

БУРЯКОВСКИЙ С.Г., к.т.н., доцент,  
МАСЛИЙ Ар.С., к.т.н., ассистент (УкрГАЗТ),  
ЛЮБАРСКИЙ Б.Г., д.т.н., профессор (НТУ «ХПИ»),  
МАСЛИЙ Ан.С., инженер (ООО «Укртрансигнал»)

## Расчет тяговой характеристики линейного двигателя для стрелочного перевода

*Целью работы является обоснование возможности применения линейного двигателя в стрелочном переводе, а также рассмотрение методики расчета его тяговой характеристики. Такая конструкция упрощает монтаж и обслуживание перевода. Предложенный расчет позволяет получить необходимые параметры привода, оптимизировать конструкцию двигателя для различных типов стрелочных переводов и условий эксплуатации. Данный подход – это следующий шаг в развитии теории исполнительных устройств железнодорожной автоматики.*

**Ключевые слова:** стрелочный перевод, линейный электродвигатель, тяговая характеристика.

### Актуальность работы

Внедрение в жизнь скоростного движения в Украине ставит задачи перехода на новые более эффективные, быстродействующие и надежные типы стрелочных переводов, поскольку они являются одним из важнейших исполнительных элементов железнодорожной автоматики, обеспечивающим пропускную способность.

Стрелочные переводы могут ограничивать эксплуатационную готовность и пропускную способность железнодорожных линий, если допустима на них скорость движения поездов не соответствует скорости на главных или боковых путях. С отказами стрелочных переводов связаны частые нарушения движения поездов [3]. А высокоскоростной перевод с очень длинными острьями должен развивать тяговое усилие значительно больше чем обычный.

Наряду с усовершенствованием существующих стрелочных приводов путем замены ненадежных элементов, мировыми компаниями производится работа над созданием новых их типов. Общая концепция новых стрелочных переводов, как для обычного, так и высокоскоростного движения, сводится к обеспечению максимальной надежности и безопасности, при которых затраты на текущее содержание минимальны, а также к снижению затрат времени на укладку стрелочного перевода за счет отказа от предварительного монтажа на вспомогательной площадке, снижение энергопотребления, расширение функциональных возможностей привода. Современные стрелочные переводы оснащаются модифицированной и оптимизированной системой привода.

© С.Г. Буряковский, Ар.С. Маслий, Б.Г. Любарский, Ан.С. Маслий, 2015

### Материалы и результаты исследований

Одним из путей повышения интенсивности движения является создание стрелочных переводов, позволяющих сократить время перевода остряков. Другим важным аспектом интенсификации движения является автоматизация процесса подбивки балласта специальными автоматизированными комплексами, которые работают в непрерывном режиме движения по магистрали. Кратчайшим путем решения этой задачи применительно к стрелочному переводу есть внедрение приводов «моношпального» типа. Таким образом, предлагаемый путь создания новых стрелочных переводов является актуальным с точки зрения необходимости перехода к новой, современной, элементной базе систем автоматики.

Основными задачами при разработке моношпального вентильно-индукторного привода стрелочного перевода [1] было упрощение кинематической линии, а также создание регулируемого микропроцессорного электропривода, что позволило обеспечить возможность варьирования времени перевода, осуществлять плавный довод остряка к рамному рельсу, обеспечить защиту двигателя от перегрузок без использования фрикционного сцепления. Значительная часть энергии стрелочного привода тратится в механической части, а именно редукторе. Эту проблему можно решить путем применения в стрелочном переводе безредукторного привода на базе линейного электродвигателя (ЛД). На рис. 1 показаны поперечное и продольное сечения предлагаемой машины, помещенной в шпалу.

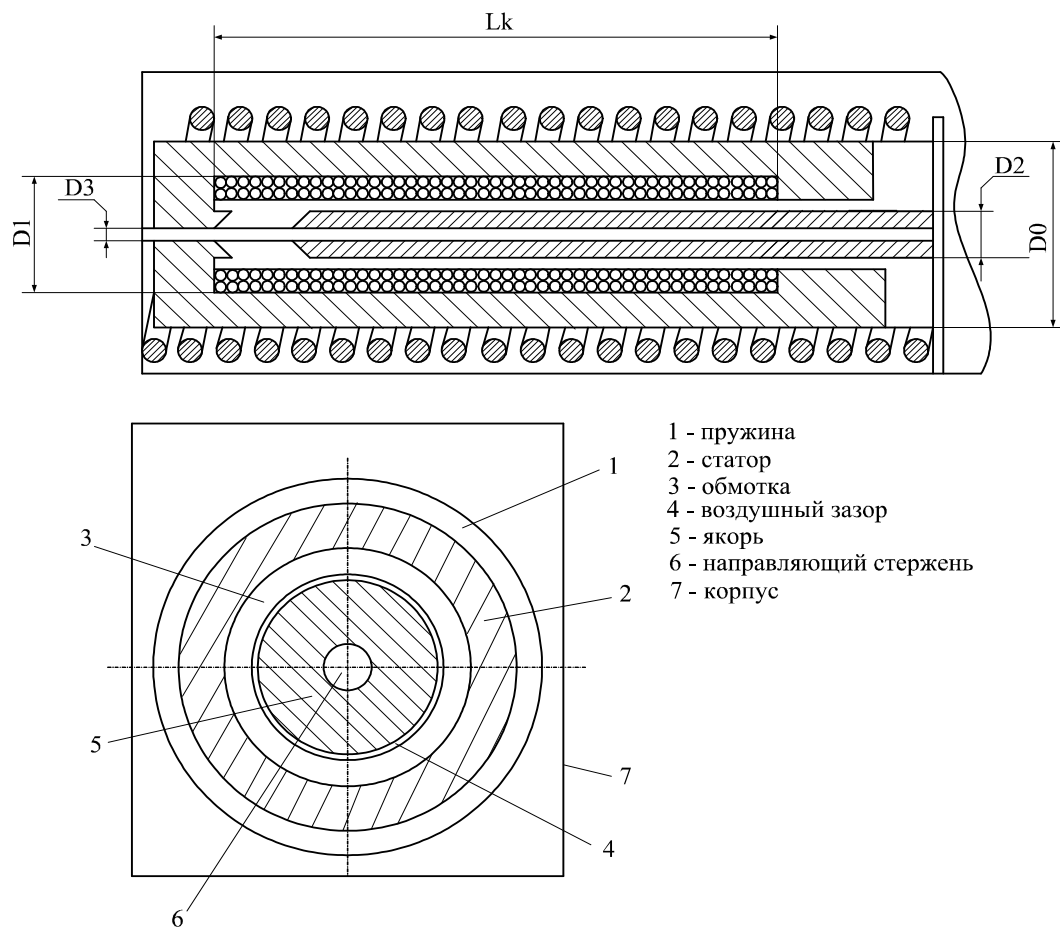


Рис. 1. Конструкция ЛД в шпале

В начале перевода расстояние между якорем и статором соответствует расстоянию между острием и рамным рельсом и равно 152 мм. Создаваемая машиной электромагнитная сила перемещает якорь по направляющему стержню. Применение пружин обусловлено недостаточным значением электромагнитной силы в начале перевода, а также обеспечением необходимого усилия в случае примерзания острия к рамному рельсу. Весь привод стрелочного перевода состоит из двух представленных частей для осуществления реверсивной работы.

Усилие перевода стрелки зависит от веса ее перемещаемых частей, типа рельсов, места закрепления переводных тяг и коэффициента трения остриев о подушки. Все указанные величины, за исключением последней, известны. Величина коэффициента трения зависит от состояния стрелки, качества смазки стрелочных подушек, чистоты обработки их поверхностей, а также подошв остриев и других факторов [1, 2].

С учетом выше сказанного, диаграмма распределения сил в рассмотренной системе представлена на рис. 2.

По принципу Даламбера для осуществления перевода остриев необходимо чтобы сумма трёх действующих в системе сил удовлетворяла следующее неравенство [4]:

$$\sum F = F_{эл} + 2 \cdot F_{пр} + F_C > 0, \quad (1)$$

где  $F_{эл}$  – сила электромагнита (электродвигателя),

$F_{пр}$  – сила пружины,

$F_C$  – сила сопротивления.

Электромагнитная сила ЛД зависит от перемещения якоря и может быть описана следующим выражением:

$$F_{эл} = - \frac{dW}{dx}, \quad (2)$$

где  $x$  – перемещение якоря,

$W$  – энергия электромагнита, в основном сосредоточенная в магнитном зазоре, без учета насыщения приближенно ее можно определить:

$$W = - \int_0^i \Psi di = - \int_0^i BS di = - \int_0^i \mu_0 HS di = - \int_0^i \frac{\mu_0 i S}{2x} di = - \frac{\mu_0 i^2 S}{2x} \quad (3)$$

где  $\Psi$  – потокосцепление катушки ЛД,

$i$  – магнитодвижущая сила обмотки ЛД,

$B$  – магнитная индукция в воздушном зазоре,

$S$  – поперечное сечение якоря ЛД,

$\mu_0$  – магнитная проницаемость воздуха,

$H$  – напряженность магнитного поля в воздушном зазоре.

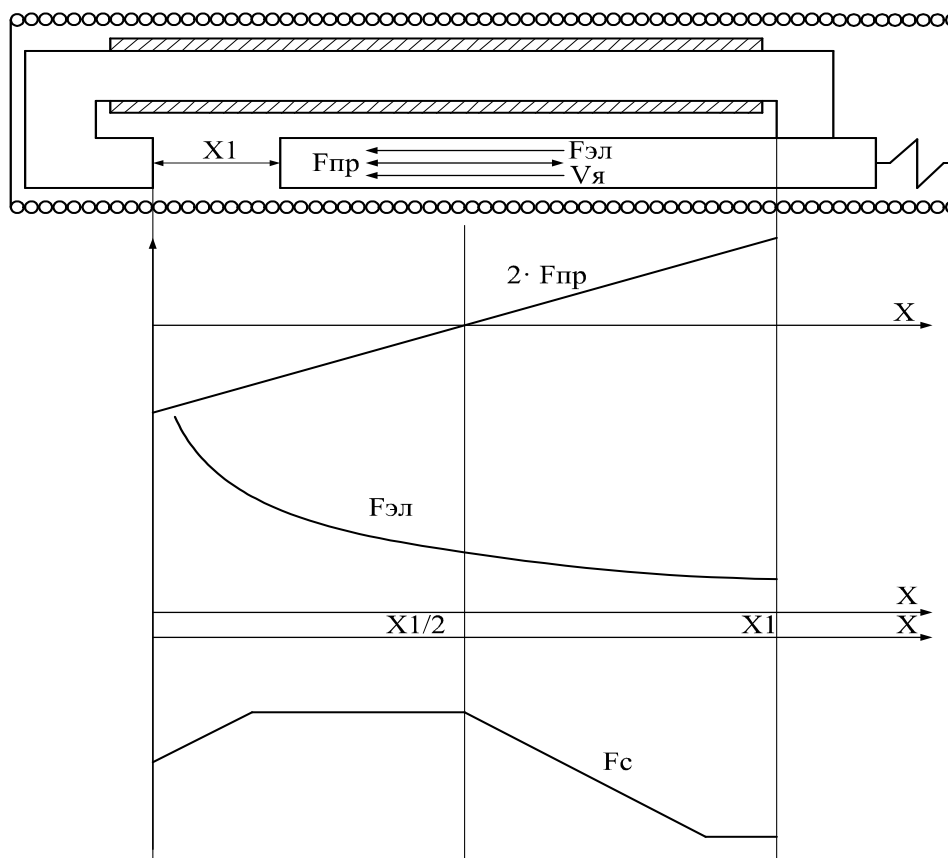


Рис. 2. Взаимодействие сил электропривода

Подставив формулу (3) в формулу (2), получим выражение для электромагнитной силы в окончательном виде

$$F_{эл} = - \frac{d}{dx} \left[ - \frac{\mu_0 i^2 S}{2x} \right] = \frac{\mu_0 i^2 S}{2x^2} \quad (4)$$

Поперечное сечение якоря выразим через диаметры якоря и направляющего стержня

$$S = \left( \frac{D_p + D_n 10^{-3}}{2} \right)^2 \frac{\pi}{4} = \frac{\pi (D_p + 5 \cdot 10^{-3})^2}{16} \quad (5)$$

$D_p$  – диаметр якоря;

$D_n$  – диаметр направляющего стержня.

Определим максимальную магнитодвижущую силу

$$i = J \cdot S_L \quad (6)$$

$J$  – плотность тока;

$S_L$  – продольное сечение катушки.

Продольное сечение катушки можно выразить через выражение

$$S_L = \left( \frac{D_k}{2} - \frac{D_p}{2} \right) \cdot L_k, \quad (7)$$

где  $D_k$  – внешний диаметр катушки

$D_p$  – внешний диаметр якоря,

$L_k$  – длина катушки.

Принимая плотность тока равную  $5 \cdot 10^6 \frac{A}{m^2}$ ,

формула для нахождения магнитодвижущей силы будет иметь следующий вид:

$$i = 2,5 \cdot 10^6 (D_k - D_p) L_k. \quad (8)$$

Важным звеном электропривода является пара пружин, уравнивающих друг друга в среднем положении якоря, и создающих на него дополнительное усилие в момент пуска, когда сила сопротивления оказывает максимальное противодействие. Усилие пружины зависит от степени её сжатия (перемещения якоря) и коэффициента жёсткости

$$F_{пр} = K \left( x - \frac{X_1}{2} \right), \quad (9)$$

где  $K$  – коэффициент жёсткости пружины,

$X_1$  – максимальное расстояние между острием и рамным рельсом.

При принятой аппроксимации (рис.1) силу сопротивления можно описать следующей системой уравнений:

$$F_C = \begin{cases} -b_1; & [0, x_1) \\ -k_1 x + b_2; & (x_1, x_2] \\ -b_3; & (x_2, x_3] \\ k_2 x - b_4; & (x_3, x_4] \end{cases}. \quad (10)$$

Последним конструктивным параметром, необходимым для расчёта пружины, есть коэффициент жёсткости, вычисляемый по выражению

$$K = \frac{G d_D^4}{8 d_F^3 n}, \quad (11)$$

где  $G$  – модуль сдвига (для стали равный  $8 \cdot 10^{10} \frac{H}{m}$ ),

$d_D$  – диаметр проволоки,

$d_F$  – диаметр намотки,

$n$  – количество витков пружины.

С использованием ранее полученных выражений в пакете MATLAB была написана программа для расчета электромагнитной силы, а также коэффициента жесткости пружины. В качестве нагрузки использовалась марка перевода 1/22. На основании такой программы была получена характеристика распределения сил линейного электропривода.

## Выводы

Применение ЛД в стрелочном переводе позволяет не только полностью разместить его в шпале, упростить кинематическую линию, но также избавиться от редуктора, как одного из самых ненадёжных элементов механической системы. В результате было представлено конструктивное решение привода, проведён расчёт действующих электромагнитных сил, а также коэффициента жесткости пружины, построены графики распределения сил.

Расчет электромагнитной силы подтвердил возможность использования ЛД в стрелочных переводах. Из-за простоты конструкции и малого количества узлов и механизмов возможно в дальнейшем снижение затрат на его обслуживание при эксплуатации. Применение микропроцессорной техники позволит упростить процесс управления стрелкой и добиться требуемой тяговой характеристики.

Расчет также показал необходимость использования пружины для создания дополнительного усилия в начальный момент перевода, что позволяет уменьшить габаритные размеры обмоток электродвигателя.

Полученные результаты служат основанием для создания полноценной математической модели ЛД, проведения исследования и анализа его работы в приводе стрелочного перевода при различных воздействующих факторах, синтезировать возможные схемы управления и оценить эффективность их работы.

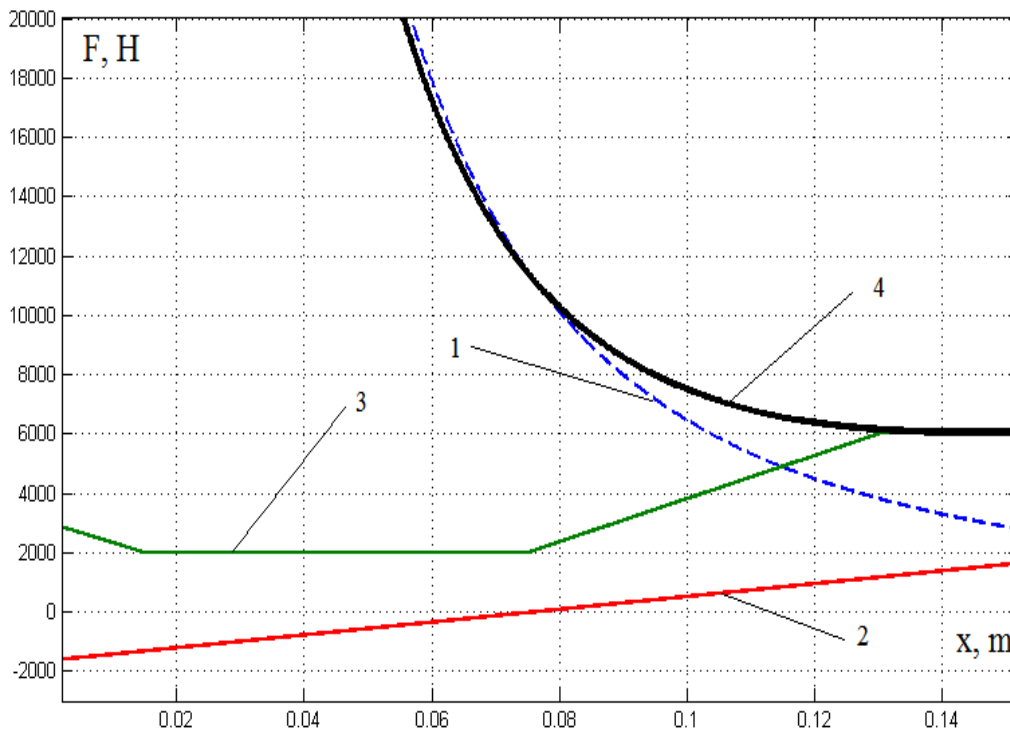


Рис. 3. Характеристика распределения сил линейного привода стрелочного перевода:

1 – электромагнитная сила ЛД; 2 – сила пружины; 3 – сила сопротивления; 4 – сила, приложенная к острям со стороны ЛД

#### Литература

1. Маслий А.С. Микропроцессорный вентильно-индукторный электропривод стрелочного перевода моношпального типа: дис. к.т.н.: 05.09.03 / Маслий Артем Сергеевич. Харьков, 2014. – 192 с.
2. Смирнов В.В. Синтез системы управления регулируемого электропривода стрелочного перевода как многомассовой электромеханической системы: дис. к.т.н.: 05.09.03 / Смирнов Василий Васильевич. Харьков, 2012. – 219 с.
3. Резников Ю.М. Стрелочные электроприводы электрической и горочной централизации / Резников Ю.М. Москва: Транспорт, 1975. – 152 с.
4. Уайт Д. Электромеханическое преобразование энергии / Уайт Д., Вудсон Г. – Москва: Издательство «Энергия», 1964. – 528 с.

**С.Г. Буряковский, Ар.С. Маслий, Б.Г. Любарский, Ан.С. Маслий. РОЗРАХУНОК ТЯГОВОЇ ХАРАКТЕРИСТИКИ ЛІНІЙНОГО ДВИГУНА СТРЕЛОЧНОГО ПЕРЕВОДУ.** Метою роботи є обґрунтування можливості застосування лінійного двигуна в стрілочному переводі, а також розгляд методики розрахунку його тягової характеристики. Така конструкція спрощує монтаж та обслуговування переводу. Запропонований розрахунок дозволяє отримати необхідні параметри приводу,

оптимізувати конструкцію двигуна для різних типів стрілочних переводів та умов експлуатації. Даний підхід — це наступний крок у розвитку теорії виконавчих пристроїв залізничної автоматики.

**Ключові слова:** стрілочний перевід, лінійний електродвигун, тягова характеристика.

**S.G. Buryakovskiy, Ar.S. Masliy, B.G. Lyubarskiy, An.S. Masliy. THE CALCULATION OF TRACTION CHARACTERISTIC OF THE LINEAR MOTOR FOR A SWITCH.** The aim of the work is to ground the possibility of linear motor utilization in switches, and to consider the method of its traction characteristic calculation. This design simplifies the installation and the maintenance of switches. The proposed calculation provides the necessary drive parameters to optimize the design of the engine for different types of switches and operating conditions. The given approach is the next step in the development of the theory of railway automation actuators.

**Key words:** switch, linear motor, traction characteristic.

Рецензент д.т.н., профессор кафедры «Приборы и методы неразрушающего контроля» Б.М. Горкунов (НТУ «ХПИ»)

Поступила 22.12.2014г.