

Г.В. КРИВЯКИН, канд. техн. наук, доц., НТУ «ХПИ»;
Е.С. РЕДЧЕНКО, ассист., НТУ «ХПИ»

ВЛИЯНИЕ ЭЛЕМЕНТОВ КОНСТРУКЦИИ ЛИНЕЙНОГО ДВИГАТЕЛЯ НА ТЯГОВУЮ ХАРАКТЕРИСТИКУ ПРИВОДА НАКЛОНА КУЗОВОВ СКОРОСТНЫХ ПОЕЗДОВ

Рассмотрено влияние конструктивных параметров коаксиального линейного двигателя на форму его тяговой характеристики и значение тягового усилия.

Ключевые слова: линейный двигатель, нагрузочная характеристика, тяговая характеристика.

Введение. Как показывают результаты исследований [1,2,3], применение линейного двигателя в качестве силового привода системы наклона кузова позволяет ликвидировать ряд недостатков, присущих большинству силовых приводов, используемых в настоящее время [4].

Постановка задачи. Исходным моментом к выбору привода механизма наклона кузова являются величина и характер изменения силы, которую необходимо преодолеть для обеспечения наклона кузова на требуемый угол – так называемая *нагрузочная характеристика*.

Как показано в [3] для поезда с типичными геометрическими и массогабаритными показателями нагрузочная характеристика представляет собой практически линейную зависимость естественной возвращающей силы от угла наклона кузова. Для компенсации этой силы необходим *линейный двигатель с тяговой характеристикой*, соответствующей нагрузочной характеристике механизма наклона.

Тяговая характеристика определяет зависимость силы $f_{ЭМ}$, действующей на перемещающийся якорь двигателя, от величины этого перемещения. Для её расчета используется энергетический подход, в соответствии с которым

$$f_{ЭМ} = -dW_m/dx, \quad (1)$$

где W_m – полная энергия электромагнитного поля; x – перемещение якоря.

Сила $f_{ЭМ}$ зависит от многих факторов, таких как геометрические параметры магнитопровода, величина и распределение магнитодвижущей силы, насыщение элементов магнитной цепи, которые сложным образом влияют на величину и форму тяговой характеристики.

В настоящей статье приведены результаты исследований по оценке влияния основных конструктивных параметров линейного двигателя на форму его тяговой характеристики и величину реализуемой силы.

Математическая модель и метод расчета. Процессы электромеханического преобразования энергии, происходящие в линейном двигателе, описываются следующими уравнениями:

$$\begin{cases} U = -e + i \cdot R; \\ -e = d\Psi/dt = \partial\Psi/\partial i|_{x=const} \cdot di/dt + \partial\Psi/\partial x|_{i=const} \cdot dx/dt; \\ L = \partial\Psi/\partial i|_{x=const}; \\ K_3 = \partial\Psi/\partial x|_{i=const}, \end{cases} \quad (2)$$

где U – напряжение на электромагнитном двигателе; e – электродвижущая сила; i – ток линейного двигателя; R – сопротивление обмотки электромагнитного двигателя; определяемое числом ее витков w ; L – индуктивность электромагнитного двигателя; Ψ – потокосцепление.

В данном случае коэффициент K_3 представляет собой *противо-ЭДС*, обусловленную изменением координаты x якоря при постоянстве тока – то есть электродвижущую силу,

$$U = L \cdot di/dt + K_3 \cdot V_T + i \cdot R, \quad (3)$$

где $V_T = dx/dt$ – скорость перемещения якоря.

После приведения уравнения (3) к нормальной форме, общая система дифференциальных уравнений линейного двигателя электромагнитного типа примет вид:

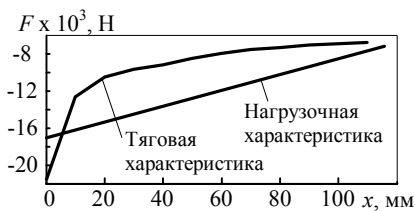
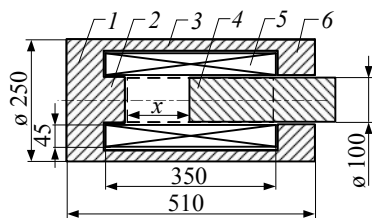
$$\begin{cases} di/dt = (U - i \cdot R - K_3 \cdot V_T)/L; \\ dx/dt = V_T(t); \\ m \cdot dV_T/dt = f_{ЭМ} - f_H, \end{cases} \quad (4)$$

где $L = f_{ЭМ}(i, x, V_T)$; $K_3 = f_{ЭМ}(i, x, V_T)$; m – масса элементов привода и кузова вагона, приведенная к якорю двигателя; f_H – суммарная нагрузка, приведенная к якорю двигателя.

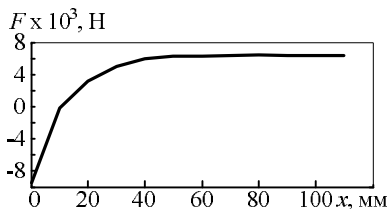
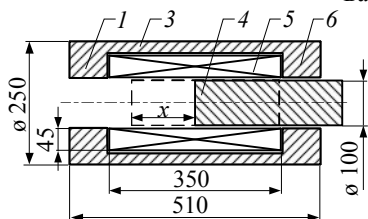
Энергетические и силовые показатели линейного двигателя определяются с помощью программного комплекса *FEMM* [5], предназначенного для расчета двухмерных магнитных полей методом конечных элементов [6].

Анализ полученных результатов. В качестве базовой модели линейного двигателя нами был рассмотрен коаксиальный линейный двигатель [1]. Перемещение его якоря из начального положения, которое отсчитывается от торцевого упора корпуса двигателя, составляет 110 мм (см. рис.1).

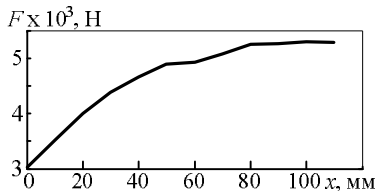
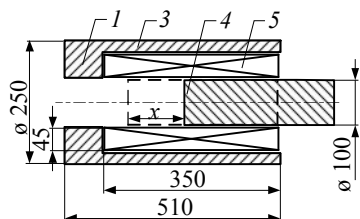
Плотность тока в обмотке принята 7 А/мм². При расчетах были приняты следующие основные допущения: магнитная система является аксиально-симметричной; материал корпуса и якоря линейного двигателя – сталь Ст 3, обмоток – электротехническая медь; вихревые токи и гистерезис в магнито-



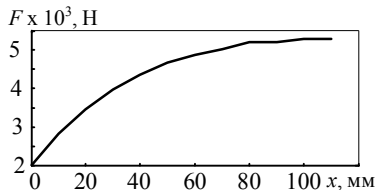
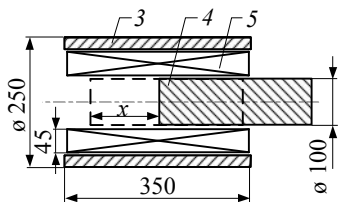
Базовая модель



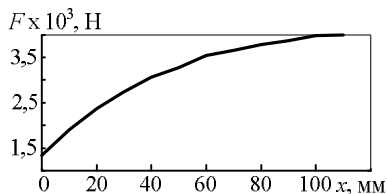
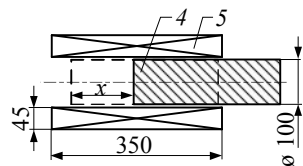
Модель 1



Модель 2



Модель 3



Модель 4

Рис.1 – Схемы моделей линейного двигателя и их тяговые характеристики:

1 – нижнее ядро; 2 – торцевой упор; 3 – корпус; 4 – якорь;

5 – катушка; 6 – верхнее ядро.

проводе не учитываются; источник питания обладает свойствами идеального источника напряжения.

Тяговая характеристика, рассчитанная для базовой модели двигателя, и *нагрузочная характеристика* механизма наклона приведены на рис.1. Как показано на графике, тяговая характеристика имеет гиперболическую форму, что плохо согласуется с формой нагрузочной характеристики.

На данном этапе исследований мы задались целью определить влияние каждого из составляющих частей магнитопровода на характер изменения силы в процессе перемещения якоря в пределах его рабочего хода.

Исходя из этого, нами было рассмотрено четыре модели линейного двигателя, отличающихся конструкцией магнитопровода.

Модель 1 представляет собой двигатель, состоящий из якоря и катушки, установленной в корпусе с двухсторонним ярмом; модель 2 – двигатель, состоящий из якоря и катушки, установленной в корпусе с односторонним ярмом; модель 3 – двигатель, состоящий из якоря и катушки в корпусе; модель 4 – двигатель, состоящий из якоря и катушки без корпуса.

Схемы конструкций и расчетные тяговые характеристики для исследуемых моделей линейного двигателя показаны на рис. 1.

Анализируя эти зависимости, приходим к следующему заключению. Тяговая характеристика первой модели имеет форму, аналогичную базовой модели двигателя. Величина тягового усилия изменяется от -9524 Н до 6354 Н в конце хода. Это обусловлено притяжением якоря к верхнему ярму и соответственно большими силами, действующими на боковой поверхности и верхнем торце якоря. Переход тягового усилия в процессе движения якоря в положительную область связан с уменьшением силы притяжения верхнего торца якоря к верхнему ярму и изменением направления действия силы на боковой поверхности якоря.

Форма характеристики для второй модели двигателя существенно спрямляется. При этом направление тягового усилия на протяжении хода якоря остается неизменным. Это обусловлено, по-видимому, отсутствием верхнего ярма. Величина тягового усилия изменяется от 3027 Н до 5291 Н, что связано с уменьшением силы, действующей на верхнем торце якоря и ее увеличением на боковой поверхности якоря.

Форма характеристик для третьей и четвертой моделей аналогичны форме характеристики второй модели.

Для третьей модели величина тягового усилия изменяется от 2001 Н до 5287 Н, а для четвертой модели – от 1327 Н до 3986 Н. Такой характер изменения тягового усилия, по-видимому, определен факторами, которые оказывают влияние и на форму тяговой характеристики для второй модели.

Как видно на графиках тяговых усилий (рис.1), для рассмотренных моделей имеет место их снижение, что, по-видимому, связано с уменьшением проводимости магнитной цепи.

Выводы. Рассмотренные модели двигателя имеют разные формы тяговых характеристик и отличаются уровнем развиваемых усилий. Это определяется наличием или отсутствием определенных элементов его конструкции.

Основной вклад в формирование тяговой характеристики в форме гиперболы и создание максимального значения тягового усилия вносит торцевой упор корпуса двигателя, что и приводит к несоответствию форм тяговой и нагрузочной характеристик.

Устранение торцевого упора приводит к формированию тяговой характеристики, аналогичной базовой модели, но с меньшим тяговым усилием.

Спрямление тяговой характеристики и ее приближение по форме к нагрузочной имеет место при отсутствии в моделях элементов ярма и корпуса. Однако, уровень развиваемого усилия при наличии только одного корпуса выше, чем при полном отсутствии всех элементов магнитопровода, кроме якоря.

Таким образом, решение задачи по созданию конструкции линейного двигателя, которая удовлетворяла бы условиям соответствия форм тяговой и нагрузочной характеристик, а также обладала бы требуемыми значениями тягового усилия, следует искать в направлении определения рационального соотношения геометрии магнитопровода, конфигурации распределения МДС обмотки и уровня электромагнитных нагрузок.

Список литературы: 1. *Омельяненко В.И., Якунин Д.И., Редченко Е.С.* Привод наклона кузовов на базе линейного двигателя // *Залізничний транспорт України.* – 2010.–№6.–С.23-25. 2. *Омельяненко В.И., Кривякин Г.В., Редченко Е.С.* Нагрузочные характеристики механизма имитации центробежной силы инерции на катковых стендах для испытаний вагонов с наклоняемыми кузовами // *Залізничний транспорт України.* – 2012. – №1. – С.42-46. 3. *Якунин Д.И.* Электромеханическая система привода с линейным двигателем для наклона кузовов скоростного подвижного состава: Дисс. ... канд. техн. наук. – Харьков. – 2010. – 200 с. 4. *Омельяненко В.И., Кривякин Г.В., Якунин Д.И., Редченко Е.С.* Поезда с наклоняемыми кузовами для скоростного пассажирского движения // *Локомотив - информ.* –2008.–№5.– С.12-17. 5. <http://www.femm.info/wiki/HomePage>. 6. *Оверьянова Л.В.* Магнитная система индуктора электромеханического преобразователя инерционного накопителя энергии. – См. статью в настоящем сборнике.

Поступила в редколлегию 25.10.2012

УДК 621.924

Влияние элементов конструкции линейного двигателя на тяговую характеристику привода наклона кузовов скоростных поездов / Г.В. Кривякин, Е.С. Редченко // Вісник НТУ «ХПІ». Серія «Математичне моделювання в техніці та технологіях». – Харків: НТУ «ХПІ». – 2012. – №54 (960). – С. 107-111. – Бібліогр.: 6 назв.

Розглянуто вплив конструктивних параметрів коаксіального лінійного двигуна на форму його тягової характеристики та значення тягового зусилля.

Ключові слова: лінійний двигун, навантажувальна характеристика, тягова характеристика.

The influence of the coaxial linear motor design factor on its traction performance and towing force value is examined.

Key words: linear motor, load characteristics, traction characteristics.