линейных асинхронных двигателей (ЛАД). Достоинством данных двигателей является конструктивная простота, отсутствие электрического контакта со вторичным элементом, возможность получения большого диапазона линейных скоростей и перемещений без использования кинематических связей [1]. На базе линейных асинхронных электроприводов разработаны: инерционный конвейер, предназначенный для транспортирования сельскохозяйственных продуктов [2]; установка, которая может быть использована для сепарации зернового материала [3]; устройства для измельчения и помола зерновых культур [4, 5] и т. д. Несмотря на большое количество разработок на данную тему, вопросы надежности ЛАД, используемых в приводах сельскохозяйственных машин, мало изучены [6]. Это обстоятельство является одним из факторов, сдерживающих внедрение линейных электроприводов в производство. Поэтому большой интерес представляет исследование влияния несинусоидальности напряжения источника питания на срок службы ЛАД.

Цель исследования: оценка влияния несинусоидальности напряжения источника питания на срок службы ЛАД.

Задачи исследования: разработать математическую модель тепловых процессов в ЛАД и компьютерную программу в среде моделирования Matlab (Simulink), реализующую данную модель; определить моделированием температуры обмотки ЛАД при нормальных и ухуд-

шенных показателях качества электрической энергии; провести расчет относительного срока службы ЛАД при несинусоидальности питающего напряжения.

Условия, материалы и методы исследования. В качестве объекта исследования использован односторонний плоский ЛАД, используемый в приводе жерновой мельницы, схема которой приведена на рисунке 1. Основные параметры ЛАД: номинальное фазное напряжение – 220 В; частота сети – 50 Гц; количество фаз – 3; номинальная мощность – 4,0 кВт; габаритные размеры – 168 × 168 × 45 мм. Вторичный элемент (ВЭ) ЛАД является комбинированным, состоящим из неферромагнитного материала (алюминиевого диска) и ферромагнитного материала (стального диска). Наружный диаметр дисков составляет 0,7 м, внутренний диаметр – 0,36 м. Частота вращения ВЭ – 144 об/мин. Из анализа литературы по надежности электрических машин следует, что в подавляющем большинстве случаев (85...95 %) отказы вращающихся асинхронных двигателей связаны с повреждением изоляции обмоток, на подшипниковый узел приходится 5...8 % отказов, а небольшой процент связан с другими причинами [7]. Таким образом, надежность линейного асинхронного двигателя в основном будет определяться отказами обмоток индуктора, которые обусловлены тепловым старением изоляции.

При разработке математической модели тепловых процессов в ЛАД использован метод эквивалентных тепловых схем, сущность которого заключается в следующем [8]: двигатель разделяют на элементы, близкие или по мате-

риалу, или по характеру контакта с соседними элементами или средой.

Эквивалентная тепловая схема замещения ЛАД представлена на рисунке 2.

Рисунок 1

Схема ЛАД в приводе жерновой мельницы:

1 – корпус; 2 – загрузочный бункер; 3 – приемный бункер; 4 – верхний жернов; 5 – нижний жернов; 6 – индуктор ЛАД; 7 – алюминиевый диск вторичного элемента; 8 – стальной диск вторичного элемента

Рисунок 2

Тепловая схема замещения линейного асинхронного двигателя:

1 – обмотка индуктора; 2 – магнитопровод индуктора; 3 – вторичная цепь ЛАД; G_1, G_2, G_3 – тепловая проводимость от обмоток индуктора, магнитопровода индуктора и ВЭ в окружающую среду соответственно; G_{12}, G_{23}, G_{31} – тепловые проводимости между элементами ЛАД

Для упрощения математического описания тепловых процессов в ЛАД введем следующие допущения: выделение тепла во ВЭ происходит только над поверхностью индуктора, и оно равномерно распределено по всему его объему; расчет температуры частей ЛАД производится для установившегося режима, т. е. когда ВЭ вращается с постоянной линейной скоростью; движение ВЭ относительно индуктора принимается прямолинейным, а не дугообразным.

Результаты исследования. Предложенная математическая модель тепловых процессов в ЛАД представляет собой систему дифференци-

альных уравнений, которая имеет следующий вид [9]:

$$\begin{cases} C_1 \frac{d\tau_1}{dt} = P_1 - G_1\tau_1 + G_{12}(\tau_1 - \tau_2) - G_{13}(\tau_1 - \tau_3); \\ C_2 \frac{d\tau_2}{dt} = P_2 - G_2\tau_2 + G_{12}(\tau_1 - \tau_2) + G_{23}(\tau_3 - \tau_2); \\ C_3 \frac{d\tau_3}{dt} = P_3 - G_3\tau_3 - G_{23}(\tau_3 - \tau_2) - G_{31}(\tau_3 - \tau_1), \end{cases} \quad (1)$$

где τ_1, τ_2, τ_3 – соответственно превышение температуры обмотки индуктора, стали и вторичного элемента температуры окружающей среды, C ; P_1, P_2, P_3 – выделяемая тепловая мощность обмоткой индуктора, сталью индуктора и вторичным элементом; C_1, C_2, C_3 – теплоемкости тел, Дж/°C; G_1, G_2, G_3 – тепловые проводимости соответственно от обмоток индуктора, стали магнитопровода индуктора и ВЭ в окружающую среду, Вт/°C; G_{12}, G_{23}, G_{31} – тепловая проводимость между элементами ЛАД, Вт/°C.

Для определения температур составных частей эквивалентной тепловой схемы замещения ЛАД разработана компьютерная программа с использованием пакета объектно-ориентированного визуального моделирования Matlab (Simulink), которая приведена на рисунке 3.

Определение теплоемкостей элементов ЛАД проводилось в зависимости от удельных теплоемкостей применяемых материалов. Значения теплоемкостей элементов ЛАД приведены в таблице 1.

Расчет значений тепловых проводимостей схемы проводился в соответствии с методиками, представленными в [8] и [10]. Результаты расчетов сведены в таблицу 2.

Таблица 1 Значения теплоемкостей элементов ЛАД

Параметр	Значения теплоемкостей элементов		
	обмотки, C_1	сердечника, C_2	ВЭ, C_3
Значение, Дж/°C	588	1896	9250

Рисунок 3

Компьютерная программа в среде объектно-ориентированного визуального моделирования Matlab (Simulink)

Таблица 2 Значения тепловых проводимостей элементов ЛАД

Параметр	G_1	G_2	G_3	G_{12}	G_{23}	G_{31}
Ед. изм.	Вт/°C					
Значение	14,1	25,3	112,0	53,34	0,095	0,105

Рисунок 4

Схема замещения ЛАД с комбинированной вторичной цепью:

R_1 и X_1 – активное и реактивное сопротивление фазы индуктора; R'_{21} – приведенное эквивалентное сопротивление немагнитного слоя ВЭ; R'_{22} и X'_{22} – приведенные активное и реактивное эквивалентные сопротивления ферромагнитного слоя ВЭ; X_m – индуктивное сопротивление взаимной индукции между индуктором и ВЭ

Таблица 3 Значения потерь мощностей на элементах ЛАД

Параметр	Значения потерь мощностей		
	обмотки, P_1	сердечника, P_2	ВЭ, P_3
Значение, Вт	1156,0	32,8	325,8

Для определения параметров модели P_1 , P_2 и P_3 использована электрическая схема замещения ЛАД с комбинированной вторичной цепью, представленная на рисунке 4 [11].

Расчет параметров эквивалентной схемы замещения и потерь мощностей на элементах

ЛАД проводился в соответствии с методиками, приведенными в [11] и [12].

Значения потерь мощностей на элементах ЛАД приведены в таблице 3.

Подставляя значения параметров модели в разработанную компьютерную программу,

определяем превышения температуры элементов ЛАД над температурой окружающей среды. Получаем следующие результаты: превышение температуры обмотки индуктора над температурой окружающей среды $\tau_1 = 38^\circ\text{C}$; превышение температуры магнитопровода индуктора над температурой окружающей среды $\tau_2 = 26^\circ\text{C}$; превышение температуры ВЭ над температурой окружающей среды $\tau_3 = 3^\circ\text{C}$.

Принимая значение температуры окружающей среды в электрической машине равным 40°C , получаем значения температур элементов ЛАД: температура обмотки индуктора $\Theta_1 = 78^\circ\text{C}$; стали индуктора – $\Theta_2 = 66^\circ\text{C}$; ВЭ – $\Theta_3 = 43^\circ\text{C}$.

Дополнительные потери в ЛАД, обусловленные несинусоидальностью напряжения, определяем по зависимости [13]:

$$\Delta P_1^{(n)} = P_1 \cdot k_{\Pi}^2 \cdot K_{u(n)}^2 \cdot \frac{(\sqrt{n} + \sqrt{n+1})}{n}, \quad (2)$$

где P_1 – потери в меди индуктора ЛАД при номинальном токе основной частоты, Вт; k_{Π} – кратность пускового тока. Для ЛАД в зависимости от мощности $k_{\Pi} = 4 \dots 8$ [14]. Для рассматриваемой ЛАД $k_{\Pi} = 4$; $K_{u(n)}$ – коэффициент n -й гармонической составляющей напряжения; n – номер гармоники. Знак «–» соответствует симметричной составляющей гармоник, создающих бегущие поля, встречные полю основной

гармоники, а «+» – симметричной составляющей гармоник, создающих поля, совпадающие с полем основной гармоники.

С использованием разработанной на MatLab (Simulink) программы проводим расчеты превышения температуры обмотки индуктора от протекания токов, созданных высшими гармониками напряжения, образующими прямую ($n = 7, 13, 19$) и обратную последовательность чередования фаз ($n = 5, 11, 17$).

Для различных значений коэффициента гармонических составляющих напряжения $K_{u(n)}$ по формуле Монтзингера [15] определяем относительный срок службы ΔT ЛАД

$$\Delta T = \frac{T}{T_n} = e^{-A \cdot \Delta \Theta_1}, \quad (3)$$

где T – срок службы при реальных значениях показателя качества напряжения источника питания; T_n – срок службы при нулевых значениях коэффициента несинусоидальности напряжения источника питания; A – коэффициент, зависящий от марки изоляции. Для изоляции класса нагревостойчивости F коэффициент A равен $0,069 \text{ } 1/^\circ\text{C}$.

По полученным данным строим графики зависимости относительного срока службы ЛАД от значений коэффициента гармонических составляющих напряжения $K_{u(n)}$.

Рисунок 5

График зависимости относительного срока службы ЛАД от коэффициента $K_{u(n)}$ для высших гармоник, образующих последовательность: а – прямую ($n = 7, 13, 19$); б – обратную ($n = 5, 11, 17$)

Выводы. 1. При нормально допустимых значениях коэффициента гармонических составляющих напряжения ($K_{u(n)} = 2\%$) снижение срока службы линейного асинхронного двигателя составляет до $0,5\%$, при предельно допустимом значении ($K_{u(n)} = 4\%$) – до $2,1\%$. Следовательно, при допустимых значениях коэф-

фициента несинусоидальности напряжения источника питания надежность ЛАД уменьшается незначительно. При значении этого коэффициента, равного 10% , происходит существенное снижение срока службы ЛАД (до $12,5\%$).

2. Вклад высших гармоник обратной последовательности ($n = 5, 11, 17$) в снижение

надежности двигателя больше, чем у высших гармоник прямой последовательности ($n = 7, 13, 19$).

Это объясняется противоположным направлением бегущих магнитных полей, создаваемых токами высших гармоник, по отношению к

бегущему магнитному полю, создаваемому основной гармоникой напряжения источника питания.

3. Наибольшее снижение срока службы ЛАД происходит при гармониках низшего порядка ($n = 5$ и $n = 7$).

Библиографический список

1. Аипов, Р.С. Линейные электрические машины и приводы на их основе [Текст] / Р.С. Аипов. Уфа: Башкирский ГАУ, 2003. 201 с.
2. Патент 2422348 Российская Федерация, МПК В 65 G 27 24. Инерционный конвейер [Текст] / Р.С. Аипов, С.В. Акчурин, А.В. Линенко, М.Ф. Туктаров. № 2010110857/11; заявл. 22.03.2010; опубл. 27.06.2011, Бюл. № 11. 3 с.
3. Линенко, А.В. Зерноочистительная установка с линейным электродвигателем [Текст] / А.В. Линенко, М.Ф. Туктаров, С.В. Акчурин // Сельский механизатор. 2014. № 8 (66). С. 24–25.
4. Патент № 2482920 Российская Федерация, МПК В02С7/16. Устройство для измельчения твердых материалов [Текст] / Р.С. Аипов, Р.Р. Нугуманов. № 2012106826/13; заявл. 24.02.2012 г.; опубл. 27.05.2013 г., Бюл. № 15. 7 с.
5. Патент № 2546860 Российская Федерация, МПК В 02 С7/08, В 02 С7/16. Устройство для измельчения [Текст] / Р.С. Аипов, Р.Р. Нугуманов, А.В. Линенко. №2013153279/13; заявл. 29.11.2013; опубл. 10.04.2015 г., Бюл. № 10. 7 с.
6. Аипов, Р.С. К вопросу о надежности электроприводов сельскохозяйственных машин [Текст] / Р.С. Аипов, И.Р. Кафиев // Аграрная наука в инновационном развитии АПК: материалы международной научно-практической конференции в рамках XXVI Международной специализированной выставки «Агрокомплекс-2016». Часть III. Уфа: Башкирский ГАУ, 2016. С. 3–6.
7. Кузнецов, Н.Л. Надежность электрических машин [Текст]: учеб. пособие для вузов / Н.Л. Кузнецов. М.: Издательский дом МЭИ, 2006. 432 с.
8. Борисенко, А.И. Охлаждение промышленных электрических машин / А.И. Борисенко, О.Н. Костиков, А.И. Яковлев. М.: Энергоатомиздат, 1983. 296 с.
9. Кафиев, И.Р. Математическая модель тепловых процессов в линейном асинхронном двигателе [Текст] / И.Р. Кафиев, Л.Р. Галлямова, Р.Р. Нугуманов // Современное состояние, традиции и инновационные технологии в развитии АПК: материалы Международной научно-практической конференции в рамках XXVII Международной специализированной выставки «Агрокомплекс-2017». Уфа: Башкирский ГАУ, 2017. С. 340–343.
10. Проектирование электрических машин [Текст]: учеб. для вузов / И.П. Копылов, Б.К. Клоков, В.П. Морозкин, Б.Ф. Токарев; под ред. И.П. Копылова. 3-е изд., испр. и доп. М.: Высшая школа, 2002. 757 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. Математические модели линейных индукционных машин на основе схем замещения [Текст]: учебное пособие / Ф.Н. Сарапулов, С.Ф. Сарапулов, П. Шымчак. Екатеринбург: УГТУ-УПИ, 2001. 236 с.
13. Шиловский, А.Н. Повышение качества электрической энергии в электрических сетях [Текст] / А.Н. Шиловский, В.Г. Кузнецов. Киев: Научная мысль, 1985. 268 с.
14. Жежеленко, И.В. Высшие гармоники в системах электроснабжения промпредприятий [Текст] / И.В. Жежеленко. М.: Энергоатомиздат, 2000. 252 с.
15. Котеленец, Н.Ф. Испытания и надежность электрических машин [Текст] / Н.Ф. Котеленец, Н.Л. Кузнецов. М.: Высшая школа, 1988. 232 с.

Сведения об авторах

1. **Кафиев Иришат 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.
3. **Галлямова Лиана Рамилевна**, старший преподаватель кафедры электрических машин и электрооборудования, ФГБОУ ВО Башкирский ГАУ, г. Уфа, ул. 50-летия Октября, 34, e-mail: toliara@mail.ru.

В статье проведена оценка влияния несинусоидальности напряжения источника питания на срок службы плоского линейного асинхронного двигателя в приводе жерновой мельницы. Для достижения этой цели выбрана тепловая схема замещения данного двигателя, разработана математическая модель тепловых процессов в двигателе и компьютерная программа в среде объектно-ориентированного моделирования Matlab (Simulink). С использованием компьютерной

программы определены превышения температуры обмотки индуктора линейного асинхронного двигателя от протекания токов, созданных высшими гармониками напряжения, образующими прямую и обратную последовательность чередования фаз. На основе уравнения Монтзингера определены и построены графики зависимости относительного срока службы линейного асинхронного двигателя от коэффициентов гармонических составляющих напряжения.

I. Kafiev, R. Nugumanov, L. Gallyamova

EFFECT OF POWER SUPPLY VOLTAGE UNSINUSOIDALITY ON RELIABILITY OF A LINEAR INDUCTION MOTOR

Key words: *equivalent circuit; mathematical model; voltage unsinusoidality; linear induction motor; life time.*

Authors' personal details

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

3. **Gallyamova Liana**, senior lecturer of the Electric Machines and Equipment Chair, Federal State Budgetary Educational Institution of Higher Education «Bashkir State Agrarian University», Ufa, 50-letiya Oktyabrya St., 34, e-mail: toliara@mail.ru.

There is an assessment of the way power supply voltage unsinusoidality influences on the life time of a flat linear induction motor in the drive of an attrition mill. To achieve this goal, the thermal scheme for replacing this engine was chosen, a mathematical model of thermal processes in the engine as well as a software for the object-oriented modeling environment Matlab (Simulink) were developed. Using the computer program, the tem-

perature rise of the inductor winding in a linear asynchronous motor is determined. It is due to current flow created by higher voltage harmonics forming positive and reverse sequence of phase alternations. On the basis of the Montzinger equation, dependency diagrams of the relative life time of a linear induction motor on coefficients of the harmonic voltage components are determined.

© Кафиев И.Р., Нугуманов Р.Р., Галлямова Л.Р.

УДК 664.78

DOI: 10.31563/1684-7628-2018-46-2-105-110

М.М. Константинов, А.А. Румянцев, Н.А. Борзов

МЕТОДОЛОГИЯ КОЛИЧЕСТВЕННОЙ ОЦЕНКИ ЦВЕТА ГРЕЧНЕВОЙ КРУПЫ ПРИ ЕЕ ОБРАБОТКЕ

Ключевые слова: *методология; оценка; цвет; гречневая крупа; критерии; треххроматические координаты; признак.*

Введение. В настоящее время потребители гречневой крупы предъявляют все более высо-

кие требования к ее качеству и товарному виду по сравнению с требованиями, регламентируе-