

УДК 629.439

МОДЕЛЬ ТЯГИ МАГНИТОЛЕВИТИРУЮЩЕГО ПОЕЗДА

Поляков В. А., к.т.н., с.н.с., старший научный сотрудник Института транспортных систем и технологий Национальной академии наук Украины (г. Днепр), e-mail: p_v_a_725@mail.ru;

Хачапуридзе Н. М., к.т.н., с.н.с., заместитель директора по научной работе Института транспортных систем и технологий Национальной академии наук Украины (г. Днепр), e-mail: itst@westa-inter.com.

Тяга магнитолевитирующего поезда (Т МЛП) возникает в процессе электромеханического преобразования энергии его двигателем. Цель настоящего исследования – построение модели такого преобразования. Математическое моделирование – универсальный инструмент анализа и синтеза процессов. Это, тем более актуализует важность выбора конкретной методики исследования. Её выбору и обоснованию в работе уделено особое внимание. Каждая из существующих версий математической модели процесса Т МЛП обладает как преимуществами, так и недостатками. Одним из основных результатов исследования должно стать построение модели указанного процесса, сохраняющей преимущества упомянутых версий, но свободной от их недостатков. Обоснована целесообразность использования для такого построения, комбинированной парадигмы, ассимилирующей преимущества теорий электрических цепей и магнитного поля. Научная новизна исследования состоит в приоритетности создания указанной парадигмы, а также искомой версии модели Т МЛП. Практическая значимость работы, прежде всего, – в возникновении возможности при использовании её результатов, существенного повышения эффективности изучения динамики МЛП, не ведущей к повышению его ресурсоёмкости. Ключевые слова: линейный синхронный двигатель, магнитолевитирующий поезд, математическая модель, комбинированная парадигма исследования, тяга.

Введение. Вследствие ряда их преимуществ, линейные синхронные двигатели (ЛСД) целесообразно использовать для МЛП в качестве тяговых [1, 2]. Имманентное единство процессов, протекающих в таких двигателях, и, в то же время, существенная сложность этих процессов порождает когнитивный дуализм их исследования. Это, в свою очередь, инициирует попытки сепаратного рассмотрения компонентов процесса Т, базовым из которых является электромагнитный. Субкомпоненты последнего компонента порознь небезуспешно исследуемы в рамках парадигм теорий электромагнитного поля и электрических цепей [3–5]. В связи с этим, существующие версии математической модели (ММ) Т МЛП построены [6–8], исходя из автономного использования упомянутых парадигм.

Актуальность исследования. Каждая из упомянутых имеющихся версий модели имеет, по сравнению с иными, преимущества, но и не лишена недостатков. Так, версии модели, базирующиеся на теории поля, мало ресурсоёмки, однако и не вполне адекватны натурно протекающим процессам – в связи с существенными ограничениями, накладываемыми исходными предпосылками их построения. В тоже время, версии модели, основанные на теории цепей, хотя и функциональнее предыдущих, однако также не лишены недостатков. Основным из последних является [9] нестационарность уравнений таких моделей, вызываемая непостоянством значений собственных и взаимных индуктивностей ряда контуров двигателя при изменении положения его муфтера (подвижных частей). Такая нестационарность уравнений версии модели затрудняет её использование, снижая, тем самым, практическую ценность. Ввиду отмеченного, актуальным является построение версии ММ Т МЛП, сохраняющей достоинства версий, исходящих из теорий цепей и поля и, в то же время, свободной от недостатков таких версий.

Постановка задачи. Создание такой ММ Т МЛП является основной задачей настоящей работы.

Методика исследования. Т МЛП возникает при взаимодействии магнитных полей токов индуктора и якоря его ЛСД. Поэтому моделированию подлежат, в первую очередь, эти поля. Магнитная цепь упомянутого двигателя может считаться условно-линейной

подсистемой, поскольку предполагается ненасыщенной [6]. Следовательно, к ней применим принцип аддитивности. Поэтому, в частности, результирующее поле фазы якоря в любой точке геометрического пространства $O\Xi_\chi \forall \chi \in [\overline{1,3}]$, в котором движется муотер относительно статора, определимо как сумма полей, создаваемых в этой точке отдельными катушками такой фазы:

$$B_{\alpha q} = B_{\alpha\kappa q} \cdot e^\kappa; e^\kappa = 1 \forall \kappa \in [\overline{1, n_p}], q \in [\overline{1, 3}], \quad (1)$$

где n_p – число прямоугольных катушек [10], включённых в каждую из фаз якоря;

$B_{\alpha q}, B_{\alpha\kappa q} \forall \kappa \in [\overline{1, n_p}]; q \in [\overline{1, 3}]$ – пространственные компоненты индукции поля, создаваемого всей обмоткой фазы α якоря, а также её отдельными катушками в рассматриваемой точке этого пространства.

В свою очередь, величины $B_{\alpha\kappa q} \forall \kappa \in [\overline{1, n_p}]; q \in [\overline{1, 3}]$ определимы выражениями [11]:

$$B_{\alpha\kappa 1} = -\frac{i^*}{4 \cdot \pi} \cdot \left\{ \left[F_{12}(k_1', \varphi', \eta) + F_{12}(k_3', \varphi', \eta) \right]_{\varphi_1 = x_0 - l}^{\varphi_2 = x_0 - l - d} - \left[F_{12}(k_2', \psi', \eta) + F_{12}(k_4', \psi', \eta) \right]_{\psi_1 = x_0 + l}^{\psi_2 = x_0 + l + d} \right\}_{\eta_1 = z_0 + h}^{\eta_2 = z_0 - h};$$

$$B_{\alpha\kappa 2} = -\frac{i^*}{4 \cdot \pi} \cdot \left\{ \left[F_{12}(k_1, \varphi, \eta) + F_{12}(k_4, \varphi, \eta) \right]_{\varphi_1 = x_0 + l}^{\varphi_2 = x_0 + l + d} - \left[F_{12}(k_2, \psi, \eta) + F_{12}(k_3, \psi, \eta) \right]_{\psi_1 = y_0 + a}^{\psi_2 = y_0 + a + d} \right\}_{\eta_1 = z_0 + h}^{\eta_2 = z_0 - h};$$

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

$$B_{\alpha\kappa 3} = \frac{i^*}{4 \cdot \pi} \cdot \left\{ \left[f_3^0(k_1, \varphi, \eta) + f_3^0(k_4, \varphi, \eta) \right]_{\varphi_1 = y_0 - a}^{\varphi_2 = y_0 - a - d} - \left[f_3^0(k_2, \psi, \eta) + f_3^0(k_3, \psi, \eta) \right]_{\psi_1 = y_0 + a}^{\psi_2 = y_0 + a + d} + \right. \\ \left. + \left[f_{31}(k_1', \varphi', \eta) + f_{31}(k_3', \varphi', \eta) \right]_{\varphi_1 = x_0 - l}^{\varphi_2 = x_0 - l - d} - \left[f_{31}(k_2', \psi', \eta) + f_{31}(k_4', \psi', \eta) \right]_{\psi_1 = x_0 + l}^{\psi_2 = x_0 + l + d} \right\}_{\eta_1 = z_0 + h}^{\eta_2 = z_0 - h} \forall \kappa \in [\overline{1, n_p}];$$

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

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

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

$$k_1' = -k_1 = [(y_0 - a) - (x_0 - l)]; \quad k_2' = -k_2 = [(y_0 + a) - (x_0 + l)];$$

$$k_3' = k_3 = -[(y_0 + a) + (x_0 - l)]; \quad k_4' = k_4 = -[(y_0 - a) + (x_0 + l)], \quad (2)$$

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

В выражениях (2), кроме того:

$$i^* = 0,5 \cdot i \cdot w \cdot (h \cdot d)^{(-1)}, \quad (3)$$

где w – число витков катушки.

Далее в (3), вместо i последовательно подставляются значения фазовых токов якоря $i^\rho \forall \rho \in [A, B, C]$ и, согласно (1) и (2), находятся компоненты $B_{\rho q} \forall \rho \in [A, B, C], q \in [1, 3]$ индукции поля, создаваемого каждым из них.

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

$$B_\rho = \sqrt{B_{\rho q}^{(2)} \cdot e^q}; \quad e^q = 1 \forall \rho \in [A, B, C], q \in [1, 3]. \quad (4)$$

Каждое из значений B_α пропорционально порождающему его i^α , изменяющемуся косинусоидально. Поэтому индукция полного поля якоря в целом изменяется [9] согласно закону:

$$B_{res} = 1,5 \cdot B_{max} \cdot \exp(-j \cdot \psi \cdot t); \quad j^{(2)} = -1, \quad (5)$$

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

Электродинамика двигателя может быть описана уравнениями второго закона Кирхгофа [12]. Подсистема «контур возбуждения – якорная обмотка», как правило, вырождена [13, 14] – ёмкостные показатели её элементов пренебрежимо низки. Потому в инерциальной системе отсчёта $Q_i^v \forall v \in [A, B, C, M]$ указанным уравнениям может быть придан вид [12]:

$$u_\rho = L_\rho \cdot \frac{d}{dt} i^\rho + L_{\rho\mu} \cdot \frac{d}{dt} i^\mu + r_\rho \cdot i^\rho \forall \rho, \mu \in [A, B, C, M], \quad (6)$$

где $u_\rho, L_\rho, L_{\rho\mu}, r_\rho \forall \rho, \mu \in [A, B, C, M]$ – 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 муfter 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 (6) и, как отмечено, существенно снижает практическую ценность версии модели. С целью устранения указанного недостатка, Т МЛП следует рассматривать относительно координатной системы, в которой обмотки двигателя условно взаимно неподвижны. В таком качестве удобнее всего принять [9] отсчётную систему $C_\alpha \eta^\lambda \forall \lambda \in [1, 3]$, жёстко связанную с α -м контуром обмотки возбуждения двигателя. Инерциальной $C_\alpha \eta^\lambda \forall \lambda \in [1, 3]$, в общем случае, не является. В то же время, весьма желательно [15], чтобы уравнения, описывающие динамику электрической подсистемы ЛСД в координатах $\eta^\lambda \forall \lambda \in [1, 3]$, имели тензорный характер. Такие уравнения могут быть получены [16] из равенств типа (6), путём 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 [16]:

$$\frac{D}{dt}\eta^\beta = \frac{d}{dt}\eta^\beta + e_{\beta\kappa\nu} \cdot \omega_\kappa \cdot \eta^\nu, \quad (7)$$

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 (6), 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:

$$\eta^\lambda = \mathcal{G}_\rho^\lambda \cdot i^\rho \forall \rho \in [A, B, C, M]; \lambda \in [\overline{1,3}], \quad (8)$$

где \mathcal{G}_ρ^λ – матрица преобразования координат:

$$\mathcal{G}_\rho^\lambda = \frac{\partial \eta^\lambda}{\partial i^\rho} \forall \rho \in [A, B, C, M]; \lambda \in [\overline{1,3}]. \quad (9)$$

В свою очередь, выражения для связей вида:

$$\eta^\lambda = \eta^\lambda(i^\rho) \forall \rho \in [A, B, C, M]; \lambda \in [\overline{1,3}] \quad (10)$$

могут быть получены исходя из того, что [9], в процессе описываемого координатного преобразования, одним из его инвариантов являются, в частности, амплитудные значения токов, протекающих в рассматриваемых контурах.

С помощью же матрицы:

$$\mathcal{G}_\lambda^\rho = \frac{\partial i^\rho}{\partial \eta^\lambda} = (\mathcal{G}_\rho^\lambda)^T \forall \rho \in [A, B, C, M]; \lambda \in [\overline{1,3}], \quad (11)$$

осуществимо обратное преобразование:

$$i^\rho = \mathcal{G}_\lambda^\rho \cdot \eta^\lambda \forall \rho \in [A, B, C, M]; \lambda \in [\overline{1,3}]. \quad (12)$$

После описанных преобразований уравнения (6) приобретают вид:

$$u_\lambda = L_\lambda \cdot \left(\frac{d}{dt}\eta^\lambda + e_{\lambda\alpha\nu} \cdot \omega_\alpha \cdot \eta^\nu \right) + L_{\lambda\zeta} \cdot \left(\frac{d}{dt}\eta^\zeta + e_{\zeta\alpha\sigma} \cdot \omega_\alpha \cdot \eta^\sigma \right) + r_\lambda \cdot \eta^\lambda \forall \lambda, \nu, \zeta, \sigma \in [\overline{1,3}]. \quad (13)$$

Таким образом, уравнения (13) 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 (12), могут быть преобразованы в координаты $i^\rho \forall \rho \in [A, B, C, M]$, значения которых определяют реальные токи в контурах двигателя.

В качестве паттерна искомой ММ Т МЛП целесообразно принять элементарный акт взаимодействия поля тока возбуждения ЛСД с полем его якоря. Такое взаимодействие может быть описано выражением закона Ампера [12]:

$$f_{\lambda\chi} = I_{\lambda\chi} \cdot i^\lambda \cdot B_{\lambda\chi} \cdot \sin \alpha_{\lambda\chi}, \quad (14)$$

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

Расчётные схемы обмоток возбуждения и якоря двигателя приняты, соответственно, в виде набора гальванически не связанных токопроводящих прямоугольных рамок, соответствующих контурам криомодулей, и трёхфазной электрической сети, каждой фазе которой соответствует отдельный контур. Тогда, в произвольный момент времени, тяга двигателя определима как векторная сумма величин $\vec{f}_{\lambda\chi} \forall \lambda \in [1, N], \chi \in [1, 4]$, 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.

Результат исследования, верифицирующий его корректность. На основании построенной ММ Т МЛП была разработана соответствующая компьютерная модель (КМ). В качестве примера результатов функционирования этой КМ на рис. 1 приведена полученная осциллограмма Т МЛП в режиме его разгона.

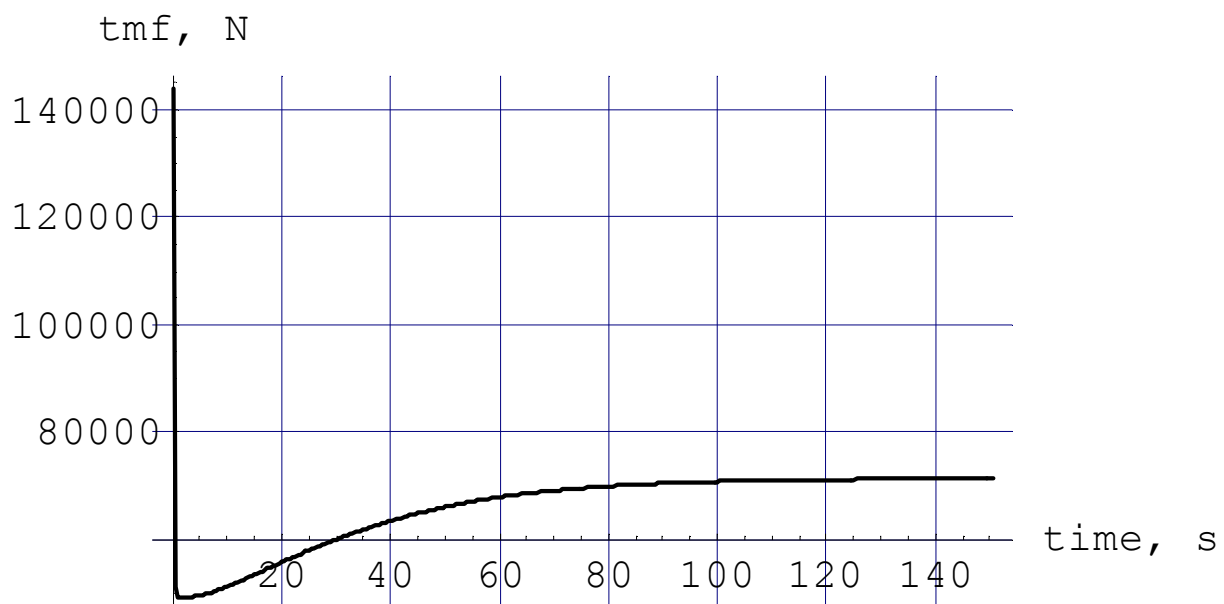


Рисунок 1 – Осциллограмма тяги МЛП

Научная новизна и практическая значимость исследования. Научная новизна исследования усматривается в приоритетности создания комбинированной парадигмы, ассимилирующей преимущества теорий электрических цепей и магнитного поля, а также соответствующей версии математической и компьютерной моделей Т МЛП.

Практическая значимость работы состоит, очевидно, в возникновении возможности при использовании её результатов, существенного повышения эффективности исследования динамики МЛП, не ведущей к повышению ресурсоёмкости такого исследования.

Выводы. Создана комбинированная парадигма построения ММ Т МЛП, ассимилирующая достоинства теорий цепей и поля и, в то же время, свободная от их

недостатков. В рамках этой парадигмы, построены ММ и КМ Т МЛП. Приведён иллюстративный пример их использования, анализ результатов которого свидетельствует о работоспособности созданных парадигмы и версии модели, а поэтому – об их пригодности после верификации и необходимой адаптации к нуждам конкретных практических задач для использования в процессе исследований динамики МЛП. Этим исчерпывающе решена задача настоящей части исследования.

СПИСОК ИСПОЛЬЗОВАННОЙ ЛИТЕРАТУРЫ

1. Azukizava T. Optimum linear synchronous motor design for high speed ground transportation // IEEE Trans. On Power Apparatus and Systems. – 1983. – V. Pas-102, № 10. – P. 3306–3314.
2. Fujiwara S. Superconducting maglev and its electromagnetic characteristics // SAE Technical Paper Series. – 1995. – SAE 95-1922. – P. 1–6.
3. Вольдек А. И. Электрические машины / А. И. Вольдек – Л. : Энергия, 1984. – 832 с.
4. Lakhavani S. T., Davson G. E. Study of a liner synchronous motor for high speed transport applications // 34th Vehicular Technol. Conf. – Pittsburg, 1984. – P. 220–225.
5. Matsuoka K. Multi-phase current-fed inverter-driven linear motor and its application to the guided ground transportation system // The Proc. IPEC. – Tokyo, 1990. – V. 1. – P. 604–611.
6. Поляков В. А. Динамика тяговой электромагнитной подсистемы магнитолевитирующего поезда / В. А. Поляков, Н. М. Хачапуридзе // Вісник Харківського національного університету імені В. Н. Каразіна. Серія «Математичне моделювання. Інформаційні технології. Автоматизовані системи управління» – X., 2012. – № 1015, Вип. 19. – С. 268–273.
7. Поляков В. А. Динамика тяговой подсистемы магнитолевитирующего поезда (полевая парадигма исследования) / В. А. Поляков, Н. М. Хачапуридзе // Науковий вісник Херсонської державної морської академії. – 2013. – № 1 (8). – С. 258–266.
8. Wang, Xudong, Yuan, Shiyang, Wang, Zhaoan Three Dimensional Electromagnetic Field Equations and General Problems with Definitive Solution in Linear Motor Anisotropic Media // Transacti. of China Electrotechn. Soc. – 2006. – Vol. 21, No.6. – pp. 59–64.
9. Электрические машины (специальный курс) / Г. А. Сипайлов, Е. В. Кононенко, К. А. Хорьков – М. : Высш. шк., 1987. – 287 с.
10. Высокоскоростной магнитный транспорт с электродинамической левитацией / В. А. Дзензерский, В. И. Омеляненко, С. В. Васильев, В. И. Матин, С. А. Сергеев – К. : Наук. думка, 2001. – 479 с.
11. Бирюков В. А. Магнитное поле прямоугольной катушки с током / В. А. Бирюков, В. А. Данилов // Журнал технической физики. – 1961. – Т. XXXI, № 4. – С. 428–435.
12. Бессонов Л. А. Теоретические основы электротехники: Электрические цепи / Л. А. Бессонов – М. : Высш. шк., 1996. – 578 с.
13. Львович А. Ю. Электромеханические системы / А. Ю. Львович – Л. : Изд-во ЛГУ, 1989. – 296 с.
14. Копылов И. П. Математическое моделирование электрических машин / И. П. Копылов. – М. : Высш. шк., 2001. – 327 с.
15. Крон Г. Применение тензорного анализа в электротехнике / Г. Крон – М., Л. : Госэнергоиздат, 1955. – 275 с.
16. Рашевский П. К. Риманова геометрия и тензорный анализ / П. К. Рашевский – М. : Наука, 1967. – 644 с.

REFERENCES

1. Azukizava T. Optimum linear synchronous motor design for high speed ground transportation // IEEE Trans. On Power Apparatus and Systems. – 1983. – V. Pas-102, № 10. – P. 3306–3314.
2. Fujiwara S. Superconducting maglev and its electromagnetic characteristics // SAE Technical Paper Series. – 1995. – SAE 95-1922. – P. 1–6.
3. Voljdek A. I. Ehlektricheskie mashin / A. I. Voljdek – L. : Ehnergiya, 1984. – 832 s.
4. Lakhavani S. T., Davson G. E. Study of a liner synchronous motor for high speed transport applications // 34th Vehicular Technol. Conf. – Pittsburg, 1984. – P. 220–225.
5. Matsuoka K. Multi-phase current-fed inverter-driven linear motor and its application to the guided ground transportation system // The Proc. IPEC. – Tokyo, 1990. – V. 1. – P. 604–611.
6. Polyakov V. A. Dinamika tyagovoyj ehlektromagnitnoj podsystemih magnitolevitiruyuthego poezda / V. A. Polyakov, N. M. Khachapuridze // Visnik Kharkivskogo nacionaljnogo universitetu imeni V. N. Karazina. Seriya «Matematichne modelyuvannya. Informacijni tekhnologii. Avtomatizovani sistemi upravlinnya» – Kh., 2012. – № 1015, Vip. 19. – S. 268–273.
7. Polyakov V. A. Dinamika tyagovoyj podsystemih magnitolevitiruyuthego poezda (polevaya paradigma issledovaniya) / V. A. Polyakov, N. M. Khachapuridze // Naukoviy visnik Khersonskoj derzhavnoj morskoj akademij. – 2013. – № 1 (8). – S. 258–266.
8. Wang, Xudong, Yuan, Shiyang, Wang, Zhaoan Three Dimensional Electromagnetic Field Equations and General Problems with Definitive Solution in Linear Motor Anisotropic Media // Transacti. of China Electrotechn. Soc. – 2006. – Vol. 21, No.6. – pp. 59–64.
9. Ehlektricheskie mashin (spetsialnij kurs) / G. A. Sipajlov, E. V. Kononenko, K. A. Khorjgov – M. : Vihssh. shk., 1987. – 287 s.
10. Vihsokoskorostnoj magnitnij transport s ehlektrodinamicheskoyj levitaciej / V. A. Dzenzerskiyj, V. I. Omeljyanenko, S. V. Vasiljev, V. I. Matin, S. A. Sergeev – K. : Nauk. dumka, 2001. – 479 s.
11. Biryukov V. A. Magnitnoe pole pryamougolnoj katushki s tokom / V. A. Biryukov, V. A. Danilov // Zhurnal tekhnicheskoyj fiziki. – 1961. – T. XXXI, № 4. – S. 428–435.
12. Bessonov L. A. Teoreticheskie osnovih ehlektrotekhniki: Ehlektricheskie cepi / L. A. Bessonov – M. : Vihssh. shk., 1996. – 578 s.
13. Ljvovich A. Yu. Ehlektromekhanicheskie sistemih / A. Yu. Ljvovich – L. : Izd-vo LGU, 1989. – 296 s.
14. Kopihlov I. P. Matematicheskoe modelirovanie ehlektricheskikh mashin / I. P. Kopihlov. – M. : Vihssh. shk., 2001. – 327 s.
15. Kron G. Primenenie tenzornogo analiza v ehlektrotekhnike / G. Kron – M., L. : Gosehnergoizdat, 1955. – 275 s.
16. Rashevskiy P. K. Rimanova geometriya i tenzornij analiz / P. K. Rashevskiy. – M. : Nauka, 1967. – 644 s.

Поляков В. О., Хачапуридзе М. М. МОДЕЛЬ ТЯГИ МАГНІТОЛЕВІТУЮЧОГО ПОЇЗДА

Тяга магнітолевітуючого поїзда (Т МЛП) виникає в процесі електромеханічного перетворення енергії його двигуном. Ціль цього дослідження – побудова моделі такого перетворення. Математичне моделювання – універсальний інструмент аналізу і синтезу процесів. Це, тим більше, робить актуальною важливість вибору конкретної методики дослідження. Її вибору і обґрунтуванню в роботі приділена особлива увага. Кожна з існуючих версій математичної моделі процесу Т МЛП має як переваги, так і недоліки. Одним з основних результатів дослідження повинна бути побудова моделі зазначеного процесу, яка б зберігала переваги згаданих версій, але була б вільною від їхніх недоліків. Обґрунтовано доцільність використання для такої побудови комбінованої парадигми, що асимілює переваги теорій електричних ланцюгів і магнітного поля.

Наукова новизна дослідження складається в пріоритетності створення зазначеної парадигми, а також шуканої версії моделі Т МЛП. Практична значимість роботи, насамперед, – у виникненні можливості при використанні її результатів істотного підвищення ефективності вивчення динаміки МЛП, яка не веде до підвищення його ресурсоемності.

Ключові слова: лінійний синхронний двигун, магнітолевітуючий поїзд, математична модель, комбінована парадигма дослідження, тяга.

Polyakov V. A., Kachapuridze N. M. MODEL OF MAGLEV TRAIN'S TRACTION

*Magnitolevitutive train traction (MT T) arises in a process of electromechanical energy conversion by its motor. Model building of such transformation is a **purpose of this study**. Mathematical modeling is a universal tool of analysis and synthesis of processes. This makes the importance of choosing the concrete **research methods**. Particular attention in work is paid to selection and justification of such methods. Each of the existing versions of MT T mathematical model has both advantages and disadvantages. One of the **main results** should be the model building of this process, which retains the advantages of its previous versions, but is free from their disadvantages. The expediency of use for such a construction, the combination paradigm, which assimilates the advantages of the theories of electric circuit and magnetic field, was grounded. **Scientific novelty of research** is grounded in the priority of combined research paradigm and MT T model creation. The **practical significance of the work**, if its results are used, first and foremost is in possible significant increase of the efficiency of MT dynamics studying without increase of resources, which are necessary for its carrying out.*

Keywords: linear synchronous motor, Magnitolevitutive train, mathematical model, combined research paradigm, traction.

© Поляков В. О., Хачапуридзе М. М.

Статтю прийнято
до редакції 17.12.16