



УДК 621.36

РАСЧЕТ ПОВТОРНО-КРАТКОВРЕМЕННЫХ ТЕПЛОВЫХ РЕЖИМОВ ЛИНЕЙНОГО АСИНХРОННОГО ДВИГАТЕЛЯ

CALCULATION OF INTERMITTENT HEAT MODES OF A LINEAR ASYNCHRONOUS MOTOR

Тарчуткин Николай Владиславович, студент каф. «Электротехника и электротехнологические системы», Уральский федеральный университет имени первого Президента России Б.Н. Ельцина, Россия, 620002, г. Екатеринбург, ул. Мира, 19. E-mail: Nik_tar@mail.ru, Тел.: +7(912)218-91-60

Шмаков Евгений Игоревич, студент каф. «Электротехника и электротехнологические системы», Уральский федеральный университет имени первого Президента России Б.Н. Ельцина, Россия, 620002, г. Екатеринбург, ул. Мира, 19. E-mail: Shmakovz@mail.ru. Тел.: +7(912)620-18-46

Смолянов Иван Александрович, учебный мастер, бакалавр, Уральский федеральный университет имени первого Президента России Б.Н. Ельцина, Россия, 620002, г. Екатеринбург, ул. Мира, 19. E-mail: adskiibot@gmail.com, Тел.: +7(950)555-34-50

Nikolay V. Tarchutkin, student, Department «Elektrotehnika i elektrotehnologicheskyye systemy», Ural Federal University named after the first President of Russia B.N.Yeltsin, 620002, Mira street, 19, Ekaterinburg, Russia. E-mail: Nik_tar@mail.ru. Ph.: +7(912)218-91-60

Eugeny I. Shmakov, student, Department « Elektrotehnika i elektrotehnologicheskyye systemy», Ural Federal University named after the first President of Russia B.N.Yeltsin, 620002, Mira street, 19, Ekaterinburg, Russia. E-mail: Shmakovz@mail.ru. Ph.: +7(912)620-18-46

Ivan A. Smolyanov, educational master, bachelor, Ural Federal University named after the first President of Russia B.N.Yeltsin, 620002, Mira street, 19, Ekaterinburg, Russia. E-mail: adskiibot@gmail.com, Тел.: +7(950)555-34-50

Аннотация: В данной работе рассматривается возможность учета изменения температуры движущегося вторичного элемента линейной асинхронной машины. Температурное поле рассчитывается во временной области с учетом изменения тепловых и электромагнитных свойств материала на каждом временном шаге. Предлагается подход корректного учета температуры вторичного элемента.

Abstract: This paper deals with the possibility of taking into account the temperature change of a moving secondary element of a linear asynchronous machine. The temperature field is calculated in the time domain taking into account the change in the thermal and electromagnetic properties of the material at each time step. The approach of correct consideration of the temperature of the secondary element is proposed.

Ключевые слова: линейный асинхронный двигатель; температурное поле; тепловая задача; повторно-кратковременный режим.

Key words: linear asynchronous motor; temperature field; thermal problem; intermittent mode.

ВВЕДЕНИЕ

Принцип работы линейных асинхронных двигателей (ЛАД) основан на способности трехфазной системы токов создавать движущееся магнитное поле. Если в обычном асинхронном двигателе статор цилиндрической формы разрезать вдоль своей оси и развернуть в плоскость, мы получим статор линейного двигателя, называемый индуктором. В результате взаимодействия магнитного поля индуктора и вторичного элемента (ВЭ) последний начинает перемещаться.

Использование линейных электродвигателей является наиболее перспективным в отраслях промышленного и пассажирского транспорта. Кроме того, ЛАД широко используются в приводах различных приводов и устройств, например, в ударных машинах или металлорежущем оборудовании.

В этой статье рассматриваются термические характеристики ВЭ линейного асинхронного двигателя с учетом периодичности воздействия магнитного поля на часть ВЭ в ходе работы. Внешний вид установки показан на рис.1.

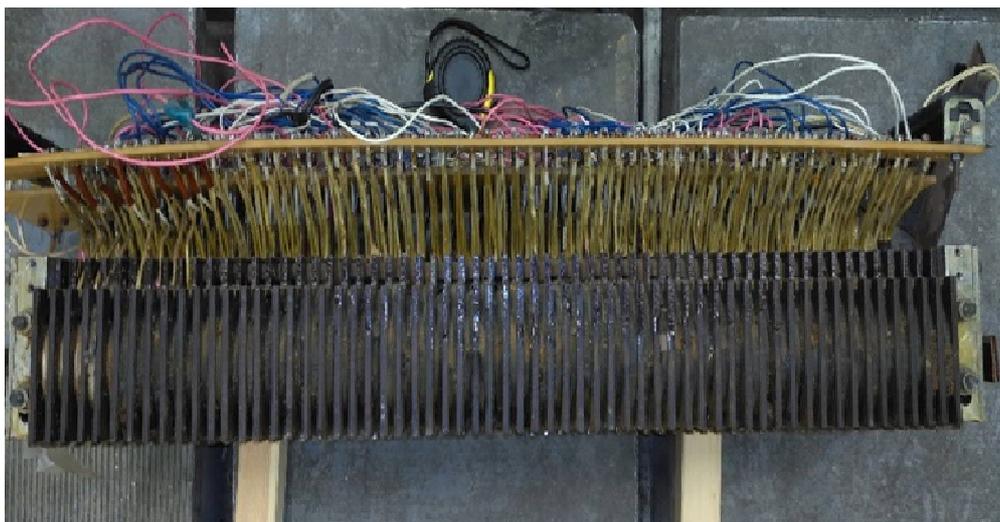


Рис. 1. Внешний вид моделируемого ЛАД

ФОРМУЛИРОВКА ПРОБЛЕМЫ

В линейных асинхронных двигателях воздействию электромагнитного поля индуктора в основном подвергается часть вторичного элемента, в данный момент расположенная между индуктором и магнитопроводом вторичного элемента. В связи с этим работу двигателя с точки зрения нагрева участка ВЭ можно разделить на две части: время нагрева и время паузы. Для учета данной особенности работы ЛАД, изображенного на рисунке 2, и получения более точных значений температуры ВЭ можно использовать повторно-кратковременный режим работы.

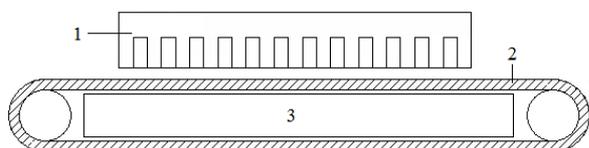


Рис. 2. ЛАД с замкнутым ВЭ:
1 – индуктор; 2 – ВЭ; 3 – магнитопровод

За основу рассчитываемой модели были взяты параметры реальной установки, представленные в таблице 1.

Таблица 1.

Геометрические параметры ЛАД

Величина	Значение, мм
Ширина зубца	5
Ширина паза	7,92
Глубина паза	39
Высота магнитопровода ВЭ	47
Толщина воздушного зазора	5
Толщина высокопроводящего ВЭ	2
Ширина ВЭ	122
Ширина индуктора	120
Длина индуктора	820
Число пазов	60
Число пазов на полюс и фазу	2

В ходе работы было произведено сравнение температуры ВЭ, достигаемой за 60 секунд, с учетом повторно-кратковременного режима и без его учета. Величину скольжения в данной задаче считаем равной 0,98.

МАТЕМАТИЧЕСКАЯ МОДЕЛЬ

Непрерывная математическая модель процесса состоит из двух нелинейных уравнений в частных производных, описывающих изменение магнитных и температурных полей в системе с течением времени.

Магнитное поле, генерируемое в системе индуктором, может быть выражено через магнитный векторный потенциал A следующим образом:

$$\text{curl} \left(\frac{1}{\mu} \text{curl} A \right) + \gamma \frac{\partial A}{\partial t} = J_{\text{ext}}, \tag{1}$$

где γ – электропроводность;
 μ – магнитная проницаемость;
 J_{ext} – плотность тока поля, которая принимает ненулевое значение только внутри индуктора.

Достаточно удаленная искусственная граница описывается условием Дирихле $A = 0$. Для решения проблемы использования формулы (1), связанной со значительным различием между частотой тока и постоянной времени нагрева, предполагаем, что поле является гармоническим. Тогда магнитное поле может быть описано другим уравнением:

$$\text{curl} \text{curl} A + j \cdot \omega \gamma \mu A = \mu J_{\text{ext}}, \tag{2}$$

где ω – угловая частота.

Плотность тока, индуцированного во вторичном элементе, определяется выражением:

$$J_{ind} = -j\omega\gamma A. \quad (3)$$

Величина средних объемных потерь, обусловленных этими токами, может быть рассчитана следующим образом:

$$w_j = \frac{1}{2} \frac{|J_{ind}|^2}{\gamma}. \quad (4)$$

Другим типом потерь тепла являются гистерезисные потери. Однако их величина намного меньше, поэтому ими можно пренебречь в этой задаче.

Распределение температуры во временной системе ВЭ-индуктор описывается уравнением теплопередачи:

$$\text{div} (\lambda \text{ grad } T) = \rho c_p \frac{\partial T}{\partial t} - w, \quad (5)$$

где λ – теплопроводность;
 ρ – плотность;
 c_p – удельная теплоемкость при постоянном давлении.

В процессе нагрева величина потерь рассчитывается по формуле (4), а при охлаждении считается равной нулю.

Граничное условие вдоль внешней поверхности ВЭ может быть записано следующим образом:

$$-\lambda \frac{\partial T}{\partial n} = \alpha (T_S - T_{ext}) + \sigma C (T_S^4 - T_r^4), \quad (6)$$

где α – коэффициент конвективной теплопередачи;
 T_S – температура поверхности ВЭ;
 T_{ext} – температура окружающей среды;
 n – направление внешней нормали к поверхности S системы в данной точке;
 σ – постоянная Стефана-Больцмана ($\sigma = 5,67 \cdot 10^{-8} \frac{\text{Вт}}{\text{м}^2\text{К}^4}$);
 C – коэффициент излучательной способности;
 T_r – температура поверхности, на которую излучается тепло из системы.

В ходе работы было создано две расчетные модели, показанные на рисунке 3: первая модель соответствует случаю длительного нагрева ВЭ, а вторая – повторно-кратковременного нагрева.

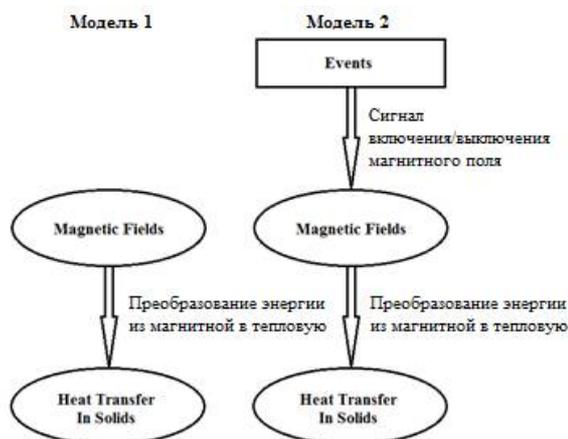


Рис.3. Расчетные модели в Comsol Multiphysics

Учет повторно-кратковременного режима в COMSOL Multiphysics осуществляется посредством добавления физики Events, позволяющей задавать требуемые значения времени нагрева и пауз. Время нагрева рассчитывается на основании геометрических данных ВЭ и значения скольжения. Для реализации нагрева были использованы следующие блоки: Discrete States, Indicator States и Implicit Event.

Discrete States предназначен для задания двух начальных величин: HeaterState, равная единице в процессе нагрева и нулю во время паузы (для периодических включений и отключений магнитного поля), и TimeOfSwitch, в которую записывается время последнего переключения.

Indicator States содержит переменную OkToSwitch, необходимую для обеспечения заданной длительности времени нагрева и пауз. Величина переменной определяется как разность между значением времени в данный момент и суммой значений TimeOfSwitch и заданного времени задержки.

Для реализации переключений используется блок Implicit Event, в котором производилась проверка выполнения условия переключения OkToSwitch: при выполнении условия OkToSwitch>0 величина HeaterState изменялась с 0 на 1 или с 1 на 0 в зависимости от текущего значения.

Зависимость введенных величин от времени представлена на рисунке 4.

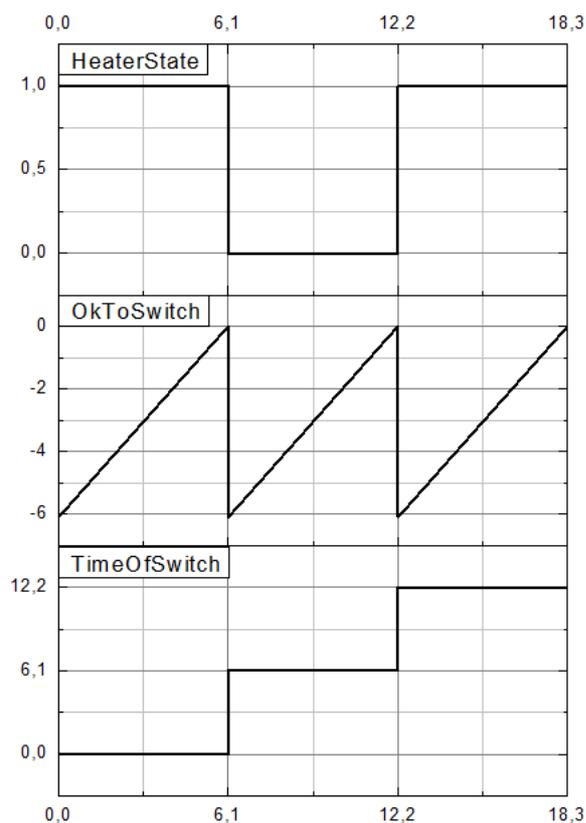


Рис. 4. Изменение величин, заданных в физике Events

АНАЛИЗ ПОЛУЧЕННЫХ РЕЗУЛЬТАТОВ

На рисунке 5 изображены зависимости значений максимальной температуры ВЭ, от времени при различных условиях: 1 – повторно-кратковременный режим, действующее значение тока индуктора 4 А; 2 – длительный нагрев ВЭ, действующее значение тока индуктора 4 А; 3 – длительный нагрев ВЭ, действующее значение тока индуктора $2\sqrt{2}$ А.

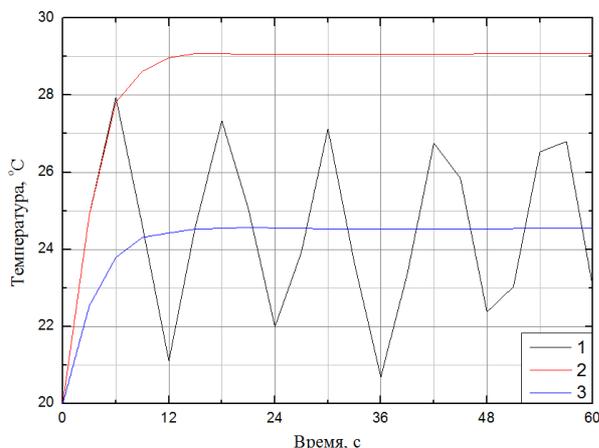


Рис. 5 – Зависимость температуры ВЭ от времени

В связи с тем, что величина скольжения равна 0,98, значение времени нагрева и времени паузы составляет 6,1275 секунд, в то время как расчетный шаг равен 1 с. Этим объясняется различие полученных минимальных и максимальных значений между различными периодами.

Выбор значения тока для случая 3 обусловлен равенством значений времени нагрева и пауз. Так как количество энергии пропорционально квадрату тока, а время нагрева ВЭ в повторно-кратковременном режиме составляет половину от того же времени при длительном нагреве, для передачи ВЭ одинаковой энергии за время работы необходимо, чтобы значение тока длительного нагрева было меньше тока периодического нагрева в $\sqrt{2}$ раз.

ЗАКЛЮЧЕНИЕ

На основании представленных графиков можно заключить, что различие между температурами длительного и повторно-кратковременного режимов при одинаковых значениях токов может достигать 8°C, в то время как при уменьшении значения тока максимальное различие между температурами снижается до 4°C.

Полученные результаты расчетов тепловой задачи позволяют сделать вывод о возможности учета колебаний температуры вторичного элемента без значительного усложнения модели. Альтернативным способом учета периодичности нагрева ВЭ при равных значениях времени нагрева и паузы является снижение тока индуктора в $\sqrt{2}$ раз, позволяющее достаточно точно определить среднее значение температуры ВЭ в установившемся режиме.

БИБЛИОГРАФИЧЕСКИЙ СПИСОК

1. Веселовский, О.Н., Коняев А.Ю., Сарапулов Ф.Н. Линейные асинхронные двигатели М.: Энергоатомиздат, 1991. 256 с.
2. Ямамура, С. Теория линейных асинхронных двигателей. Л.: Энергоатомиздат, 1983. 180 с.
3. Огарков Е.М. Квазигрехмерная теория линейных асинхронных двигателей. Пермь: Перм. гос. техн. ун-т, 2003. 240 с.
4. Иванушкин, В.А., Сарапулов Ф.Н., Шымчак П. Структурное моделирование электромеханических систем и их элементов. Щецин: ЩГУ, 2000. 310 с.
5. Barglik, J., Smalcerz A., Przulucki R., Doležel I. 3D modeling of induction hardening of gear wheels // Journal of Computational and Applied Mathematics. 2014. Vol. 270. P. 231-240