

В. А. Поляков, Н. М. Хачапуридзе
Институт транспортных систем и технологий
Национальной академии наук Украины

ИНТЕГРАТИВНАЯ МОДЕЛЬ ТЯГОВОЙ СИЛЫ МАГНИТОЛЕВИТИРУЮЩЕГО ПОЕЗДА

Дата поступления: 23.12.2016

Решение о публикации: 27.03.2017

Дата публикации: 30.04.2017

Аннотация: 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. На современном этапе, основным и наиболее универсальным инструментом анализа и синтеза процессов и систем является их математическое и, в частности, компьютерное моделирование.

Методика. В то же время, радикальные преимущества этого инструмента делают ещё 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. Результаты 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 должно явиться построение математической модели указанного процесса, сохраняющей преимущества упомянутых версий, но свободной от их недостатков. В работе аргументировано обоснована рациональность применения, для целей исследования РТ двигателя поезда, интегративной холистической парадигмы, ассимилирующей преимущества теорий электрических цепей и магнитного поля.

Научна 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 её результатов, существенного повышения эффективности динамических исследований МЛП при одновременном неповышении их ресурсоёмкости.

Ключевые слова: магнитолевитирующий поезд; линейный синхронный двигатель; тяговая сила; интегративная математическая модель.

V. A. Polyakov, N. M. Hachapuridze

Institute of Transport Systems and Technologies of Ukraine's National Academy of Sciences

INTEGRATIVE MODEL OF A MAGNETICALLY LEVITATED TRAIN'S TRACTION FORCE

Annotation: Magnetically levitated train's (MLT) motor's traction force realization (TFR) occurs in the process of electromechanical energy transformation by inductor's and armature's magnetic fields interaction. Accordingly, **the aim of this study** is to obtain a correct description of such energy transformation. At the present stage, a mathematical and, in particular, computer simulation is the main and most universal tool of process's and system's analysis and synthesis. At the same time, a radical advantage of this tool makes it even more important precision selecting a particular **methodology of the study**. Especially important it is for such a large and complex system, which is an MLT. Therefore the special attention in the work is given to the reasoned choice and substantiation of research paradigm's selective features. The results of analysis of existing versions of TFR process model indicate that each of these versions possesses both advantages and disadvantages. Therefore, one of the main **results of this study** should be the creation of a mentioned process's mathematical model's new version. The created version of the model should preserve the advantages of previous versions, but to be free of their disadvantages. The rationality of application, for the purposes of motor's TFR process research, of the integrative holistic paradigm was convincingly proved in the work. The priority of creation of such paradigm and corresponding version of the TFR process model constitute the **scientific novelty of research**. The main manifestation of **practical value of this research** in the opportunity, in case of use of its results, of a significant increasing of efficiency of MLT's dynamic investigations, on the condition that their generalized costs will not increase.

Keywords: magnetically levitated train, linear synchronous motor, traction force, integrative mathematical model.

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 энергопреобразования. 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 математической модели (ММ) тяговой силы (ТС) МЛП строились [8, 9, 19] исходя из указанных автономных парадигм её моделирования.

Анализ свойств имеющихся версий ММ ТС 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 ресурсоёмки, однако и менее практичны – вследствие ограниченности их общности, вызываемой недостаточной адекватностью предпосылок построения этих версий.

Задача исследования

Изложенное свидетельствует об актуальности создания ММ ТС 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

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

$$f_{\lambda\chi} = l_{\lambda\chi} \cdot i^{\lambda} \cdot B_{\lambda\chi} \cdot \sin \alpha_{\lambda\chi}, \quad (1)$$

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 $\vec{f}_{\lambda\chi} \forall \lambda \in [\overline{1, N}], \chi \in [\overline{1, 4}]$, 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] – ёмкостные показатели её элементов пренебрежимо низки. Потому, в инерциальной системе отсчёта $Qi^v \forall v \in [A, B, C, M]$, указанным уравнениям может быть придан вид [1]:

$$u_\rho = L_\rho \cdot \frac{d}{dt} i^\rho + L_{\rho\mu} \cdot \frac{d}{dt} i^\mu + r_\rho \cdot i^\rho \quad \forall \rho, \mu \in [A, B, C, M], \quad (2)$$

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 (2) и, как отмечено, существенно снижает практическую ценность версии модели. С целью устранения указанного недостатка, ТС ЛСД следует рассматривать относительно координатной системы, в которой обмотки двигателя условно взаимно неподвижны. В таком качестве, удобнее всего принять [11] отсчётную систему $C_\alpha \eta^\lambda \forall \lambda \in [\overline{1, 3}]$, жёстко 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 (2), 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 [10]:

$$\frac{D}{dt} \eta^\beta = \frac{d}{dt} \eta^\beta + e_{\beta\kappa\nu} \cdot \omega_\kappa \cdot \eta^\nu, \quad (3)$$

где $e_{\beta\kappa\nu}, \omega_\kappa$ - 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 (2), 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:

$$\eta^\lambda = g_\rho^\lambda \cdot i^\rho \forall \rho \in [A, B, C, M]; \lambda \in [\overline{1,3}], \quad (4)$$

где g_ρ^λ – матрица преобразования координат:

$$g_\rho^\lambda = \frac{\partial \eta^\lambda}{\partial i^\rho} \forall \rho \in [A, B, C, M]; \lambda \in [\overline{1,3}]. \quad (5)$$

В свою очередь, выражения для связей вида

$$\eta^\lambda = \eta^\lambda(i^\rho) \forall \rho \in [A, B, C, M]; \lambda \in [\overline{1,3}] \quad (6)$$

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

С помощью же матрицы

$$g_\lambda^\rho = \frac{\partial i^\rho}{\partial \eta^\lambda} = (g_\rho^\lambda)^T \forall \rho \in [A, B, C, M]; \lambda \in [\overline{1,3}], \quad (7)$$

осуществимо обратное преобразование

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

После описанных преобразований, уравнения (2) приобретают вид

$$u_\lambda = L_\lambda \cdot \left(\frac{d}{dt} \eta^\lambda + e_{\lambda\alpha\nu} \cdot \omega_\alpha \cdot \eta^\nu \right) + L_{\lambda\zeta} \cdot \left(\frac{d}{dt} \eta^\zeta + e_{\zeta\alpha\sigma} \cdot \omega_\alpha \cdot \eta^\sigma \right) + r_\lambda \cdot \eta^\lambda \quad (9)$$

$$\forall \lambda, \nu, \zeta, \sigma \in [\overline{1,3}].$$

Таким образом, уравнения (9) 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 (8), 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 муfter относительно статора, может описываться как сумма полей, создаваемых в этой точке отдельными катушками такой фазы:

$$B_{\alpha q} = B_{\alpha \kappa q} \cdot e^{\kappa}; e^{\kappa} = 1 \quad \forall \kappa \in [\overline{1, n_p}], q \in [\overline{1, 3}], \quad (10)$$

где n_p – число прямоугольных катушек [3], включённых в каждую из фаз якоря;

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

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

$$\begin{aligned} 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]_{\substack{\varphi_2' = x_0 - l - d \\ \varphi_1' = x_0 - l}} - \right. \\ & \left. - \left[F_{12}(k_2', \psi', \eta) + F_{12}(k_4', \psi', \eta) \right]_{\substack{\psi_2' = x_0 + l + d \\ \psi_1' = x_0 + l}} \right\} \left. \begin{array}{l} \eta_2 = z_0 - h \\ \eta_1 = z_0 + h \end{array} \right\}; \\ 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]_{\substack{\varphi_2 = x_0 + l + d \\ \varphi_1 = x_0 + l}} - \right. \\ & \left. - \left[F_{12}(k_2, \psi, \eta) + F_{12}(k_3, \psi, \eta) \right]_{\substack{\psi_2 = y_0 + a + d \\ \psi_1 = y_0 + a}} \right\} \left. \begin{array}{l} \eta_2 = z_0 - h \\ \eta_1 = z_0 + h \end{array} \right\}; \\ & \left\{ F_{12}(k, \varphi, \eta) \right\}_{\substack{\eta_2 = z_0 - h \\ \eta_1 = z_0 + h}} = \left\{ \eta \cdot \operatorname{arctg} \frac{k \cdot \varphi - \eta^2}{\eta \cdot \sqrt{(k + \varphi)^2 + \varphi^2 + \eta^2}} - \right. \\ & \left. - \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\}_{\substack{\eta_2 = z_0 - h \\ \eta_1 = 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]_{\substack{\varphi_2 = y_0 - a - d \\ \varphi_1 = y_0 - a}} - \right. \\ & - \left[f_3^0(k_2, \psi, \eta) + f_3^0(k_3, \psi, \eta) \right]_{\substack{\psi_2 = y_0 + a + d \\ \psi_1 = y_0 + a}} + \\ & + \left[f_{31}(k_1', \varphi', \eta) + f_{31}(k_3', \varphi', \eta) \right]_{\substack{\varphi_2' = x_0 - l - d \\ \varphi_1' = x_0 - l}} - \\ & \left. - \left[f_{31}(k_2', \psi', \eta) + f_{31}(k_4', \psi', \eta) \right]_{\substack{\psi_2' = x_0 + l + d \\ \psi_1' = x_0 + l}} \right\} \left. \begin{array}{l} \eta_2 = z_0 - h \\ \eta_1 = z_0 + h \end{array} \right\} \quad \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 \operatorname{arctg} \frac{(k + \varphi) \cdot \eta}{\varphi \cdot \sqrt{(k + \varphi)^2 + \varphi^2 + \eta^2}}; \end{aligned}$$

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

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

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

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

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

$$k_4' = k_4 = -[(y_0 - a) + (x_0 + l)], \quad (11)$$

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 (11), кроме того:

$$i^* = 0,5 \cdot i \cdot w \cdot (h \cdot d)^{(-1)}, \quad (12)$$

где w – число витков катушки.

Далее, в (12), вместо i , последовательно подставляются значения фазовых токов якоря $i^\rho \forall \rho \in [A, B, C]$ и, согласно (11) и (10), находятся компоненты $B_{\rho q} \forall \rho \in [A, B, C], q \in [\overline{1,3}]$ индукции поля, создаваемого каждым из них.

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

$$B_\rho = \sqrt{B_{\rho q}^{(2)} \cdot e^q}; \quad e^q = 1 \forall \rho \in [A, B, C], q \in [\overline{1,3}]. \quad (13)$$

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

$$B_{res} = 1,5 \cdot B_{max} \cdot \exp(-j \cdot \omega \cdot t); \quad j^{(2)} = -1, \quad (14)$$

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 ТС 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, оснащённых ЛСД.

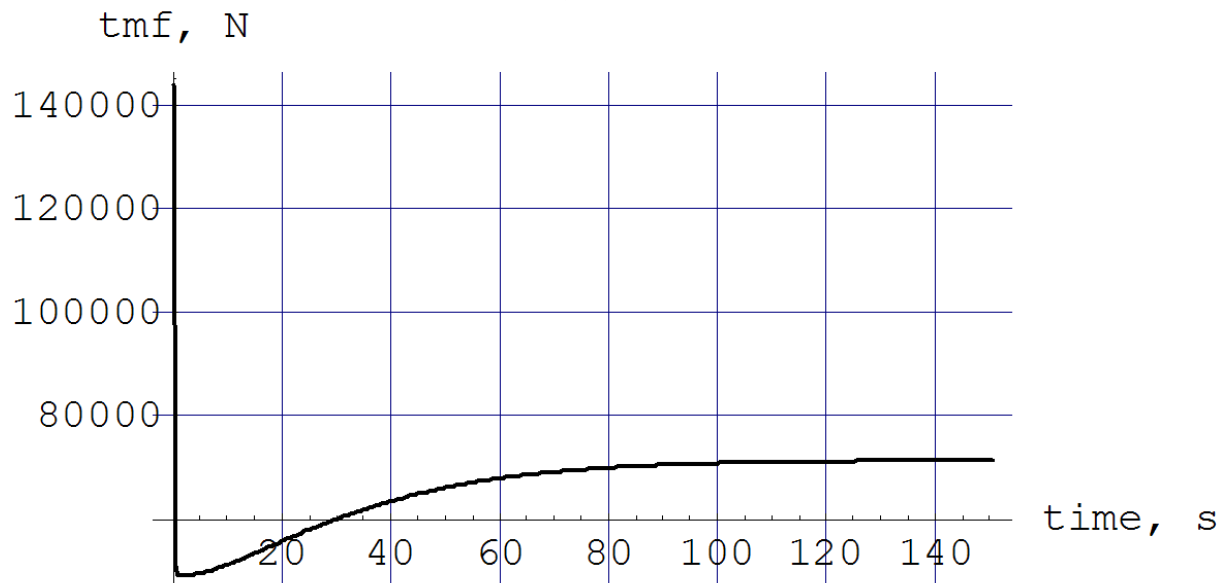


Рис. 1 Сила тяги ЛСД МЛП

Научная новизна и практическая значимость исследования

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

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

Вывод

Создана версия ММ ТС 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.

Библиографический список

1. Бессонов Л. А. Теоретические основы электротехники: Электрические цепи – М.: Высш. шк., 1996. – 578 с.
2. Бирюков В. А. Магнитное поле прямоугольной катушки с током / В. А. Бирюков, В. И. Данилов // Журнал технической физики. – 1961. – Т. XXXI, № 4. – С. 428 – 435.
3. Дзензерский В. А. 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.
4. Вольдек А. И. Электрические машины – Л.: Энергия, 1984 – 832 с.
5. Копылов И. П. Математическое моделирование электрических машин. – М.: Высш. шк., 2001. – 327 с.
6. Крон Г. Применение тензорного анализа в электротехнике. – М., Л.: Госэнергоиздат, 1955. – 275 с.
7. Львович А. Ю. Электромеханические системы – Л.: Изд-во ЛГУ, 1989. – 296 с.
8. Поляков В. А. Динамика тяговой подсистемы магнитолевитирующего поезда (полевая парадигма исследования) / В. А. Поляков, Н. М. Хачапуридзе // Наук. вісн. Херсонс. морської академії – 2013. – № 1 (8). С. 258 – 266.
9. Поляков В. А. Динамика тяговой электромагнитной подсистемы магнитолевитирующего поезда / В. А. Поляков, Н. М. Хачапуридзе // Вісн. Харківс. нац. ун-ту ім. В. Н. Каразіна. Серія: «Математичне моделювання. Інформаційні технології. Автоматизовані системи управління» – 2012. – № 1015. Вип. 19. – С. 268-273.
10. Рашевский П. К. Риманова геометрия и тензорный анализ. – М.: Наука, 1967. – 644 с.
11. Сипайлов Г. А. Электрические машины (специальный курс) / Г. А. Сипайлов, Е. В. Кононенко, К. А. Хорьков – М.: Высш. шк., 1987. – 287 с.
12. Azukizava T. Optimum linear synchronous motor design for high speed ground transportation // IEEE Trans. On Power Apparatus and Systems – 1983. – Vol. Pas-102, № 10. – P. 3306–3314.
13. Chong Y. Maglev train's development prospects in China / Y. Chong, W. Kane // Maglev Train in China Journal – 2016, № 2. – P. 75 – 90.
14. Fujiwara S. Superconducting maglev and its electromagnetic characteristics // SAE Technical Paper Series – 1995. – SAE 95-1922 – P. 1–6.
15. Lakhavani S. T. Study of a liner synchronous motor for high speed transport applications / S. T. Lakhavani, G. E. Davson // 34th Vehicular Technol. Conf., vol. 34, Pittsburg, Pennsylvania, U.S.A., May 21–23, 1984. P. 220–225.

16. Lee K. B. Study on Energy Efficiency Analysis by Maglev Trains / K. B. Lee, J. C. A. Kim // *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* – 1990. – Vol. 1. – pp. 604–611.
18. Russell J. List of maglev train / J. Russell, R. Cohn – Johannesburg: Book on demand, 2015. – 135 p.
19. Wang X. Wang Three Dimensional Electromagnetic Field Equations and General Problems with Definitive Solution in Linear Motor Anisotropic Media / X. Wang, S. Yuan, Z. Wang // *Transact. of China Electrotechn. Soc.*, 2006. – Vol. 21, № 6, – pp. 59–64.
20. Zhigang L. Maglev Trains / L. Zhigang, L. Zhiqiang, L. Xiaolong – Berlin: Springer, 2015. – 215 p.

References

1. Bessonov L. A. Teoreticheskie osnovy jelectrotehniki: Jelectricheskie cepi [Theoretical Foundations of Electrical Engineering: Electrical Circuits]. Moscow, 1996. 578 p.
2. Birjukov V. A. & Danilov V. Y. *Zhurnal tehnikeskoj fiziki – Technical Physics*, 1961, vol. XXXI, no. 4, pp. 428–435.
3. Dzenzerskij V. A., Omel'janenko V. I., Vasil'ev S. V., Matin V. I. & Sergeev S. A. Vysokoskorostnoj magnitnyj transport s jelectrodinamicheskoj levitaciej [High-speed Magnetic Levitation Transport with Electrodynamic Levitation]. Kiev, 2001. 479 p.
4. Vol'dek A. I. Jelectricheskie mashiny [Electric Machines]. Leningrad, 1984. 832 p.
5. Kopylov I. P. Matematicheskoe modelirovanie jelectricheskih mashin [Mathematical Modeling of Electrical Machines]. Moscow, 2001. 327 p.
6. Kron G. Primenenie tenzornogo analiza v jelectrotehnike [The Use of Tensor Analysis in Electrical Engineering]. Moscow, Leningrad, 1955. 275 p.
7. L'vovich A. Ju. Jelectromehanicheskie sistemy [Electromechanical Systems]. Leningrad, 1989. 296 p.
8. Polyakov V. A. & Hachapuridze N. M. *Zhurnal Har'kovskogo universiteta. Seriya "Matematicheskoe modelirovanie. Informacionnye tekhnologii. Avtomatizirovannye sistemy upravleniya" – Journal of University of Kharkiv. The series "Mathematical Modeling. Information Technology. Automated control Systems"*, 2012, vol. 19, no. 1015, pp. 268–273.
9. Polyakov V. A. & Hachapuridze N. M. Naukovyj visnyk Khersonskoj morskoj akademiji – Scientific Bulletin of Kherson Maritime Academy, 2013, no. 1 (8), pp. 258–266.
10. Rashevskij P. K. Rimanova geometrija i tenzornyj analiz [Riemann Geometry and Tensor Analysis]. Moscow, 1967. 644 p.

11. Sipajlov G. A, Kononenko E. V. & Hor'kov K. A. *Jelektricheskie mashiny (special'nyj kurs)* [Electric Machines (Special Course)]. Moscow, 1987. 287 p.
12. Azukizava T. *IEEE Trans. On Power Apparatus and Systems*, 1983, vol. 102, no. 10, pp. 3306–3314.
13. Chong Y. & Kane W. *Maglev Train in China Journal*, 2016, no. 2, pp. 75–90.
14. Fujiwara S. *SAE Technical Paper Series*, 1995, SAE 95-1922, pp. 1–6.
15. Lakhavani S. T. & Davson G. E. Study of a Liner Synchronous Motor for High Speed Transport Applications (34th Vehicular Technol. Conf.). Pittsburg, 1984, pp. 220–225.
16. Lee K. B. & Kim J. C. A. *Electrical and Electronic Engineering. Advanced Science and Technology Letters*, 2015, vol. 118, pp. 48–53.
17. Matsuoka K. *The Proc. IPEC*, 1990, vol. 1, pp. 604–611.
18. Russell J. & Cohn R. List of Maglev Train. Johannesburg, 2015. 135 p.
19. Wang X., Yuan S. & Wang Z. *Transacti. of China Electrotechn. Soc.*, 2006, vol 21, no.6, pp. 59–64.
20. Zhigang L., Zhiqiang L. & Xiaolong L. *Maglev Trains*. Berlin, 2015. 215 p.

Сведения об авторах:

ПОЛЯКОВ Владислав Александрович: кандидат технических наук; старший научный сотрудник; старший научный сотрудник; Институт транспортных систем и технологий Национальной академии наук Украины

E-mail: p_v_a_725@mail.ru

ХАЧАПУРИДЗЕ Николай Михайлович: кандидат технических наук; старший научный сотрудник; заместитель директора по научной работе; Институт транспортных систем и технологий Национальной академии наук Украины

E-mail: itst@westa-inter.com

Information about the authors:

Vladislav A. POLYAKOV: Ph. D. of Engineering Sciences; Senior Research Officer; Senior Research Officer; Institute of Transport Systems and Technologies of Ukraine's National Academy of Sciences

E-mail: p_v_a_725@mail.ru

Nicholas M. HACHAPURIDZE: Ph. D. of Engineering Sciences; Senior Research Officer; Deputy Director for Science; Institute of Transport Systems and Technologies of Ukraine's National Academy of Sciences

E-mail: itst@westa-inter.com