

ЕЛЕКТРИЧНИЙ ТРАНСПОРТ

УДК 629.439

В. А. ПОЛЯКОВ¹, Н. М. ХАЧАПУРИДЗЕ^{2*}

¹Институт транспортных систем и технологий НАН Украины, ул. Писаржевского, 5, Днепропетровск, Украина, 49005, тел. +38 (056) 232 30 55, эл. почта p_v_a_725@mail.ru, ORCID 0000-0002-4957-8028

^{2*}Институт транспортных систем и технологий НАН Украины, ул. Писаржевского, 5, Днепропетровск, Украина, 49005, тел. +38 (056) 370 21 86, эл. почта itst@westa-inter.com, ORCID 0000-0003-0682-6068

МОДЕЛЬ ПРОЦЕССА РЕАЛИЗАЦИИ ТЯГОВОЙ СИЛЫ ДВИГАТЕЛЯ МАГНИТОЛЕВИТИРУЮЩЕГО ПОЕЗДА

Цель. Реализация тяги (РТ) двигателем магнитолевитирующего поезда (МЛП) происходит в процессе преобразования подводимой электрической энергии в кинетическую при взаимодействии магнитных полей индуктора и якоря. Исходя из этого, целью настоящего исследования является получение корректного описания такого энергопреобразования. **Методика.** На современном этапе основным и наиболее универсальным инструментом анализа и синтеза процессов и систем является их математическое и, в частности, компьютерное моделирование. В то же время, радикальные преимущества этого инструмента делают еще более важной прецизионность выбора конкретной методики проведения исследования. Особую актуальность это имеет по отношению к столь большим и сложным системам, какими являются МЛП. По этой причине в работе особое внимание уделено аргументированному обоснованию выбора селективных особенностей исследовательской парадигмы. **Результаты.** Данные, полученные в результате анализа существующих версий модели процесса РТ, свидетельствуют о том, что каждая из них, наряду с преимуществами, обладает и существенными недостатками. В связи с этим, одним из основных результатов исследования было построение математической модели указанного процесса, сохраняющей преимущества упомянутых версий, но свободной от их недостатков. В работе аргументированно обоснована рациональность применения (для целей исследования РТ двигателя поезда) интегративной холистической парадигмы, ассимилирующей преимущества теорий электрических цепей и магнитного поля. **Научная новизна.** Приоритетность создания такой парадигмы, а также соответствующей версии модели РТ составляют научную новизну исследования. **Практическая значимость.** Основным проявлением практической значимости работы является возможность, в случае использования ее результатов, существенного повышения эффективности динамических исследований МЛП при одновременном неповышении их ресурсоемкости.

Ключевые слова: магнитолевитирующий поезд; линейный синхронный двигатель; реализация тяги; интегративная парадигма исследования; математическая модель

Введение

Во многих случаях для целей тяги магнитолевитирующих поездов (МЛП) целесообразно использовать линейные синхронные двигатели (ЛСД) [3, 12, 13, 14, 16]. Процессы, протекающие в их различных элементах, взаимосвязаны и являются частями единого суперпроцесса электромагнитно-механического энергопреоб-

разования. Существенная сложность таких процессов побуждает исследователей к поиску путей сепаратного изучения их отдельных компонентов, ключевым из которых является электромагнитный. Его составляющие порознь с успехом могут изучаться [4, 15, 17] в рамках теорий электрических цепей либо электромагнитного поля. Поэтому, различные версии ма-

ЕЛЕКТРИЧНИЙ ТРАНСПОРТ

тематической модели (ММ) процесса тяги (ПТ) ЛСД МЛП строились [8, 9, 19] исходя из указанных автономных парадигм его моделирования.

Анализ свойств имеющихся версий ММ ПТ ЛСД МЛП свидетельствует о том, что каждая из них обладает как преимуществами, так и недостатками. Версии модели, исходящие из теории электрических цепей, достаточно функциональны. Но основным недостатком их уравнений является нестационарность коэффициентов, вызываемая переменностью значений взаимных индуктивностей контуров фаз якоря как между собой, так и с контурами возбуждения, при изменении положения муфтера (подвижных частей ЛСД). Это снижает ценность версий, поскольку затрудняет моделирование [11]. Версии же модели, базирующиеся на теории поля, менее ресурсоемки, однако и менее практичны – вследствие ограниченности их общности, вызываемой недостаточной адекватностью предположений построения этих версий.

Задача исследования. Изложенное свидетельствует об актуальности создания ММ ПТ ЛСД МЛП, ассимилирующей достоинства имеющихся версий такой модели, но свободной от их недостатков [5, 11, 18, 20]. Синтез такой модели является основной задачей настоящей работы.

Методика исследования. Тяга ЛСД является результатом взаимодействия неподвижных друг относительно друга магнитных полей токов его индуктора и якоря. Поэтому, при построении искомой ММ ПТ, в качестве его паттерна должен быть принят элементарный акт такого взаимодействия, который может быть описан выражением закона Ампера [1]:

$$f_{\lambda\chi} = l_{\lambda\chi} \cdot i^{\lambda} \cdot B_{\lambda\chi} \cdot \sin \alpha_{\lambda\chi},$$

где $f_{\lambda\chi}$ – сила взаимодействия полей, создаваемых токами, текущими в цепях χ -го прямолинейного элемента λ -го контура индуктора двигателя и его якоря; $l_{\lambda\chi}$, i^{λ} , $B_{\lambda\chi}$, $\alpha_{\lambda\chi}$ – длина упомянутого элемента, ток в нем, индукция (условно однородного – в пределах элемента) магнитного поля, в котором элемент находится, а также угол между \vec{i}^{λ} и $\vec{B}_{\lambda\chi}$.

Расчетные схемы обмоток возбуждения и якоря двигателя приняты, соответственно, в виде набора гальванически не связанных токопроводящих прямоугольных рамок, соответствующих контурам криомодулей, и трехфазной электрической сети, каждой фазе которой соответствует отдельный контур. Тогда, в произвольный момент времени тяга двигателя определена как векторная сумма величин $\vec{f}_{\lambda\chi}$ $\forall \lambda \in [\overline{1, N}]$, $\chi \in [\overline{1, 4}]$, каждая из которых – это результат взаимодействия поля тока в одном из упомянутых прямолинейных элементов контуров возбуждения с полем, создаваемым токами якорной обмотки. В последнем выражении N – число контуров возбуждения двигателя.

Электродинамика двигателя может быть описана уравнениями второго закона Кирхгофа [1]. Подсистема «контур возбуждения – якорная обмотка», как правило, вырождена [7] – емкостные показатели ее элементов пренебрежимо низки. Поэтому, в инерциальной системе отсчета $Qi^{\nu} \forall \nu \in [A, B, C, M]$ указанным уравнениям может быть придан вид [1]:

$$u_{\rho} = L_{\rho} \cdot \frac{d}{dt} i^{\rho} + L_{\rho\mu} \cdot \frac{d}{dt} i^{\mu} + r_{\rho} \cdot i^{\rho} \\ \forall \rho, \mu \in [A, B, C, M], \quad (1)$$

где u_{ρ} , L_{ρ} , $L_{\rho\mu}$, $r_{\rho} \forall \rho, \mu \in [A, B, C, M]$ – электродвижущие силы (э. д. с.) источников, собственные и взаимные индуктивности, а также омические сопротивления элементов описываемой парциальной подсистемы; $i^{\rho} \forall \rho \in [A, B, C, M]$ – токи в контурах якоря и возбуждения; A, B, C, M – индексы, соответствующие этим контурам; t – текущее время.

Поскольку муфтер ЛСД движется относительно его статора, то многие из величин $L_{\rho\mu} \forall \rho, \mu \in [A, B, C, M]$ имеют переменные во времени значения. Это, в свою очередь, приводит к нестационарности коэффициентов уравнений (1) и, как отмечено, существенно снижает практическую ценность версии модели. С целью устранения указанного недостатка, ПТ ЛСД следует рассматривать относительно координатной системы, в которой обмотки двигателя условно взаимно неподвижны. В таком качестве

ЕЛЕКТРИЧНИЙ ТРАНСПОРТ

ве удобнее всего принять [11] отсчетную систему $C_\alpha \eta^\lambda \forall \lambda \in [\overline{1,3}]$, жестко связанную с α -тым контуром обмотки возбуждения двигателя. Инерциальной $C_\alpha \eta^\lambda \forall \lambda \in [\overline{1,3}]$, в общем случае, не является. В то же время, весьма желательно [6], чтобы уравнения, описывающие динамику электрической подсистемы ЛСД в координатах $\eta^\lambda \forall \lambda \in [\overline{1,3}]$, имели тензорный характер. Такие уравнения могут быть получены [10], из равенств типа (1), путем замены в них локальных производных $\frac{d}{dt}$ абсолютными $\frac{D}{dt}$, а также перехода в этих равенствах к координатам $\eta^\lambda \forall \lambda \in [\overline{1,3}]$. По отношению к произвольному вектору η^β , соотношение между упомянутыми производными, как известно, имеет вид [10]:

$$\frac{D}{dt} \eta^\beta = \frac{d}{dt} \eta^\beta + e_{\beta\kappa\nu} \cdot \omega_\kappa \cdot \eta^\nu,$$

где $e_{\beta\kappa\nu}$, ω_κ – символ Леви-Чивита, а также вектор угловой скорости вращения $C_\alpha \eta^\lambda \forall \lambda \in [\overline{1,3}]$.

После осуществления указанной замены производных, соотношения, полученные из (1), приобретают тензорный характер. Поэтому, в частности, их форма становится инвариантной по отношению к координатам, в которых они записаны. Переход же к координатам $\eta^\lambda \forall \lambda \in [\overline{1,3}]$ выполняется согласно выражениям:

$$\eta^\lambda = \mathfrak{G}_\rho^\lambda \cdot i^\rho \forall \rho \in [A, B, C, M]; \lambda \in [\overline{1,3}],$$

где $\mathfrak{G}_\rho^\lambda$ – матрица преобразования координат:

$$\mathfrak{G}_\rho^\lambda = \frac{\partial \eta^\lambda}{\partial i^\rho} \forall \rho \in [A, B, C, M]; \lambda \in [\overline{1,3}].$$

В свою очередь, выражения для связей вида

$$\eta^\lambda = \eta^\lambda(i^\rho) \forall \rho \in [A, B, C, M]; \lambda \in [\overline{1,3}]$$

могут быть получены исходя из того, что в процессе описываемого координатного преобразования [11] одним из его инвариантов являются, в частности, амплитудные значения токов, протекающих в рассматриваемых контурах.

С помощью же матрицы

$$\mathfrak{G}_\lambda^\rho = \frac{\partial i^\rho}{\partial \eta^\lambda} = (\mathfrak{G}_\rho^\lambda)^T$$

$$\forall \rho \in [A, B, C, M]; \lambda \in [\overline{1,3}],$$

осуществимо обратное преобразование

$$i^\rho = \mathfrak{G}_\lambda^\rho \cdot \eta^\lambda \forall \rho \in [A, B, C, M]; \lambda \in [\overline{1,3}]. \quad (2)$$

После описанных преобразований, уравнения (1) приобретают вид

$$u_\lambda = L_\lambda \cdot \left(\frac{d}{dt} \eta^\lambda + e_{\lambda\alpha\nu} \cdot \omega_\alpha \cdot \eta^\nu \right) + \\ + L_{\lambda\zeta} \cdot \left(\frac{d}{dt} \eta^\zeta + e_{\zeta\alpha\sigma} \cdot \omega_\alpha \cdot \eta^\sigma \right) + r_\lambda \cdot \eta^\lambda \\ \forall \lambda, \nu, \zeta, \sigma \in [\overline{1,3}]. \quad (3)$$

Таким образом, уравнения (3) имеют постоянные коэффициенты, являются тензорными и описывают электродинамику ЛСД в координатах $\eta^\lambda \forall \lambda \in [\overline{1,3}]$. После их (как правило – численного) разрешения относительно переменных $\eta^\lambda \forall \lambda \in [\overline{1,3}]$ последние с использованием соотношений (2) могут быть преобразованы в координаты $i^\rho \forall \rho \in [A, B, C, M]$, значения которых определяют реальные токи в контурах двигателя.

Магнитная цепь ЛСД предполагается ненасыщенной [9]. Поэтому она может считаться условно-линейной подсистемой и, следовательно, к ней применим принцип аддитивности. Исходя из этого, результирующее поле фазы якорной обмотки двигателя в любой точке геометрического пространства $O\Xi_\chi \forall \chi \in [\overline{1,3}]$, в котором реально движется муфтер относительно статора, может описываться как сумма полей, создаваемых в этой точке отдельными катушками такой фазы:

$$B_{\alpha q} = B_{\alpha\kappa q} \cdot e^\kappa; e^\kappa = 1$$

$$\forall \kappa \in [\overline{1, n_p}], q \in [\overline{1, 3}], \quad (4)$$

где n_p – число прямоугольных катушек [3],

ЕЛЕКТРИЧНИЙ ТРАНСПОРТ

включенных в каждую из фаз якоря; $B_{\alpha q}, B_{\alpha kq} \forall k \in [1, n_p]; q \in [1, 3]$ – пространственные компоненты индукции поля, создаваемого всей обмоткой фазы α якоря, а также ее отдельными катушками в рассматриваемой точке этого пространства.

В свою очередь, значения величин $B_{\alpha kq} \forall k \in [1, n_p]; q \in [1, 3]$ определимы согласно выражениям [2]:

$$B_{\alpha k1} = -\frac{i^*}{4 \cdot \pi} \times \left\{ \left[F_{12}(k_1', \varphi', \eta) + F_{12}(k_3', \varphi', \eta) \right]_{\varphi_1=x_0-l}^{\varphi_2=x_0-l-d} - \left[F_{12}(k_2', \psi', \eta) + F_{12}(k_4', \psi', \eta) \right]_{\psi_1=x_0+l}^{\psi_2=x_0+l+d} \right\}_{\eta_1=z_0+h}^{\eta_2=z_0-h};$$

$$B_{\alpha k2} = -\frac{i^*}{4 \cdot \pi} \times \left\{ \left[F_{12}(k_1, \varphi, \eta) + F_{12}(k_4, \varphi, \eta) \right]_{\varphi_1=x_0+l}^{\varphi_2=x_0+l+d} - \left[F_{12}(k_2, \psi, \eta) + F_{12}(k_3, \psi, \eta) \right]_{\psi_1=y_0+a}^{\psi_2=y_0+a+d} \right\}_{\eta_1=z_0+h}^{\eta_2=z_0-h};$$

$$\left\{ F_{12}(k, \varphi, \eta) \right\}_{\eta_1=z_0+h}^{\eta_2=z_0-h} = \left\{ \eta \cdot \operatorname{arctg} \frac{k \cdot \varphi - \eta^2}{\eta \cdot \sqrt{(k + \varphi)^2 + \varphi^2 + \eta^2}} - \varphi \cdot \operatorname{arsh} \frac{k + \varphi}{\sqrt{\varphi^2 + \eta^2}} - \frac{k}{\sqrt{2}} \cdot \operatorname{arsh} \frac{k + 2 \cdot \varphi}{\sqrt{k^2 + 2 \cdot \eta^2}} \right\}_{\eta_1=z_0+h}^{\eta_2=z_0-h};$$

$$B_{\alpha k3} = -\frac{i^*}{4 \cdot \pi} \times \left\{ \left[f_3^0(k_1, \varphi, \eta) + f_3^0(k_4, \varphi, \eta) \right]_{\varphi_1=y_0-a}^{\varphi_2=y_0-a-d} - \left[f_3^0(k_2, \psi, \eta) + f_3^0(k_3, \psi, \eta) \right]_{\psi_1=y_0+a}^{\psi_2=y_0+a+d} \right\}$$

$$+ \left[f_{31}(k_1', \varphi', \eta) + f_{31}(k_3', \varphi', \eta) \right]_{\varphi_1=x_0-l}^{\varphi_2=x_0-l-d} - \left[f_{31}(k_2', \psi', \eta) + f_{31}(k_4', \psi', \eta) \right]_{\psi_1=x_0+l}^{\psi_2=x_0+l+d} \right\}_{\eta_1=z_0+h}^{\eta_2=z_0-h}$$

$$\forall k \in [1, n_p];$$

$$f_{31}(k, \varphi, \eta) = -\eta \cdot \operatorname{arsh} \frac{k + \varphi}{\sqrt{\varphi^2 + \eta^2}} + \varphi \cdot \operatorname{arctg} \frac{(k + \varphi) \cdot \eta}{\varphi \cdot \sqrt{(k + \varphi)^2 + \varphi^2 + \eta^2}};$$

$$f_{32}(k, \varphi, \eta) = \sqrt{2} \cdot \eta \cdot \operatorname{arsh} \frac{k + 2 \cdot \varphi}{\sqrt{k^2 + 2 \cdot \eta^2}} - k \cdot \operatorname{arctg} \frac{(k + 2 \cdot \varphi) \cdot \eta}{k \cdot \sqrt{(k + \varphi)^2 + \varphi^2 + \eta^2}};$$

$$f_3^0(k, \varphi, \eta) = f_{31}(k, \varphi, \eta) + f_{32}(k, \varphi, \eta);$$

$$k_1' = -k_1 = [(y_0 - a) - (x_0 - l)];$$

$$k_2' = -k_2 = [(y_0 + a) - (x_0 + l)];$$

$$k_3' = k_3 = -[(y_0 + a) + (x_0 - l)];$$

$$k_4' = k_4 = -[(y_0 - a) + (x_0 + l)], \quad (5)$$

где i^* – плотность тока на единицу площади сечения обмотки катушки; $2 \cdot h, d$ – высота и толщина ее обмотки; $2 \cdot l, 2 \cdot a$ – размеры ее же внутреннего пространства; x_0, y_0, z_0 – координаты точки пространства, в которой описывается поле.

В выражениях (5), кроме того:

$$i^* = 0,5 \cdot i \cdot w \cdot (h \cdot d)^{(-1)}, \quad (6)$$

где w – число витков катушки.

Далее, в (6), вместо i , последовательно подставляются значения фазовых токов якоря $i^p \forall p \in [A, B, C]$ и, согласно (5) и (4), находятся компоненты $B_{\rho q} \forall \rho \in [A, B, C], q \in [1, 3]$ индукции поля, создаваемого каждым из них.

ЕЛЕКТРИЧНИЙ ТРАНСПОРТ

Пространство системы $O\Xi_\chi \forall \chi \in [\overline{1,3}]$ – евклидово. Поэтому мгновенное значение модуля вектора полной индукции поля, создаваемого током ρ -ой фазы якоря, может быть определено выражением

$$B_\rho = \sqrt{B_{\rho q}^{(2)} \cdot e^q}; e^q = 1$$

$$\forall \rho \in [A, B, C], q \in [\overline{1,3}].$$

Каждое из значений B_α пропорционально порождающему его i^α , изменяющемуся косинусоидально. Поэтому индукция полного поля якоря в целом изменяется [11] согласно закону

$$B_{res} = 1,5 \cdot B_{max} \cdot \exp(-j \cdot \omega \cdot t);$$

$$j^{(2)} = -1,$$

где B_{max}, ω – амплитуда и частота изменения индукции поля одного из токов $i^\rho \forall \rho \in [A, B, C]$.

Результат исследования, верифицирующий его корректность. На основании синтезированной ММ ПТ ЛСД МЛП была построена соответствующая компьютерная модель. В качестве примера результатов функционирования последней, на рис. 1 приведена полученная осциллограмма силы тяги двигателя в режиме разгона МЛП. Анализ этого результата свидетельствует о работоспособности моделей, а поэтому – об их пригодности, после верификации и необходимой адаптации к нуждам конкретных практических задач, к использованию в процессе исследований динамики МЛП, оснащенных ЛСД.

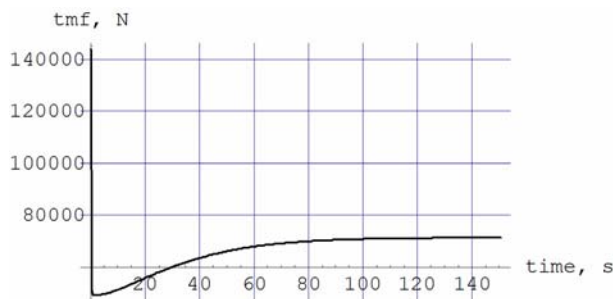


Рис. 1. Сила тяги ЛСД МЛП

Fig. 1. Tractive effort of LSM MLT

Научная новизна и практическая значимость

Научная новизна исследования усматривается в приоритетности создания интегративной холистической парадигмы, ассимилирующей преимущества теорий электрических цепей и магнитного поля, а также соответствующей версии модели РТ двигателя.

Практическая значимость создания указанных парадигмы и модели состоит, очевидно, в возможности существенного повышения эффективности динамических исследований МЛП, на фоне неповышения их ресурсоемкости, при использовании в их процессе созданных парадигмы и модели.

Выводы

Создана версия ММ ПТ ЛСД МЛП, ассимилирующая достоинства версий модели, созданных в рамках автономных парадигм теорий цепей и поля, но свободная от недостатков таких версий. Этим исчерпывающе решена задача настоящей части исследования.

СПИСОК ИСПОЛЬЗОВАННЫХ ИСТОЧНИКОВ

1. Бессонов, Л. А. Теоретические основы электротехники: Электрические цепи / Л. А. Бессонов. – Москва : Высш. шк., 1996. – 578 с.
2. Бирюков, В. А. Магнитное поле прямоугольной катушки с током / В. А. Бирюков, В. А. Данилов // Журн. техн. физики. – 1961. – Т. XXXI, № 4. – С. 428–435.
3. Вольдек, А. И. Электрические машины / А. И. Вольдек. – Ленинград : Энергия, 1984. – 832 с.
4. Высокоскоростной магнитный транспорт с электродинамической левитацией / В. А. Дзензерский, В. И. Омеляненко, С. В. Васильев [и др.]. – Киев : Наук. думка, 2001. – 479 с.
5. Копылов, И. П. Математическое моделирование электрических машин / И. П. Копылов. – Москва : Высш. шк., 2001. – 327 с.
6. Крон, Г. Применение тензорного анализа в электротехнике / Г. Крон. – Москва ; Ленинград : Госэнергоиздат, 1955. – 275 с.
7. Львович, А. Ю. Электромеханические системы / А. Ю. Львович. – Ленинград : Изд-во ЛГУ, 1989. – 296 с.

ЕЛЕКТРИЧНИЙ ТРАНСПОРТ

8. Поляков, В. А. Динамика тяговой подсистемы магнитолевитирующего поезда (полевая парадигма исследования) / В. А. Поляков, Н. М. Хачапурдзе // Наук. вісн. Херсон. морс. акад. – 2013. – № 1 (8). – С. 258–266.
9. Поляков, В. А. Динамика тяговой электромагнитной подсистемы магнитолевитирующего поезда / В. А. Поляков, Н. М. Хачапурдзе // Вісн. Харк. нац. ун-ту ім. В. Н. Каразіна. Серія: «Математичне моделювання. Інформ. технології. Автоматиз. системи управління». – Харків, 2012. – Вип. 19. – С. 268–273.
10. Рашевский, П. К. Риманова геометрия и тензорный анализ / П. К. Рашевский. – Москва : Наука, 1967. – 644 с.
11. Сипайлов, Г. А. Электрические машины (специальный курс) / Г. А. Сипайлов, Е. В. Кононенко, К. А. Хорьков. – Москва : Высш. шк., 1987. – 287 с.
12. Azukizava, T. Optimum linear synchronous motor design for high speed ground transportation / T. Azukizava // IEEE Power Engineering and Review. – 1983. – Vol. PER-3. – Iss. 10. – P. 29. doi: 10.1109/MPER.1983.5520073.
13. Chong, Y. Maglev train's development prospects in China / Y. Chong, W. Kane // Maglev Train in China J. – 2016. – № 2. – P. 75–90.
14. Fujiwara, S. Superconducting maglev and its electromagnetic characteristics / S. Fujiwara // SAE Technical Paper Series. – 1995. – SAE 95-1922. – P. 1–6. doi:10.4271/951922.
15. Lakhavani, S. T. Study of a liner synchronous motor for high speed transport applications / S. T. Lakhavani, G. E. Dawson // Vehicular Technology Conf. 34th IEEE (21.05–23.05.1984). – Pittsburg, 1984. – P. 220–225. doi: 10.1109/VTC-1984.1623266.
16. Lee, K. B. Study on Energy Efficiency Analysis by Maglev Trains / K. B Lee, J. C. Kim // Electrical and Electronic Engineering. Advanced Science and Technology Letters. – 2015. – Vol. 118. – P. 48–53.
17. Matsuoka, K. Multi-phase current-fed inverter-driven linear motor and its application to the guided ground transportation system / K. Matsuoka // The Proc. IPEC. – Tokyo, 1990. – Vol. 1. – P. 604–611.
18. Russell, J. List of maglev trains proposals / J. Russell, R. Cohn. – Johannesburg : Book on demand, 2013. – 135 p.
19. Xudong, W. Three Dimensional Electromagnetic Field Equations and General Problems with Definitive Solution in Linear Motor Anisotropic Media / W. Xudong, Y. Shiying, W. Zhaoan // Transacti of China Electrotechn. – 2006. – Vol. 21, № 6. – P. 59–64.
20. Zhigang, L. Maglev Trains / L. Zhigang, L. Zhiqiang, L. Xiaolong. – Berlin : Springer, 2015. – 215 p. doi: 10.1007/978-3-662-45673-6.

В. О. ПОЛЯКОВ¹, М. М. ХАЧАПУРДЗЕ^{2*}

¹Інститут транспортних систем і технологій НАН України, вул. Пісаржевського, 5, Дніпро, Україна, 49005, тел. +38 (056) 232 30 55, ел. пошта p_v_a_725@mail.ru, ORCID 0000-0002-4957-8028

^{2*}Інститут транспортних систем і технологій НАН України, вул. Пісаржевського, 5, Дніпро, Україна, 49005, тел. +38 (056) 370 21 86, ел. пошта itst@westa-inter.com, ORCID 0000-0003-0682-6068

МОДЕЛЬ ПРОЦЕСУ РЕАЛІЗАЦІЇ ТЯГОВОЇ СИЛИ ДВИГУНА МАГНІТОЛЕВІТУЮЧОГО ПОЇЗДА

Мета. Реалізація тяги (РТ) двигуном магнітолевітуючого поїзда (МЛП) відбувається у процесі перетворення електричної енергії, що подається, в кінетичну при взаємодії магнітних полів індуктора і якоря. Виходячи з цього, метою дослідження є одержання коректного опису такого енергоперетворення. **Методика.** На сучасному етапі основним і найбільш універсальним інструментом аналізу й синтезу процесів та систем є їх математичне й, зокрема, комп'ютерне моделювання. У той же час, радикальні переваги цього інструмента роблять ще більш важливою прецизійність вибору конкретної методики проведення дослідження. Особливу актуальність це має стосовно настільки великих і складних систем, якими є МЛП. Із цієї причини у роботі особлива увага приділена аргументованому обґрунтуванню вибору селективних особливостей дослідницької парадигми. **Результати.** Результати аналізу існуючих версій моделі процесу РТ свідчать про те, що кожна з них, поряд із перевагами, має й істотні недоліки. У зв'язку з цим, одним із основних результатів цього дослідження стала побудова математичної моделі зазначеного процесу, що зберігає переваги згаданих версій, але вільної від їх недоліків. У роботі аргументовано обґрунтована раціональність застосування (для цілей дослідження РТ двигуна поїзда) інтегративної холистичної парадигми, що асимілює переваги теорій електричних ланцюгів і магнітного поля. **Наукова новизна.** Пріоритетність створення такої парадигми,

ЕЛЕКТРИЧНИЙ ТРАНСПОРТ

а також відповідної версії моделі РТ становлять наукову новизну дослідження. **Практична значимість.** Основним проявом практичної значимості роботи є можливість, у випадку використання її результатів, істотного підвищення ефективності динамічних досліджень МЛП при одночасному непадінні їх ресурсоемності.

Ключові слова: магнітолевітуючий поїзд; лінійний синхронний двигун; реалізація тяги; інтегративна парадигма дослідження; математична модель

V. O. POLYAKOV¹, M. M. KHACHAPURIDZE^{2*}

¹Institute of Transport Systems and Technologies of Ukraine's NAS, Pisarzhevsky St., 5, Dnipro, Ukraine, 49005, tel. +38 (056) 232 30 55, e-mail p_v_a_725@mail.ru, ORCID 0000-0002-4957-8028

^{2*}Institute of Transport Systems and Technologies of Ukraine's NAS, Pisarzhevsky St., 5, Dnipro, Ukraine, 49005, tel. +38 (056) 370 21 86, e-mail itst@westa-inter.com, ORCID 0000-0003-0682-6068

IMPLEMENTATION MODEL OF MOTOR TRACTION FORCE OF MAGLEV TRAIN

Purpose. Traction force implementation (TFI) by the motor of magnetic levitation train (MLT) occurs in the process of electric-to-kinetic energy transformation at interaction of inductor and armature magnetic fields. Accordingly, the aim of this study is to obtain a correct description of such energy transformation. **Methodology.** At the present stage, a mathematical and, in particular, computer simulation is the main and most universal tool for analysis and synthesis of processes and systems. At the same time, radical advantages of this tool make the precision of selection of a particular research methodology even more important. It is especially important for such a large and complex system as MLT. Therefore the special attention in the work is given to the rationale for choosing the research paradigm selective features. **Findings.** The analysis results of existing TFI process model versions indicate that each of them has both advantages and disadvantages. Therefore, one of the main results of this study was the creation of a mathematical model for such process that would preserve the advantages of previous versions, but would be free from their disadvantages. The work provides rationale for application (for the purposes of research of train motor TFI) of the integrative holistic paradigm, which assimilates the advantages of the theory of electric circuit and magnetic field. **Originality.** The priority of creation of such paradigm and corresponding version of FI model constitute the originality of the research. **Practical value.** The main manifestation of practical value of this research in the opportunity, in case of use of its results, for significant increase in efficiency of MLT dynamic studies, on the condition that their generalized costs will not rise.

Keywords: magnetic levitation (maglev) train; linear synchronous motor; traction force implementation; integrative research paradigm; mathematical model

REFERENCES

1. Bessonov L.A. *Teoreticheskiye osnovy elektrotekhniki: Elektricheskkiye tsepi* [Theoretical foundations of electrical engineering: Electrical circuits]. Moscow, Vysshaya shkola Publ., 1996. 578 p.
2. Biryukov V.A., Danilov V.A. Magnitnoye pole pryamougolnoy katushki s tokom [Magnetic field of the square coil with a current]. *Zhurnal tekhnicheskoy fiziki – Journal of Technical Physics*, 1961, vol. XXXI, no. 4, pp. 428-435.
3. Voldek A.I. *Elektricheskkiye mashiny* [Electric machines]. Saint-Petersburg, Energiya Publ., 1984. 832 p.
4. Dzenzerskiy V.A., Omelyanenko V.I., Vasilyev S.V., Matin V.I., Sergeyev S.A. *Vysokoskorostnoy magnitnyy transport s elektrodinamicheskoy levitatsiyey* [High-speed magnetic transport with electrodynamic levitation]. Kiev, Naukova dumka Publ., 2001. 479 p.
5. Kopylov I.P. *Matematicheskoye modelirovaniye elektricheskikh mashin* [Mathematical modeling of electrical machines]. Moscow, Vysshaya shkola Publ., 2001. 327 p.
6. Kron G. *Primeneniye tenzornogo analiza v elektrotekhnike* [Application of tensor analysis in electrical engineering]. Moscow, Saint-Petersburg, Gosenergoizdat Publ., 1955. 275 p.
7. Lvovich A.Yu. *Elektromekhanicheskkiye sistemy* [Electromechanical systems]. Saint-Petersburg, LGU Publ., 1989. 296 p.
8. Polyakov V.A., Khachapuridze N.M. Dinamika tyagovoy podsistemy magnitolevitiruyushchego poyezda (polevaya paradigma issledovaniya) [Dynamics of traction subsystem in the magnetic levitation (maglev) train]

ЕЛЕКТРИЧНИЙ ТРАНСПОРТ

- (field research paradigm]. *Naukovyi visnyk Khersonskoi morskoi akademii – Bulletin of Kherson Maritime Academy*, 2013, no. 1 (8), pp. 258-266.
9. Polyakov V.A., Khachapuridze N.M. Dinamika tyagovoy elektromagnitnoy podsistemy magnitolevitiruyushchego poyezda [Dynamics of traction of electromagnetic subsystem in the magnetic levitation (maglev) train]. *Visnyk Kharkivskoho natsionalnoho universytetu imeni V. N. Karazina. Seriya: «Matematychni modeliuvannia. Informatsiini tekhnolohii. Avtomatyzovani systemy upravlinnia* [Bulletin of Kharkiv National named after University V. N. Karazin. Series: «Mathematical modeling. Information Technology. Automated control systems»], 2012, vol. 19, no. 1015, pp. 268-273.
 10. Rashevskiy P.K. *Rimanova geometriya i tenzorny analiz* [Riemann geometry and tensor analysis]. Moscow, Nauka Publ., 1967. 644 p.
 11. Sipaylov G.A., Kononenko Ye.V., Khorkov K.A. *Elektricheskiye mashiny (spetsialnyy kurs)* [Electric machines (special course)]. Moscow, Vysshaya shkola Publ., 1987. 287 p.
 12. Azukizava T. Optimum linear synchronous motor design for high speed ground transportation. *IEEE Power Engineering and Review*, 1983, vol. PER-3, issue 10, p. 29. doi: 10.1109/MPER.1983.5520073.
 13. Chong Y., Kane W. Maglev train's development prospects in China. *Maglev Train in China Journal*, 2016, no. 2, pp. 75-90.
 14. Fujiwara S. Superconducting maglev and its electromagnetic characteristics. *SAE Technical Paper Series*, 1995, SAE 95-1922, pp. 1-6. doi:10.4271/951922.
 15. Lakhavani S.T., Dawson G.E. Study of a liner synchronous motor for high speed transport applications. *Vehicle Technology Conf. 34th IEEE* (21.05-23.05.1984). Pittsburg, 1984. pp. 220-225. doi: 10.1109/VTC.1984.1623266.
 16. Lee K.B., Kim J.C. Study on Energy Efficiency Analysis by Maglev Trains. *Electrical and Electronic Engineering. Advanced Science and Technology Letters*, 2015, vol. 118, pp. 48-53.
 17. Matsuoka K. Multi-phase current-fed inverter-driven linear motor and its application to the guided ground transportation system. *The Proc. IPEC. Tokyo*, 1990, vol. 1, pp. 604-611.
 18. Russell J., Cohn R. List of maglev trains proposals. *Johannesburg, Book on demand Publ.*, 2013. 135 p.
 19. Xudong W., Shiying Y., Zhaoan W. Three Dimensional Electromagnetic Field Equations and General Problems with Definitive Solution in Linear Motor Anisotropic Media. *Transacti of China Electrotechn*, 2006, vol. 21, no. 6, pp. 59-64.
 20. Zhigang L., Zhiqiang L., Xiaolong L. *Maglev Trains*. Berlin, Springer Publ., 2015, 215 p. doi: 10.1007/978-3-662-45673-6.

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

Поступила в редколлегию: 03.03.2016

Принята к печати: 02.06.2016