

УДК 629.439

ГИБРИДНАЯ ПАРАДИГМА МОДЕЛИРОВАНИЯ ТЯГОВОЙ СИЛЫ МАГНИТОЛЕВИТИРУЮЩЕГО ПОЕЗДА

Поляков В. А., к.т.н., 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.

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. 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 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 быть 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 гибридной парадигмы, ассимилирующей преимущества теорий электрических цепей и магнитного поля. Приоритетность создания такой парадигмы, а также соответствующей версии модели РТ составляют научную новизну исследования. Основным проявлением практической значимости работы является возможность, в случае использования её результатов, существенно повышения эффективности динамических исследований МЛП при одновременном неповышении их ресурсоёмкости.

Ключевые слова: магнитолевитирующий поезд, линейный синхронный двигатель, реализация тяги, гибридная холистическая парадигма исследования, математическая модель.

Введение. Во многих случаях для целей тяги магнитолевитирующих поездов (МЛП) целесообразно использовать линейные синхронные двигатели (ЛСД) [1, 12, 13]. 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 [2, 14, 15] в рамках теорий электрических цепей, либо электромагнитного поля. Поэтому, различные версии математической модели (ММ) тяговой силы (ТС) ЛСД МЛП строились [3, 4, 16] исходя из указанных автономных парадигм его моделирования.

Актуальность исследования. Результаты анализа свойств имеющихся версий ММ ТС МЛП свидетельствуют о том, что каждая из них обладает как преимуществами, так и недостатками. Первая из упомянутых версий модели (построенная в рамках парадигмы теории электрических цепей) обладает достаточно широкими функциональными возможностями. Однако, её основным недостатком является наличие в её дифференциальных уравнениях коэффициентов (соответствующих собственным и взаимным индуктивностям контуров фаз якоря, а также взаимным индуктивностям таких контуров с контурами возбуждения), значения которых периодически изменяются в зависимости от положения муфтера (подвижных частей ЛСД). Это существенно затрудняет решение задач описываемой динамики [5], радикально снижая практическую ценность версии. Версия же ММ, исходящая из парадигмы теории поля, менее ресурсоёмка,

однако и менее практична. Последнее – следствие существенной ограниченности её общности, вызываемой недостаточной адекватностью исходных предпосылок, принятых при построении этой версии модели. Изложенные соображения выявляют [6] актуальность создания гибридной холистической парадигмы (ГХП) построения ММ ТС МЛП, ассимилирующей достоинства теорий цепей и поля и, в то же время, максимально свободной от их недостатков.

Постановка задачи. Создание такой ГХП, а также построение, в рамках этой парадигмы, ММ ТС МЛП являлось 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 ТС, в качестве его паттерна должен быть принят элементарный акт такого взаимодействия, который может быть описан выражением закона Ампера [7]:

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

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 i^{λ} и $\overline{B_{\lambda\chi}}$.

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 $\overline{f_{\lambda\chi}} \forall \lambda \in [1, M], \chi \in [1, 4]$, 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.

Электродинамика двигателя может быть описана уравнениями второго закона Кирхгофа [7]. Подсистема «контур возбуждения – якорная обмотка», как правило, вырождена [8] – 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 [7]:

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

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

всього принять [5] 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 [9], 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 $e_{\beta\kappa\nu}$, 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 (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:

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

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

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

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 [5], в процессе описываемого координатного преобразования, одним из его инвариантов являются, в частности, амплитудные значения токов, протекающих в рассматриваемых контурах.

С помощью же матрицы:

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

осуществимо обратное преобразование:

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

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 [3]. 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 $O\Xi_\chi \forall \chi \in [1, 3]$, в котором реально движется муوتر относительно статора, может описываться как сумма полей, создаваемых в этой точке отдельными катушками такой фазы:

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

где n_p – число прямоугольных катушек [1], 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]:

$$B_{\alpha \kappa 1} = -\frac{i^*}{4 \cdot \pi} \cdot \left\{ \left[F_{12}(k'_1, \varphi', \eta) + F_{12}(k'_3, \varphi', \eta) \right]_{\varphi_1 = x_0 - l}^{\varphi_2 = x_0 - l - d} - \left[F_{12}(k'_2, \psi', \eta) + F_{12}(k'_4, \psi', \eta) \right]_{\varphi_1 = x_0 + l}^{\varphi_2 = x_0 + l + d} \right\}_{\eta_1 = z_0 + h}^{\eta_2 = z_0 - h};$$

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

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

$$B_{\alpha \kappa 3} = -\frac{i^*}{4 \cdot \pi} \cdot \left\{ \left[f_3^0(k_1, \varphi, \eta) + f_3^0(k_4, \varphi, \eta) \right]_{\varphi_1 = y_0 - a}^{\varphi_2 = y_0 - a - d} - \left[f_3^0(k_2, \psi, \eta) + f_3^0(k_3, \psi, \eta) \right]_{\varphi_1 = y_0 + a}^{\varphi_2 = y_0 + a + d} + \right.$$

$$\left. + \left[f_{31}(k'_1, \varphi', \eta) + f_{31}(k'_3, \varphi', \eta) \right]_{\varphi_1 = x_0 - l}^{\varphi_2 = x_0 - l - d} - \left[f_{31}(k'_2, \psi', \eta) + f_{31}(k'_4, \psi', \eta) \right]_{\varphi_1 = x_0 + l}^{\varphi_2 = x_0 + l + d} \right\}_{\eta_1 = z_0 + h}^{\eta_2 = z_0 - h}$$

$$\forall \kappa \in [\overline{1, n_p}];$$

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

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

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

$$k'_1 = -k_1 = [(y_0 - a) - (x_0 - l)]; k'_2 = -k_2 = [(y_0 + a) - (x_0 + l)];$$

$$k'_3 = k_3 = -[(y_0 + a) + (x_0 - l)]; k'_4 = k_4 = -[(y_0 - a) + (x_0 + l)], \quad (11)$$

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 $B_{\rho q} \forall \rho \in [A, B, C]$, $q \in [1, 3]$ 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, может быть определено выражением:

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

Каждое из значений B_α пропорционально порождающему его i^α , изменяющемуся косинусоидально. Поэтому индукция полного поля якоря в целом изменяется [5] 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 ТС двигателя в режиме разгона МЛП.

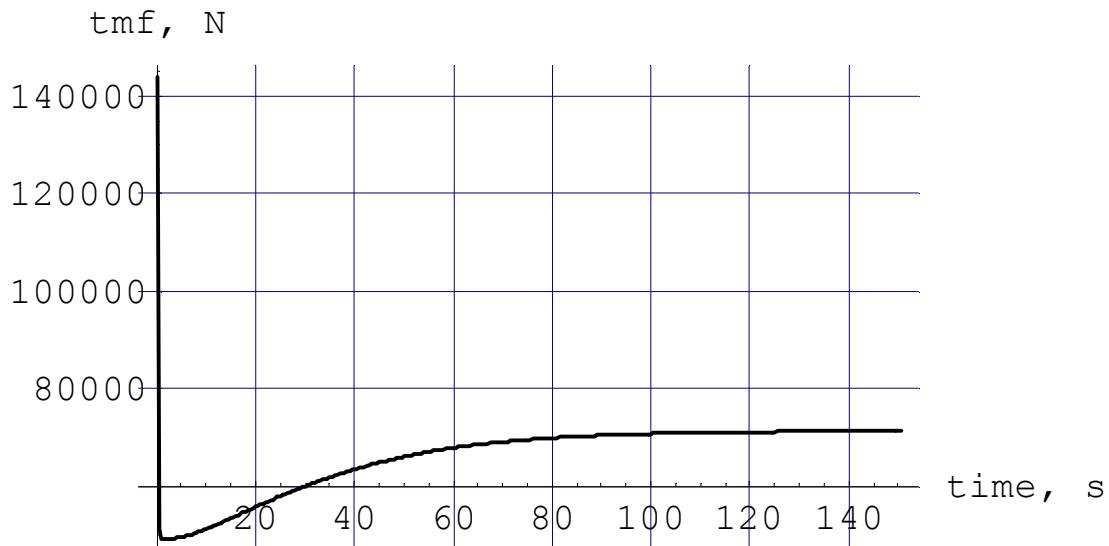


Рисунок 1 – Осциллограмма тяговой силы ЛСД МЛП

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.

Выводы. Создана ГХП построения ММ ТС МЛП, ассимилирующая достоинства теорий цепей и поля и, в то же время, свободная от их недостатков. В рамках этой парадигмы, построена ММ ТС МЛП. Приведён иллюстративный пример её 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. 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.
2. Вольдек А. И. Электрические машины / А. И. Вольдек – Л. : Энергия, 1984. – 832 с.
3. 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» – № 1015. Вип. 19 – Х., 2012. – С. 268–273.
4. Поляков В. А. Динамика тяговой подсистемы магнитолевитирующего поезда (полевая парадигма исследования) / В. А. Поляков, Н. М. Хачапуридзе // Науковий вісник Херсонської морської академії – 2013. – № 1 (8). – С. 258–266.
5. Электрические машины (специальный курс) / Г. А. Сипайлов, Е. В. Кононенко, К. А. Хорьков – М. : Высш. шк., 1987. – 287 с.
6. Копылов И. П. Математическое моделирование электрических машин / И. П. Копылов – М. : Высш. шк., 2001. – 327 с.
7. Бессонов Л. А. Теоретические основы электротехники : Электрические цепи / Л. А. Бессонов. – М. : Высш. шк., 1996. – 578 с.
8. Львович А. Ю. Электромеханические системы / А. Ю. Львович – Л. : Изд-во ЛГУ, 1989. – 296 с.
9. Крон Г. Применение тензорного анализа в электротехнике / Г. Крон – М., Л. : Госэнергоиздат, 1955. – 275 с.
10. Рашевский П. К. Риманова геометрия и тензорный анализ / П. К. Рашевский – М. : Наука, 1967. – 644 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. 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.
13. Fujiwara S. Superconducting maglev and its electromagnetic characteristics // SAE Technical Paper Series. – 1995. – SAE 95-1922. – P. 1–6.

14. 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.
15. 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.
16. Wang, Xudong, Yuan, Shiyong, Wang, Zhaoan Three Dimensional Electromagnetic Field Equations and General Problems with Definitive Solution in Linear Motor Anisotropic Media // Transacti. of China Electrotechn. Soc., Vol 21, No.6, 2006, pp. 59-64.

REFERENCES

1. Dzenzerskij V. A., Omel'janenko V. I., Vasil'ev S. V., V. I. Matin V. I., Sergee S. A. Vysokoskorostnoj magnitnyj transport s jelektrodinamicheskoy levitaciej [High-speed magnetic levitation transport with electrodynamic levitation]. Kiev, Naukova dumka Publ., 2001. 479 p.
2. Vol'dek A.I. Jelektricheskie mashiny [Electric machines]. Leningrad, Jenergija Publ., 1984. 832 p.
3. Poljakov V. A., Hachapuridze N. M. Visnyk Kharkivskogo nacionaljnogho universytetu imeni V. N. Karazina. Serija «Matematychni modeljuvannja. Informacijni tekhnologhiji. Avtomatyzovani systemy upravlinnja» – Journal of University of Kharkiv. The series «Mathematical modeling. Information Technology. Automated control systems». 2012, vol. 19, no. 1015, pp. 268 - 273.
4. Poljakov V. A., Hachapuridze N. M. Naukovyj visnyk Khersonskoji morskoji akademiji – Scientific Bulletin of Kherson Maritime Academy. 2013, no. 1 (8), pp. 258 – 266.
5. Sipajlov G. A., Kononenko E. V., Hor'kov K. A. Jelektricheskie mashiny (special'nyj kurs) [Electric machines (special course)]. Moscow, Vysshaja shkola Publ., 1987. 287 p.
6. Kopylov I. P. Matematicheskoe modelirovanie jelektricheskij mashin [Mathematical modeling of electrical machines]. Moscow, Vysshaja shkola Publ., 2001. 327 p.
7. Bessonov L.A. Teoreticheskie osnovy jelektrotehniki: Jelektricheskie cepi [Theoretical Foundations of Electrical Engineering: Electrical circuits]. Moscow, Vysshaja shkola Publ., 1996. 578 p.
8. L'vovich A. Ju. Jelektromehaničeskie sistemy [Electromechanical systems]. Leningrad, LSU Publ., 1989. 296 p.
9. Kron G. Primenenie tenzornogo analiza v jelektrotehnike [The use of tensor analysis in electrical engineering]. Moscow, Leningrad, Gostehizdat Publ., 1955. 275 p.
10. Rashevskij P. K. Rimanova geometrija i tenzornyj analiz [Riemann geometry and tensor analysis]. Moscow, Nauka Publ., 1967. 644 p.
11. Birjukov V. A., V. A. Danilov V. A. Zhurnal tehničeskoi fiziki – Technical Physics 1961, vol. XXXI, no. 4, pp. 428 - 435.
12. Azukizava T. IEEE Trans. On Power Apparatus and Systems. 1983, – vol. Pas-102, no. 10, pp. 3306 - 3314.
13. Fujiwara S. SAE Technical Paper Series. 1995. SAE 95-1922, pp. 1 - 6.
14. Lakhavani S. T., Davson G. E. 34th Vehicular Technol. Conf. Pittsburg, 1984, pp. 220 - 225.
15. Matsuoka K. Proc. IPEC. Tokyo, 1990, vol. 1, pp. 604 – 611.
16. Wang, Xudong, Yuan, Shiyong, Wang, Zhaoan. Transacti. of China Electrotechn. 2006, Soc., vol. 21, no. 6, , pp. 59-64.

Поляков В. О., Хачапуридзе М. М. ГІБРИДНА ПАРАДИГМА МОДЕЛЮВАННЯ ТЯГОВОЇ СИЛИ МАГНІТОЛЕВІТИРУЮЩЕГО ПОЇЗДА

Реалізація тяги (РТ) двигуном магнітолевітуючого поїзда (МЛП) відбувається у процесі перетворення електричної енергії, що подається, в кінетичну при взаємодії магнітних полів індуктора й якоря. Виходячи з цього, **метою дослідження** є одержання коректного опису такого енергоперетворення. На сучасному етапі, основним і найбільш універсальним інструментом аналізу і синтезу процесів та систем є їхнє 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 аналізу існуючих версій моделі процесу РТ свідчать про те, що кожна з них, поряд із перевагами, має й істотні недоліки. У зв'язку із цим, одним з основних **результатів** цього дослідження повинна бути побудова математичної моделі зазначеного процесу, що зберігає переваги згаданих версій, але вільної від їхніх недоліків. У роботі аргументовано обґрунтована раціональність застосування, для цілей дослідження РТ двигуна поїзда, гібридної холистичної парадигми, що асимілює переваги теорій електричних ланцюгів і магнітного поля. Пріоритетність створення такої парадигми, а також відповідної версії моделі РТ становлять **наукову новизну дослідження**. Основним проявом **практичної значимості роботи** є можливість, у випадку використання її результатів, істотного підвищення ефективності динамічних досліджень МЛП при одночасному непідвищенні їхньої ресурсоемності.

Ключові слова: магнітолевітуючий поїзд, лінійний синхронний двигун, реалізація тяги, гібридна холистична парадигма дослідження, математична модель.

Polyakov V. A., Khachapuridze N. M. HYBRID PARADIGM OF MAGNETICALLY LEVITATED TRAIN'S TRACTION FORCE'S MODELING

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 processes 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 hybrid holistic modeling 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 realization, hybrid holistic research paradigm, mathematical model.

© Поляков В. О., Хачапуридзе М. М.

Статтю прийнято
до редакції 20.07.16