

## УДК 629.423.31.016.56

В. Ф. НОВИКОВ<sup>1\*</sup>

<sup>1\*</sup>Отдел «Электротехнические комплексы», Институт транспортных систем и технологий Национальной академии наук Украины, ул. Писаржевского, 5, Днепропетровск, Украина, 49005, тел. +38 (066) 01 99 673, эл. почта nvf2005@ua.fm, ORCID 0000-0002-1695-2714

## ПОДТВЕРЖДЕНИЕ АДЕКВАТНОСТИ МАТЕМАТИЧЕСКОЙ МОДЕЛИ ЛИНЕЙНОГО СИНХРОННОГО ДВИГАТЕЛЯ

**Цель.** Для снижения трудозатрат и объёма машинного времени при проектировании линейных синхронных двигателей с возбуждением от источника постоянного магнитного поля высокоскоростного наземного транспорта необходимо использовать инженерную методiku. Целью данного исследования является подтверждение адекватности предложенной ранее математической модели такого двигателя и принятых допущений. Предполагается также подтвердить возможность применения метода расчёта тягового усилия, возникающего в двигателе при взаимодействии постоянного магнитного поля системы возбуждения транспортного средства с катушкой путевой структуры. **Методика.** Поскольку для эмпирических теорий положительный результат эксперимента не является стопроцентным доказательством истинности, для однозначного заключения об адекватности разработанной модели и эффективности разработанных методов необходимо произвести их проверку на фальсифицируемость. В соответствии с этим критерием необходимо не просто провести эксперимент, результаты которого совпадут с расчётными, но нужно ещё избежать ошибок, вызванных случайным их совпадением. Для этого проводится эксперимент с изменяющимися параметрами. **Результаты.** В критическом эксперименте изменения конфигурации системы возбуждения проведены так, чтобы формы зависимости тягового усилия от смещения существенно отличались. Сравнение результатов расчётных и экспериментальных значений тягового усилия для различных конфигураций показало, что различия незначительны и легкообъяснимы погрешностью измерений и неравномерностью зазоров между полюсами возбуждения и катушками путевой структуры. **Научная новизна.** Доказана адекватность математической модели линейного синхронного двигателя без ферромагнитного магнитопровода и принятых допущений, а также применимость метода расчёта тягового усилия, возникающего в нём, при взаимодействии постоянного магнитного поля системы возбуждения транспортного средства с катушкой путевой структуры. Данное доказательство построено на проведении критического эксперимента путём сравнения расчётных и экспериментально полученных значений величины тягового усилия для различных конструкций линейного синхронного двигателя. **Практическая значимость.** В работе доказана адекватность математической модели линейного синхронного двигателя высокоскоростного транспорта с возбуждением от источника постоянного магнитного поля и принятых допущений. Автором также доказана применимость метода расчёта тягового усилия, возникающего в нём, при взаимодействии постоянного магнитного поля системы возбуждения транспортного средства с катушкой путевой структуры. Применение подобной методики позволит снизить трудозатраты и объём машинного времени при проектировании линейных синхронных двигателей с возбуждением от источника постоянного магнитного поля высокоскоростного наземного транспорта.

**Ключевые слова:** высокоскоростной наземный транспорт; линейный синхронный двигатель; критерий Поппера; критический эксперимент; постоянный магнит

### Введение

Для обеспечения возможности рационального выбора конструктивных параметров линейного синхронного двигателя [2; 3; 7; 9; 10; 11; 13] высокоскоростного магнитолевитирующего экипажа [2; 4; 12] с возбуждением от постоянных магнитов, т.е. для решения обратной задачи с некорректными условиями, необходимо иметь инженерный (не связанную с большим объёмом вычислений) метод определения тягового усилия,

возникающего при взаимодействии магнитного поля возбуждения с током в катушках путевой структуры. Работоспособность этого метода нуждается в доказательстве.

### Цель

Целью данного исследования является подтверждение адекватности математической модели линейного синхронного двигателя и принятых допущений, а также применимость метода

## ЕЛЕКТРИЧНИЙ ТРАНСПОРТ

расчета тягового усилия, возникающего в нем, при взаимодействии постоянного магнитного поля системы возбуждения транспортного средства с катушкой путевой структуры [8].

**Методика**

Из общего курса философии известно, что единственным критерием истины является практика [5]. Поэтому, подтверждением адекватности математической модели линейного синхронного двигателя и принятых допущений, а также применимость метода расчета тягового усилия, возникающего в нем, при взаимодействии постоянного магнитного поля системы возбуждения транспортного средства с катушкой путевой структуры может являться только соответствие полученных теоретических и экспериментальных данных.

С другой стороны, из того же общего курса философии известно, что доказательством неправильности может служить даже единичный отрицательный результат, а положительный результат сам по себе не является доказательством истинности эмпирической теории.

Данное противоречие может быть разрешено, если обратиться к гносеологии. Сэр Karl Raimund Popper, являющийся основоположником критического рационализма, разработал метод определения научности теоретических посылок – критерий фальсифицируемости, часто называемый критерием Поппера. Теория является фальсифицируемой и, соответственно, научной в том случае, если существует методологическая возможность ее опровержения путём постановки того или иного эксперимента, даже если такой эксперимент еще не был поставлен [1].

В соответствии с этим критерием, необходимо не просто провести эксперимент, результаты которого совпадут с расчетными, но нужно еще избежать ошибок, вызванных случайным их совпадением. Для этого необходимо провести эксперимент с изменяющимися параметрами.

Допустим, что в результате проведения эксперимента измеренная зависимость силы от смещения совпала с расчетной.

Вероятность случайного совпадения сложных кривых достаточно низка, но для постановки критического эксперимента ее можно

принять  $p_1 = 0,5$ .

Будем считать, что при изменении конструкции вероятность случайного совпадения кривых тоже  $p_2 = 0,5$ .

Аналогично, для следующего изменения конструкции –  $p_3 = 0,5$  и так далее.

При существенном изменении конструкции линейного двигателя и, соответственно, существенном изменении формы зависимости силы тяги от смещения можно считать каждое измерение независимым событием. Следовательно, вероятность случайного совпадения формы зависимости силы от смещения составляет

$$p_{1-2} = p_1 \times p_2 = 0,5 \times 0,5 = 0,25.$$

Для трех кривых

$$p_{1-2-3} = p_1 \times p_2 \times p_3 = 0,5 \times 0,5 \times 0,5 = 0,125.$$

После четвертого эксперимента данная вероятность составляет

$$\begin{aligned} p_{1-2-3-4} &= p_1 \times p_2 \times p_3 \times p_4 = \\ &= 0,5 \times 0,5 \times 0,5 \times 0,5 = 0,0625. \end{aligned}$$

Уже после четырех независимых измерений вероятность случайного совпадения теоретических и экспериментальных результатов составляет 6,25 %, что ниже средней погрешности экспериментальных исследований. С учетом того, что вероятность случайного совпадения сложных кривых гораздо ниже принятого значения  $p = 0,5$ , можно считать, что эксперимент с четырьмя независимыми измерениями является критическим. Это даст возможность сделать заключение об адекватности математической модели линейного синхронного двигателя и принятых допущений, а также применимость метода расчета тягового усилия, возникающего в нем, при взаимодействии постоянного магнитного поля системы возбуждения транспортного средства с катушкой путевой структуры.

Для проведения критического эксперимента необходимо решить следующие задачи:

- разработка экспериментального стенда;
- разработка метода определения знакопеременного тягового усилия, возникающего в линейном двигателе;
- изменение геометрических параметров линейного двигателя, приводящего к существ-

## ЕЛЕКТРИЧНИЙ ТРАНСПОРТ

венному изменению формы кривой тягового усилия.

Для экспериментального исследования линейного тягового электропривода на опытно-экспериментальном полигоне ИТСТ НАНУ «Трансмаг» был создан стенд. Экспериментальный стенд для исследования ЛСТЭП включает в себя путевую эстакаду, транспортное средство и преобразователь частоты с непосредственной связью. Путевая эстакада (рис. 1) представляет собой конструкцию, изготовленную из немагнитного алюминиевого профиля 1, которая посредством опор 3 крепится к фундаментным блокам 4. Эстакада по общей длине состоит из двух секций. Первая секция длиной 8 750 мм находится в неотапливаемом ангаре 5 и является продолжением четырехточечного стенда электродинамического подвеса 6 [8].

Вторая секция длиной 21 250 мм является продолжением первой секции и расположена на открытом воздухе. Соединение секций между собой осуществляется посредством опускаемого моста 7.

После окончания экспериментов мост 7 опускается, что необходимо для закрытия ворот ангара.

На путевой эстакаде уложены два ряда путевых катушек, которые крепятся на немагнитных подложках. Длинные стороны путевых катушек расположены в направлении перемещения платформы. На эстакаде закреплены направляющие рельсы, которые используются для опирания ТС. Рядом с направляющими рельсами размещается датчик положения.

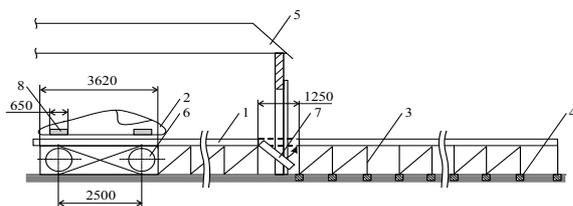


Рис. 1. Стенд для исследования ЛСЭД

Fig. 1. Stand for research LSEM

Линейный синхронный двигатель служит для перемещения ТС вдоль экспериментального стенда. Система возбуждения образуется четырьмя сверхпроводящими магнитами 8, расположенными на транспортном средстве 2, которые можно заменить блоками постоянных магнитов. Трехфазная путевая обмотка образо-

вана катушками, выполненными из прямоугольного медного провода. Ряды катушек расположены друг от друга с межосевым расстоянием 1 600 мм, равным поперечному расстоянию между осями сверхпроводящих магнитов. Продольное расстояние между осями магнитов макетного образца ВСНТ равно 2 500 мм, поэтому шаг размещения катушек путевой обмотки принят равным  $2500/6=416,6$  мм.

В рабочем режиме транспортное средство 2 перемещается на колесах по рельсам. При этом электромагнитный зазор между плоскостями средних сечений обмоток двигателя составляет 110 мм, а зазор в свету лежит в пределах 15–18 мм. Для управления работой ЛСД имеется датчик положения ТС относительно путевой структуры. Датчик конструктивно состоит из излучателя, расположенного на движущемся ТС, и приемника, размещенного на эстакаде.

Для оценки качества математической модели можно выполнить сравнение расчетного и измеренного тягового усилия. В литературе не описаны методы измерения знакопеременных тяговых усилий вдоль оси перемещения при отсутствии механической связи между транспортным средством и эстакадой в направлении перемещения, поэтому нами было предложено следующее техническое решение [6].

Измерения производились косвенным методом, в связи с тем, что напрямую мгновенные динамические усилия, действующие на транспортное средство, измерить не представлялось возможным. Фактически измерялись усилия, действующие на транспортное средство при смещении его вдоль путевой структуры в условиях зафиксированных мгновенных распределений токов в фазах путевой структуры и, соответственно, при фиксированных распределениях магнитного поля вдоль путевой структуры. Для моделирования мгновенных значений токов в фазах использовался постоянный ток.

В качестве ТС вместо макетного экипажа при постановке критического эксперимента, связанного с существенным изменением конструктивных параметров, используется экспериментальная тележка, выполненная из алюминиевых труб 1 прямоугольного профиля. На ней крепятся колеса 2, движущиеся по направляющим рельсам стенда и блоки постоянных магнитов возбуждения 3 (рис. 2).

## ЕЛЕКТРИЧНИЙ ТРАНСПОРТ

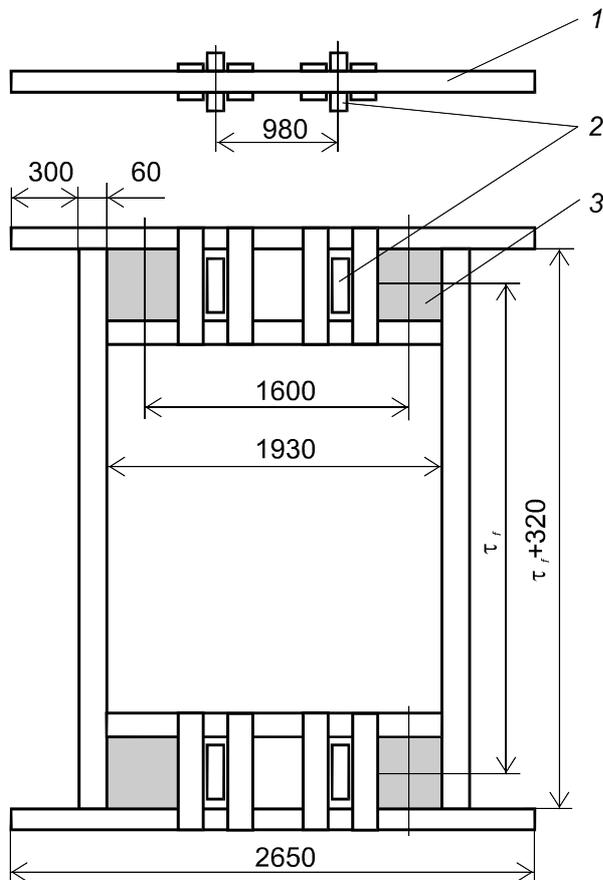


Рис. 2. Экспериментальная тележка

Fig. 2. Experimental bogie

Для сглаживания пульсаций тягового усилия необходимо подавить пятую и седьмую гармоники потокоцепления, так как более высокие гармоники существенного влияния на форму кривой усилия не оказывают.

Для подавления высших гармоник в электрических машинах применяются различные методы, среди которых изменение длины полюсов, укорочение шага обмотки и т.д.

Для экспериментального подтверждения адекватности математической модели линейного синхронного двигателя и принятых допущений, а также применимости метода расчета тягового усилия, возникающего в нем, при взаимодействии постоянного магнитного поля системы возбуждения транспортного средства с катушкой путевой структуры выбраны следующие конфигурации систем возбуждения:

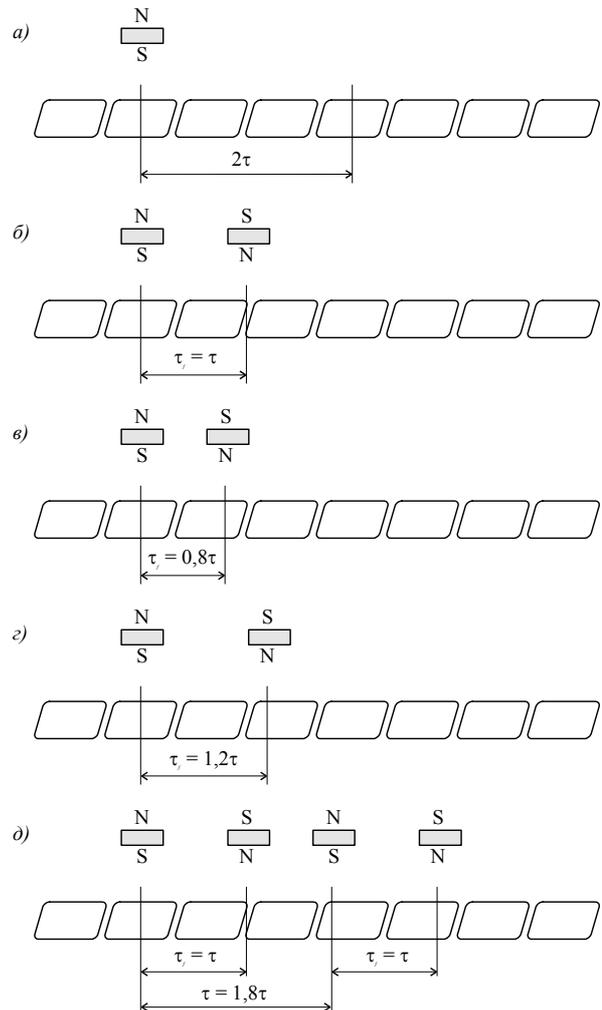


Рис. 3. Конфигурации систем возбуждения

Fig. 3. Configuration of excitation systems

## Результаты

Результаты сравнения расчетных (кривая 2) и экспериментальных значений (кривая 1) для различных конфигураций системы возбуждения приведены на рис. 4–7.

Как видно из рис. 4, результирующая сила является крайне неравномерной. На периоде имеются 3 зоны отсутствия силы тяги. Причем основной вклад в несинусоидальность э.д.с. и размах усилий вносит 2-я гармоника потокоцепления.

С целью подавления четных гармоник потокоцепления добавляется еще один блок магнитов противоположной полярности, смещенный относительно первого на величину полюсного деления  $\tau$  (рис. 3, б). В данном случае (рис. 5)

## ЕЛЕКТРИЧНИЙ ТРАНСПОРТ

на кривой зависимости усилия от смещения отсутствуют провалы, но наблюдается влияние 5-й и 7-й гармоник.

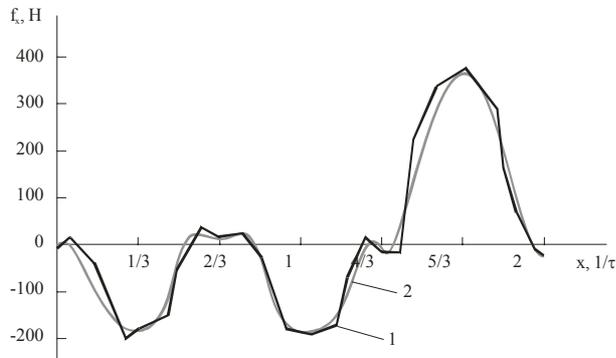


Рис. 4. Зависимость тягового усилия от смещения для конфигурации системы возбуждения (рис. 3, а)

Fig. 4. The dependence of the driving force of the offset configuration of the excitation system (Fig. 3, a)

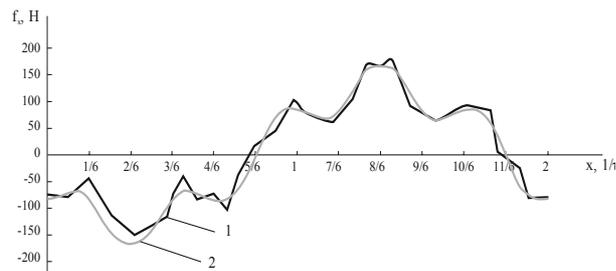


Рис. 5. Зависимость тягового усилия от смещения для конфигурации системы возбуждения (рис. 3, б)

Fig. 5. The dependence of the driving force of the offset configuration of the excitation system (Fig. 3, b)

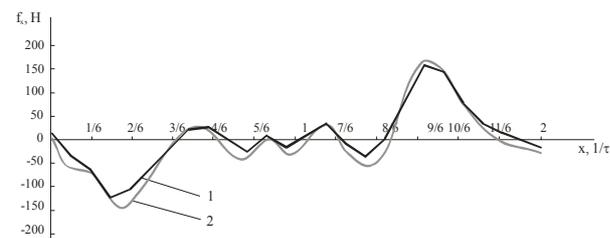


Рис. 6. Зависимость тягового усилия от смещения для конфигурации системы возбуждения (рис. 3, в, г)

Fig. 6. The dependence of the driving force of the offset configuration of the excitation system (Fig. 3, c, d)

В случае линейного двигателя с парными полюсами относительное укорочение шага путей обмотки (увеличение шага обмотки возбуждения) (рис. 3, в, г) приводит не столько к подавлению высших нечетных гармоник,

сколько к росту четных, в частности второй (рис. 6).

Был предложен способ косвенного увеличения длины полюсов возбуждения. Данный способ заключается в сдвиге одной пары полюсов возбуждения относительно другой на  $0,2\tau$ , причем внутри пары расстояние между полюсами остается неизменным (рис. 3, е).

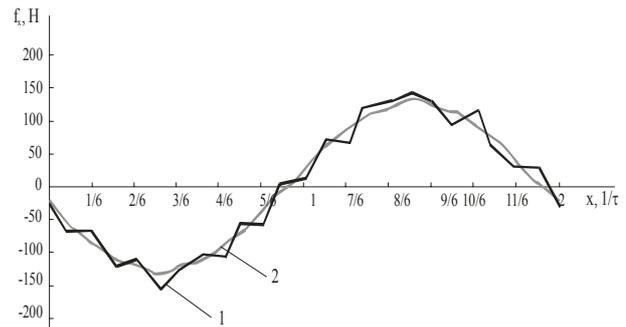


Рис. 7. Зависимость тягового усилия от смещения для конфигурации системы возбуждения (рис. 3, д)

Fig. 7. The dependence of the driving force of the offset configuration of the excitation system (Fig. 3, e)

В этом случае применим принцип суперпозиции в силу того, что в конструкции путей структуры отсутствует магнитопровод, а блоки магнитов находятся за пределами области влияния друг на друга.

Зависимость тягового усилия от смещения (рис. 7) в данном случае имеет практически синусоидальный характер. Существующие отличия легко объяснимы погрешностью измерений и неравномерностью зазоров между полюсами возбуждения и катушками путей структуры.

### Научная новизна и практическая значимость

Доказана адекватность математической модели линейного синхронного двигателя и принятых допущений, а также применимость метода расчета тягового усилия, возникающего в нем, при взаимодействии постоянного магнитного поля системы возбуждения транспортного средства с катушкой путей структуры. Данное доказательство построено на проведении критического эксперимента путем сравнения расчетных и экспериментально полученных значений величины тягового усилия для различных конструкций линейного синхронно-

## ЕЛЕКТРИЧНИЙ ТРАНСПОРТ

го двигателя без ферромагнитного магнитопровода с возбуждением от постоянных магнитов высокоскоростного магнитолевитирующего транспортного средства.

**Выводы**

Для снижения трудозатрат и объема машинного времени при проектировании линейных синхронных двигателей с возбуждением от источника постоянного магнитного поля высокоскоростного наземного транспорта можно использовать инженерную методику.

**СПИСОК ИСПОЛЬЗОВАННЫХ ИСТОЧНИКОВ**

1. Введение в философию : учеб. пособие для вузов / Фролов И. Т. [и др.]. – 3-е изд., перераб. и доп. – Москва : Республика, 2003. – 623 с.
2. Высокоскоростной магнитный транспорт с электродинамической левитацией / В. А. Дзензерский, В. И. Омеляненко, С. В. Васильев [и др.]. – Киев : Наук. думка, 2001. – 479 с.
3. Исследование математической модели привода с линейным синхронным двигателем в переходных режимах / А. Н. Зайцев, В. Э. Воскобойник, С. В. Комаров, А. С. Ворошилов // Вісн. Дніпропетр. нац. ун-ту залізн. трансп. ім. акад. В. Лазаряна. – Дніпропетровськ, 2006. – Вип. 11. – С. 155–159.
4. Корниенко, В. В. Высокоскоростной электрический транспорт: Мировой опыт / В. В. Корниенко, В. И. Омеляненко. – Харьков : НТУ ХПИ, 2007. – 159 с.
5. Ленин, В. И. Материализм и эмпириокритицизм / В. И. Ленин. – Москва : Звено, 1926. – 400 с.
6. Новиков, В. Ф. Усилия в линейном синхронном двигателе испытательного участка / В. Ф. Новиков, А. С. Ворошилов, В. И. Матин // Транспорт : зб. наук. пр. / Дніпропетр. держ. техн. ун-т залізн. трансп. – Дніпропетровськ, 2001. – Вип. 9. – 184 с.
7. Поляков, В. А. Терминальное управление движением магнитолевитирующего поезда с использованием линейного синхронного двигателя / В. А. Поляков, Н. М. Хачапуридзе // Вісн. Дніпропетр. нац. ун-ту залізн. трансп. ім. акад. В. Лазаряна. – Дніпропетровськ, 2006. – Вип. 12. – С. 138–145.
8. Расчётно-экспериментальный метод определения потокосцепления / В. Ф. Новиков, С. В. Бурьялов, В. Э. Воскобойник, В. А. Дзензерский // Транспорт : зб. наук. пр. / Дніпропетр. держ. техн. ун-т залізн. трансп. – Дніпропетровськ, 2004. – Вип. 5. – 240 с.
9. Characteristic research of electromagnetic force for mixing suspension electromagnet used in low-speed maglev train / Sh.-K. Liu, B. An, S.-K. Liu, Zh.-J. Guo // IET Electric Power Applications. – 2015. – Vol. 9. – Iss. 3. – P. 223–228. doi: 10.1049/iet-epa.2013.0414.
10. Hengkun, L. Thrust for Permanent Magnet Linear Synchronous Motor / L. Hengkun, C. Hu // Applied Mathematics & Information Science. – 2015. – № 2. – P. 927–933.
11. Huang, W. A new modular and complementary double-sided linear flux-switching permanent magnet motor with yokeless secondary / W. Huang, M. Cheng, C. Ruiwu // Electrical Machines and Systems (ICEMS) : 17th Intern. Conf. (22.10.-25.10.2014). – Hangzhou, 2014. – P. 3648–3652. doi: 10.1109/icems.2014.7014124.
12. Liu, Zh. Maglev Train Overview / Zh. Liu, Zh. Long, X. Li // Springer Tracts in Mech. Engineering. – 2015. – P. 1–28. doi: 10.1007/978-3-662-45673-6\_1.
13. Optimization of Multi-Pole Permanent Magnet Synchronous Generator Based 8 Blade Magnetically Levitated Variable Pitch Low Speed Vertical Axis Wind Turbine / M. S. A. Khan, R. K. Rajkumar, R. K. Rajkumar, C. V. Aravind. // Applied Mech. and Materials. – 2014. – Vol. 492. – P. 113–117. doi: 10.4028/www.scientific.net/amm.492.113.

В. Ф. НОВІКОВ<sup>1\*</sup>

<sup>1\*</sup>Відділ «Електротехнічні комплекси», Інститут транспортних систем і технологій Національної академії наук України, вул. Писаржевського, 5, Дніпропетровськ, Україна, 49005, тел. +38 (066) 01 99 673, ел. пошта nvf2005@ua.fm, ORCID 0000-0002-1695-2714

## ПІДТВЕРДЖЕННЯ АДЕКВАТНОСТІ МАТЕМАТИЧНОЇ МОДЕЛІ ЛІНІЙНОГО СИНХРОННОГО ДВИГУНА

**Мета.** Для зниження трудовитрат та обсягу машинного часу при проектуванні лінійних синхронних двигунів із порушенням від джерела постійного магнітного поля високошвидкісного наземного транспорту необхідно використовувати інженерну методику. Метою даного дослідження є підтвердження адекватності запропонованої раніше математичної моделі такого двигуна та прийнятих припущень. Передбачається також підтвердити можливість застосування методу розрахунку тягового зусилля, що виникає в двигуні при взаємодії постійного магнітного поля системи збудження транспортного засобу з котушкою шляхової структури. **Методика.** Оскільки для емпіричних теорій позитивний результат експерименту не є стовідсотковим доказом істинності, для однозначного висновку про адекватність розробленої моделі та ефективності розроблених методів необхідно провести їх перевірку на фальсифіковність. Відповідно до цього критерію необхідно не просто провести експеримент, результати якого співпадуть із розрахунковими, але потрібно ще уникнути помилок, викликаних випадковим їх збігом. Для цього проводиться експеримент зі змінними параметрами. **Результати.** У критичному експерименті зміни конфігурації системи збудження проведені так, щоб форми залежності тягового зусилля від зсуву суттєво відрізнялися. Порівняння результатів розрахункових та експериментальних значень тягового зусилля для різних конфігурацій показало, що відмінності незначні та легкопояснювальні похибкою вимірювань, і нерівномірністю зазорів між полюсами збудження й котушками шляхової структури. **Наукова новизна.** Доказано адекватність математичної моделі лінійного синхронного двигуна без феромагнітного магнітопроводу та прийнятих припущень, а також застосовність методу розрахунку тягового зусилля, яке виникає в ньому, при взаємодії постійного магнітного поля системи збудження транспортного засобу з котушкою шляхової структури. Даний доказ побудовано на проведенні критичного експерименту шляхом порівняння розрахункових та експериментально отриманих значень величини тягового зусилля для різних конструкцій лінійного синхронного двигуна. **Практична значимість.** У роботі доведено адекватність математичної моделі лінійного синхронного двигуна високошвидкісного транспорту з порушенням від джерела постійного магнітного поля та прийнятих припущень. Автором також доведена застосовність методу розрахунку тягового зусилля, що виникає в ньому, при взаємодії постійного магнітного поля системи збудження транспортного засобу з котушкою шляхової структури. Застосування такої методики дозволить знизити трудовитрати й обсяг машинного часу при проектуванні лінійних синхронних двигунів із порушенням від джерела постійного магнітного поля високошвидкісного наземного транспорту.

*Ключові слова:* високошвидкісний наземний транспорт; лінійний синхронний двигун; критерій Поппера, критичний експеримент; постійний магніт

V. F. NOVIKOV<sup>1\*</sup>

<sup>1\*</sup>Dep. «Electrical Systems», Institute of Transport Systems and Technologies of the National Academy of Sciences of Ukraine, Pysarzhevskiy St., 5, Dnipropetrovsk, Ukraine, 49005, tel. +38 (066) 01 99 673, e-mail nvf2005@ua.fm, ORCID 0000-0002-1695-2714

## CONFIRMATION OF THE MATHEMATICAL MODEL ADEQUACY OF A LINEAR SYNCHRONOUS MOTOR

**Purpose.** To reduce labor costs and the amount of computer time in the design of linear synchronous motors with excitation from a source of a constant magnetic field of high-speed ground transportation it is necessary to use engineering methods. The purpose of this study is to confirm the adequacy of the previously proposed mathematical model of this engine and assumptions. It is also intended to confirm the possibility of applying the method of calcu-

## ЕЛЕКТРИЧНИЙ ТРАНСПОРТ

lation of traction that occurs in the engine in the interaction of the permanent magnetic field of the excitation system of a vehicle with a coil track structure. **Methodology.** As for empirical theories the positive result of the experiment is not absolute proof of the truth, for an unambiguous conclusion about the adequacy of the developed model and the effectiveness of the developed methods need to be tested for falsification. In accordance with this criterion, it is necessary to conduct an experiment, the results of which will coincide with the calculation but you also need to avoid errors caused by random coincidences. For this purpose the experiments with varying parameters are conducted. **Findings.** In a critical experiment configuration changes of the excitation system were held so that the shape dependence of traction from displacement is differed significantly. The comparison of the results of the calculated and experimental values of traction for different configurations showed that the differences are minor and easily explained by measurement error and uneven gaps between the poles and excitation coils of the track structure. **Originality.** The adequacy of the mathematical model of a linear synchronous motor without a ferromagnetic magnetic circuit and the assumptions and applicability of the calculation method of traction forces involved in it, at the interaction of a permanent magnetic field of the excitation system of a vehicle with a coil track structure were proved. This proof is built on conducting a critical experiment by comparing the calculated and experimentally obtained values of the magnitude of traction for different structures of the linear synchronous motor. **Practical value.** The adequacy of the mathematical model of a linear synchronous motor of high-speed transport with the excitation of the DC magnetic field and the accepted assumptions is proved in this paper. The author also proved the applicability of the method of calculation of traction that occurs in it, the interaction of static magnetic field of the excitation system of a vehicle with a coil track structure. The use of this technique will reduce the amount of labor and machine time for the design of linear synchronous motors from the DC magnetic field of high-speed ground transportation.

*Keywords:* high-speed ground transportation; linear synchronous motor; Popper's criterion; critical experiment; permanent magnet

## REFERENCES

1. Frolov I.T. *Vvedeniye v filosofiyu* [Introduction to philosophy]. Moscow, Respublika Publ., 2003. 623 p.
2. Dzenzerskiy V.A., Omelyanenko V.I., Vasilev S.V., Matin V.I., Sergeyev S.A. *Vysokoskorostnoy magnitnyy transport s elektrodinamicheskoy levitatsiey* [High-speed transport with magnetic electrodynamic levitation]. Kiyev, Naukova dumka Publ., 2001. 479 p.
3. Zaytsev A.N., Voskoboynik V.E., Komarov S.V., Voroshilov A.S. Issledovaniye matematicheskoy modeli privoda s lineynym sinkhronnym dvigatelem v perekhodnykh rezhimakh [Research of mathematical model of the actuator with a linear synchronous motor in transient modes]. *Visnyk Dnipropetrovskoho natsionalnoho universytetu zaliznychnoho transportu imeni akademika V. Lazariana* [Bulletin of Dnipropetrovsk National University of Railway Transport named after Academician V. Lazaryan], 2006, issue 11, pp. 155-159.
4. Korniyenko V.V., Omelyanenko V.I. *Vysokoskorostnoy elektricheskyy transport: Mirovoy opyt* [High-speed electric vehicles: World experience]. Kharkov, National Technical University «Kharkiv Polytechnic Institute» Publ., 2007. 159 p.
5. Lenin V.I. *Materializm i empiriokrititsizm* [Materialism and empiriocriticism]. Moscow, Zveno Publ., 1926, 400 p.
6. Novikov V.F., Voroshilov A.S., Matin V.I. Usiliya v lineynom sinkhronnom dvigatele ispytatelnogo uchastka [Efforts in the linear synchronous motor of test site]. *Transport: Zbirnyk naukovykh prats Dnipropetrovskoho derzhavnoho tekhnichnoho universytetu zaliznychnoho transportu* [Transport: Proc. of Dnipropetrovsk State Technical University of Railway Transport], 2001, issue 9, 184 p.
7. Polyakov V.A., Khachapuridze N.M. Terminalnoye upravleniye dvizheniyem magnitolevitiruyushchego poyezda s ispolzovaniyem lineynogo sinkhronnogo dvigatelya [Terminal control the movement of the magnetic levitating train using linear synchronous motor]. *Visnyk Dnipropetrovskoho natsionalnoho universytetu zaliznychnoho transportu imeni akademika V. Lazariana* [Bulletin of Dnipropetrovsk National University of Railway Transport named after Academician V. Lazaryan], 2006, issue 12, pp. 138-145.
8. Novikov V.F., Burylov S.V., Voskoboynik V.E., Dzenzerskiy V.A. Raschetno-eksperimentalnyy metod opredeleniya potokostsepleniya [Calculation-experimental method for the determination of flux linkage]. *Transport: Zbirnyk naukovykh prats Dnipropetrovskoho derzhavnoho tekhnichnoho universytetu zaliznychnoho transportu* [Transport: Proc. of Dnipropetrovsk State Technical University of Railway Transport], 2004, issue 5, 240 p.

## ЕЛЕКТРИЧНИЙ ТРАНСПОРТ

9. Liu Sh.-K., An B., Liu S.-K., Guo Zh.-J. Characteristic research of electromagnetic force for mixing suspension electromagnet used in low-speed maglev train. *IET Electric Power Applications*, 2015, vol. 9, issue 3, pp. 223-228. doi: 10.1049/iet-epa.2013.0414.
10. Hengkun, L., Hu C. Thrust for Permanent Magnet Linear Synchronous Motor. *Applied Mathematics & Information Science*, 2015, no. 2, pp. 927-933.
11. Huang W., Cheng M., Ruiwu C. A new modular and complementary double-sided linear flux-switching permanent magnet motor with yokeless secondary. *Electrical Machines and Systems (ICEMS) : 17th International Conference (22.10.-25.10. 2014)*. Hangzhou, 2014, pp. 3648–3652. doi: 10.1109/icems.2014.7014124.
12. Liu Zh., Long Zh., Li X. Maglev Train Overview. *Springer Tracts in Mech. Engineering*, 2015, pp. 1-28. doi: 10.1007/978-3-662-45673-6\_1.
13. Khan M. S. A., Rajkumar R.K., Rajkumar R.K., Aravind C.V. Optimization of Multi-Pole Permanent Magnet Synchronous Generator Based 8 Blade Magnetically Levitated Variable Pitch Low Speed Vertical Axis Wind Turbine. *Applied Mech. and Materials*, 2014, vol. 492, pp. 113-117. doi: 10.4028/www.scientific.net/amm.492.113.

Статья рекомендована к публикации д.т.н., проф. А. М. Афанасовым (Украина),  
д.т.н., ст. науч. сотр. Н. А. Радченко (Украина)

Поступила в редколлегию 03.04.2015

Принята к печати 13.06.2015