

В.П. СЕВЕРИН, д-р техн. наук, проф., НТУ "ХПИ", Харьков

В.Ф. БОЛЮХ, д-р техн. наук, проф., НТУ "ХПИ", Харьков

Н.А. ГОРДЕЕВА, аспирант, НТУ "ХПИ", Харьков

МАТЕМАТИЧЕСКАЯ МОДЕЛЬ НЕПОСРЕДСТВЕННОГО ЭЛЕКТРОПРИВОДА НА БАЗЕ ЛИНЕЙНОГО ШАГОВОГО ДВИГАТЕЛЯ ДЛЯ УПРАВЛЕНИЯ ДВЕРЯМИ ЭЛЕКТРОПОДВИЖНОГО СОСТАВА

Розроблена математична модель безпосереднього електроприводу з лінійним кроковим двигуном для керування дверми електрорухомого складу, що дозволяє визначати миттєві значення параметрів приводу в різних режимах його роботи.

Разработана математическая модель непосредственного электропривода с линейным шаговым двигателем для управления дверями электроподвижного состава, которая позволяет определить мгновенные значения параметров привода в разных режимах его работы.

Введение. На Украине, как и во всем мире одним из востребованных видов транспорта является железнодорожный. В нашей стране около 70% пассажира и грузо перевозок приходится на железнодорожный транспорт. В настоящее время "Укрзалізниця" проводит мероприятия по модернизации подвижного состава, которые связаны с проведением в стране чемпионата Евро 2012.

Модернизация подвижного состава включает в себя улучшение комфорта пассажиров, безопасность передвижения, безопасность загрузки – выгрузки пассажиров, повышения скорости движения. Привод управления дверьми является одним из главных элементов повышения комфорта пассажиров так, как он обеспечивает удобную и безопасную загрузку-выгрузку пассажиров.

К приводам управления дверьми в настоящее время предъявляются следующие требования: сила прижатия (нетравмирующая пассажиров) (в 200...230 Н), бесшумность, время срабатывания (3..5с), устройство аварийной блокировки, предотвращение попадания в вагон пыли, атмосферных осадков.

Типы приводов управления дверьми вагонов применяемые в настоящее время можно классифицировать следующим образом:

- пневматические приводы, ими оборудованы вагоны электропоездов ЭР 2Р, ЭР 9М, ЭПЛ 2Т, ЭПЛ 9М и другие, а также вагоны метрополитена 81-717, 81-714, ЕжЗ [1-4]. Они характеризуются достаточным быстродействием и развиваемой силой. Однако пневматические приводы не позволяют производить быструю остановку привода при возникновении перегрузки, что может привести к травмированию пассажиров.

- электромеханические привода, ими в настоящее время оснащены трамвайные вагоны ТЗМ, Т5 и другие, представляют собой электромеханический привод состоящий из электродвигателя и редуктора. Такие привода значительно больше по размерам, чем пневматические, обладают меньшим быстродействием, менее надежны. Однако они позволяют оперативно остановить привод не допуская травмирование пассажиров.

Новым направлением в создании приводов управления дверьми может служить направление на создание непосредственного электромагнитного привода на базе линейного шагового двигателя (ЛШД) [5], который позволяет создать быстродействующий, надежный и безопасный для пассажиров тип привода дверей электроподвижного состава.

Принципиальная схема привода с ЛШД представлена на рис. 1. Привод состоит из системы питания и управления ЛШД и линейного шагового двигателя. Система питания и управления ЛШД представляет собой четыре автономных полумостовых инвертора включенных в параллель. К входу преобразователя подается постоянное напряжение U_d . Структура питания всех четырех фаз питания двигателя одинакова. Так фаза А двигателя питается от инвертора, в состав которого входят транзисторные ключи VT1 и VT2 и диоды VD1 и VD2. Конденсатор С предназначен для ускорения процесса переключения фаз двигателя.

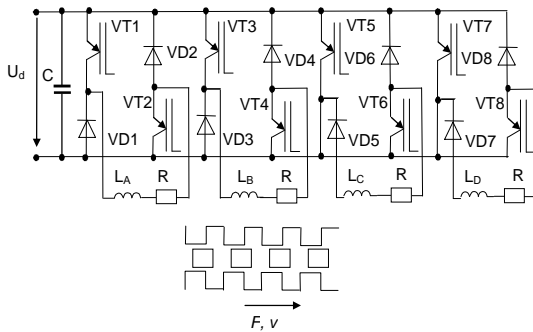


Рис. 1. Принципиальная схема привода.

ЛШД представляет собой четырехфазную линейную шаговую машину. На принципиальной схеме привода рис. 1 обмотки фаз двигателя обозначены в виде индуктивностей L_A , L_B , L_C , L_D и активных сопротивлений R . Последовательная подача импульсов тока в обмотки фаз приводит к созданию электромагнитной силы F , вызывающей перемещение якоря со скоростью v .

Система управления автономным инвертором состоит из двух каналов – канала ограничения тока и канала линейного перемещения.

Конструкция двигателя в различных видах приведена на рис. 2. Двигатель состоит из четырех фаз А, В, С и D, магнитные системы которых связаны между собой не связаны. Конструкция катушки каждой фазы состоит из четырех отдельных катушек 3, установленных на разных полюсах статора 2. Для увеличения плавности хода полюсные наконечники статора 2 и ротора 1 выполнены зубчатыми. Фазы двигателя конструктивно соединены между собой корпусом 4.

Целью данной статьи является создание математической модели непосредственного электропривода на базе линейного шагового двигателя для управления дверями электроподвижного состава.

Математическая модель. Предлагается разработать комбинированную модель автоматизированного электропривода на базе ЛШД, которая включает имитационную модель полупроводникового преобразователя, а также математические модели ЛШД и механической части привода. Имитационная модель преобразователя построена на основе стандартных элементов инструментария SIMULINK системы MATLAB. Математическая модель ЛШД строится с учетом геометрических размеров зубцовой зоны и нелинейных свойств магнитных материалов.

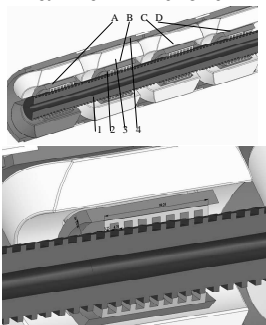


Рис. 2. Конструкция двигателя: 1 – ротор, 2 – полюса статора, 3 – катушки фаз, 4 – корпус

Рассмотрим построение математической модели ЛШД. Уравнение электрической цепи фазы индукторного двигателя по второму закону Кирхгофа имеет вид:

$$U = e + ir. \quad (1)$$

Здесь противоЭДС определяется по закону электромагнитной индукции:

$$e = \frac{d\Psi}{dt} = \frac{\partial\Psi}{\partial i} \frac{di}{dt} + \frac{\partial\Psi}{\partial x} \frac{dx}{dt} = \frac{di}{dt} L + vK, \quad (2)$$

где Ψ – потокосцепление фазы индукторного двигателя, L – индуктивность катушки, v – линейная скорость, K – частная производная потокосцепления по линейному перемещению при постоянном токе.

Подставим выражение (2) для противоЭДС в уравнение (1) и преобразуем его к виду Коши:

$$\frac{di}{dt} = \frac{U - iR - vK}{L}. \quad (3)$$

Механическое уравнение движение якоря на основании второго закона Ньютона имеет вид:

$$m \frac{d^2x}{dt^2} = F_e - F_c, \quad (4)$$

где m – масса якоря, F_e – электромагнитная сила, F_c – сила сопротивления.

Понизим порядок дифференциального уравнения (4), введя промежуточное уравнение:

$$\frac{dv}{dt} = \frac{F_e - F_c}{m}, \quad \frac{dx}{dt} = v. \quad (5)$$

Общая математическая модель четырехфазного ЛШД, составленная по уравнениям (3) и (5), имеет вид:

$$\begin{aligned} \frac{di_A}{dt} &= \frac{U_A - iR - vK(x, i_A)}{L(x, i_A)} \\ \frac{di_B}{dt} &= \frac{U_B - iR - vK(x - \tau, i_B)}{L(x, i_B)} \\ \frac{di_C}{dt} &= \frac{U_C - iR - vK(x - 2\tau, i_C)}{L(x, i_C)}, \quad \frac{di_D}{dt} = \frac{U_D - iR - vK(x - 3\tau, i_D)}{L(x, i_D)}, \quad (6) \\ \frac{dv}{dt} &= \frac{F(x, i_A) + F(x - \tau, i_A) + F(x - 2\tau, i_A) + F(x - 3\tau, i_A) - F_c}{m} \\ \frac{dx}{dt} &= v \end{aligned}$$

В уравнениях (6) используются величины частных производных потокоцеплений:

$$L = \frac{\partial \Psi}{\partial i}, \quad K = \frac{\partial \Psi}{\partial x}. \quad (7)$$

Поскольку магнитные системы фаз между собой не связаны, их потокоцепления и электромагнитные силы являются функциями линейного перемещения и тока соответствующей фазы:

$$\Psi = f(x, i), \quad F = f(x, i). \quad (8)$$

На рис. 4 представлена расчетная область зубцовой зоны. Задача рассматривается в аксиально-симметричной постановке. Принято допущение о не насыщенности участков магнитной цепи: спинки внутреннего и внешнего статоров.

Конечно-элементная сетка в области воздушного зазора для обеспечения точности определения электромагнитной силы число треугольников не менее 4. В остальных областях установлена адаптивная сеточная модель. По результатам расчетов магнитного поля определялись значения потокоцепления эквивалентной катушки и электромагнитная сила с использованием стандартных функций FEMM [6].

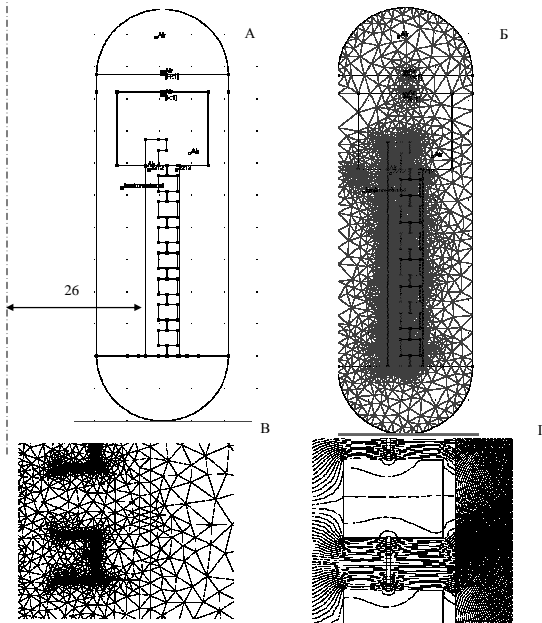


Рис. 4. Расчет магнитного поля ЛШД:
 А – расчетная область, Б и Б' – конечно-элементная сетка в расчетной области и в воздушном зазоре, Б'' – результаты расчета поля в зубцовой зоне

Для определения функций (8) предлагается разложить их в гармонический ряд по координате линейного перемещения с последующей аппроксимацией амплитуд каждой гармоники полиномами Чебышева на множестве равноудаленных точек по координате тока фазы, используя результаты вычислительных экспериментов как исходные данные. При этом аппроксимация потокосцепления фазы имеет вид:

$$\Psi = PC(i) + \sum_{k=1}^{N_G} \begin{pmatrix} PA(i) \sin(kx) + \\ PB(i) \cos(kx) \end{pmatrix} = \sum_{n=0}^{N_s} \left(C_n (M i + Z)^n \right) + \sum_{k=1}^{N_G} \begin{pmatrix} \sum_{n=0}^{N_s} \left(A_{n,k} (M i + Z)^n \right) \sin(kx) + \\ \sum_{n=0}^{N_s} \left(B_{n,k} (M i + Z)^n \right) \cos(kx) \end{pmatrix}, \quad (9)$$

где $PA(i)$, $PB(i)$ и $PC(i)$ – полиномы Чебышева при синусной, косинусной и постоянной составляющих соответственно, k – номер гармоники, N_G – число гармоник, $A_{n,k}$, $B_{n,k}$ и C_n – коэффициенты регрессии полиномов при синусной, косинусной и постоянной состав-

ляющих соответственно, n – номер коэффициента регрессии, N_S – степень полинома, M и Z – масштабный коэффициент и смещение при токе фазы.

Аналогично потокоцеплению представим аппроксимацию электромагнитной силы:

$$F = PFC(i) + \sum_{k=1}^{N_G} \left(\begin{array}{l} PFA(i) \sin(kx) + \\ PFB(i) \cos(kx) \end{array} \right) = \sum_{n=0}^{N_S} \left(FC_n (M i + Z)^n \right) + \sum_{k=1}^{N_G} \left(\begin{array}{l} \sum_{n=0}^{N_S} \left(FA_{n,k} (M i + Z)^n \right) \sin(kx) + \\ \sum_{n=0}^{N_S} \left(FB_{n,k} (M i + Z)^n \right) \cos(kx) \end{array} \right), \quad (10)$$

где $PFA(i)$, $PFB(i)$ и $PFC(i)$ – полиномы при синусной, косинусной и постоянной составляющих соответственно для электромагнитной силы, $FA_{n,k}$, $FB_{n,k}$ и FC_n – коэффициенты регрессии полиномов при синусной, косинусной и постоянной составляющих соответственно.

Из выражения (9) получим аналитически производные (7) потокоцеплений по координатам тока и линейного перемещения:

$$L = M \left(\begin{array}{l} \sum_{n=1}^{N_S} \left(n C_n (M i + Z)^{n-1} \right) + \\ \sum_{k=1}^{N_G} \left(\begin{array}{l} \sum_{n=1}^{N_S} \left(n A_{n,k} (M i + Z)^{n-1} \right) \sin(kx) + \\ \sum_{n=1}^{N_S} \left(n B_{n,k} (M i + Z)^{n-1} \right) \cos(kx) \end{array} \right) \end{array} \right), \quad (11)$$

$$K = \sum_{k=1}^{N_G} \left(\begin{array}{l} \sum_{n=0}^{N_S} k \left(A_{n,k} (M i + Z)^n \right) \cos(kx) - \\ \sum_{n=0}^{N_S} \left(B_{n,k} (M i + Z)^n \right) \sin(kx) \end{array} \right). \quad (12)$$

Уравнения (6) и (10)–(12) составляют математическую модель ЛШД, которую предлагается использовать для создания модели электропривода.

Выводы: 1. Разработанная математическая модель электропривода ЛШД позволяет определять мгновенные значения параметров электропривода в различных режимах его работы. 2. Особенностью модели является определение электромагнитных параметров двигателя по результатам расчета магнитного поля методом конечных элементов и их последующая аппроксимация полиномами Чебышева. 3. Модель учитывает геометрию зубцовой зоны ЛШД и ее насыщение в отдельных участках.

Список литературы: 1. Цукало П.В., Ерошкин Н.Г. Электропоезда ЭР2 и ЭР2Р. – М.: Транспорт, 1986. – 359 с. 2. Авдеев М.М., Гут В.А. Электропоезда переменного тока. – М.: Транспорт, 1985. – 368 с. 3. Корягин Е.Е., Коськин О.А. Электрооборудование трамваев и троллейбусов – М.: Транспорт, 1982. – 296 с. 4. Добровольская Э.М. Электропоезда метрополитена. – М.: ИРПО: Издательский центр "Академия", 2003. – 320 с. 5. Любарский Б.Г., Северин В.П., Парфенюк Т.В., Зюзин Д.Ю., Глебова М.Л., Гордеева Н.А. Имитационное моделирование электропривода на базе линейного шагового привода // Вісник Національного технічного університету "Харківський політехнічний інститут". – 2010. – № 38. – С. 62-71. 6. <http://femm.berlios.de>.

*Поступила в редколлегию 24.04.2011
Рецензент д.т.н., проф. Луников В.С.*