

РУХОМИЙ СКЛАД ЗАЛІЗНИЦЬ І ТЯГА ПОЇЗДІВ

УДК 629.439

В. А. ПОЛЯКОВ^{1*}, Н. М. ХАЧАПУРИДЗЕ^{2*}

^{1*}Отд. № 7, Институт транспортных систем и технологий НАН Украины, ул. Писаржевского, 5, Днипро, 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, Днипро, Украина, 49005, тел. +38 (056) 370 21 86, эл. почта itst@westa-inter.com, ORCID 0000-0003-0682-6068

МОДЕЛЬ ПОДВЕШИВАНИЯ МАГНИТОЛЕВИТИРУЮЩЕГО ПОЕЗДА

Цель. Реализация левитационной силы (ЛС) магнитолевитирующего поезда (МЛП) происходит в процессе взаимодействия магнитных полей сверхпроводящих поездных (СПК) и короткозамкнутых путевых контуров (КПК) левитационного узла (ЛУ). Исходя из этого, целью настоящего исследования является получение корректного описания такого взаимодействия. **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 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 реализации ЛС 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 реализации указанной силы, сохраняющей преимущества упомянутых версий, но свободной от их недостатков. В работе аргументированно обоснована рациональность применения, для целей исследования ЛС поезда, интегративной холистической парадигмы, ассимилирующей преимущества теорий электрических цепей и магнитного поля. **Научная новизна.** Приоритетность создания такой парадигмы, а также соответствующей версии модели реализации ЛС 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 снижении их ресурсоёмкости.

Ключевые слова: магнитолевитирующий поезд; математическая модель левитации; интегративная парадигма исследования

Введение

Токи и поля контуров ЛУ МЛП – компоненты единого электромагнитного субпроцесса гиперпроцесса электромеханического преобразования энергии. Моделирование этих компонентов вполне возможно [4] в рамках парадигм теорий электрических цепей и электромагнитного поля. Поэтому существующие версии математической модели подвешивания (ММП) МЛП построены [4, 13, 14] исходя из упомяну-

тых парадигм. Анализ свойств упомянутых версий модели свидетельствует о том, что каждая из них обладает как преимуществами, так и недостатками. Их общая положительная черта – достаточная функциональность. Основной же имманентный недостаток таких версий – нестационарность дифференциальных уравнений, вызванная циклической переменностью их коэффициентов, соответствующих собственным и взаимным индуктивностям дискрет-

РУХОМИЙ СКЛАД ЗАЛІЗНИЦЬ І ТЯГА ПОЇЗДІВ

ных путевых контуров (ДПК) ЛУ как между собой, так и со сверхпроводящими поездными контурами (СПК), в зависимости от положения поезда. Это существенно затрудняет решение задач описываемой динамики [12], радикально снижая практическую ценность версий модели.

Цель

Изложенное выявляет [5, 8, 11] актуальность создания ММП МЛП, ассимилирующей достоинства имеющихся версий такой модели, но свободной от их недостатков. Синтез такой модели является основной целью настоящей работы.

Методика

Электромеханическое энергопреобразование ЛУ МЛП осуществляется в процессе взаимодействия полей токов СПК и ДПК. Поэтому паттерном левитационной силы (ЛС) поезда является взаимодействие тока элемента СПК с полем токов ДПК. Такое взаимодействие может быть описано выражением закона Ампера [2]:

$$f_{\beta\gamma} = I_{\beta\gamma} \cdot i^{\beta\gamma} \cdot B_{\beta\gamma} \cdot \sin \alpha_{\beta\gamma}, \quad (1)$$

где $f_{\beta\gamma}$ – сила, действующая на γ -тый элемент β -го СПК; $I_{\beta\gamma}$, $i^{\beta\lambda}$, $B_{\beta\gamma}$, $\alpha_{\beta\gamma}$ – длина элемента, ток в нём, индукция поля, в котором элемент находится, а также угол между $\overline{i^{\beta\gamma}}$ и $\overline{B_{\beta\gamma}}$.

Расчётные схемы СПК и секций ДПК приняты, соответственно, в виде наборов гальванически не связанных проводящих прямоугольных рамок, а также пар идентичных прямоугольных катушек, соединённых согласно нуль-поточной схеме [4]. Тогда ЛС поезда определена как векторная сумма величин $\overline{f_{\lambda\chi}} \forall \lambda \in [1, N], \chi \in [1, 4]$, каждая из которых, – это результат взаимодействия тока одного из элементов СПК с полем токов взаимодействующих с ним ДПК. В последнем выражении, N – число упомянутых СПК. Динамика электромагнитного компонента такого взаимодействия определяется уравнениями второго закона Кирхгофа [2]. Подсистема «СПК – ДПК», как правило, вырождена [8] – ёмкостные показатели её элементов пренебрежимо низки.

Потому, в инерциальной системе отсчёта $Q\varepsilon^{\rho} \forall \rho \in [(\chi_{\beta} - E), (\chi_{\beta} + E)]$, модель электромагнитного компонента взаимодействия β -го СПК с учитываемыми (в этом взаимодействии) ДПК имеет вид [1, 2]:

$$\sigma_{\rho\beta} = L_{\rho\rho} \cdot \frac{d}{dt} i^{\rho} + L_{\rho\mu} \cdot \frac{d}{dt} i^{\mu} + r_{\rho} \cdot i^{\rho} \\ \forall \rho, \mu \in [(\chi_{\beta} - E), (\chi_{\beta} + E)]; \quad (2)$$

$$\sigma_{\rho\beta} = \sigma_{\rho\beta}^u - \sigma_{\rho\beta}^l; \quad \sigma_{\rho\beta}^{\kappa} = -\frac{d}{dt} (M_{\rho\beta}^{\kappa} \cdot i_s^{\beta}) \\ \forall \rho \in [(\chi_{\beta} - E), (\chi_{\beta} + E)], \kappa = u \vee \kappa = l, \quad (3)$$

где $\sigma_{\rho\beta}^{\kappa} \forall \rho \in [(\chi_{\beta} - E), (\chi_{\beta} + E)], \kappa = u \vee \kappa = l$ – электродвижущие силы (э. д. с.) в катушках ρ -го ДПК при изменениях сцеплений с их подконтурными потоками тока i_s^{β} цепи β -го СПК; $L_{\rho\rho}$, $L_{\rho\mu}$, $r_{\rho} \forall \rho, \mu \in [(\chi_{\beta} - E), (\chi_{\beta} + E)]$ – собственные и взаимные индуктивности, а также активные сопротивления ДПК; χ_{β} – номер (от начала участка трассы, вдоль которого происходит движение МЛП) последнего ДПК, поперечную осевую линию которого миновала поперечная осевая линия β -го СПК; E – половина числа ДПК, с которыми учитывается электромагнитное взаимодействие каждого СПК; i^{ρ} , $i^{\mu} \forall \rho, \mu \in [(\chi_{\beta} - E), (\chi_{\beta} + E)]$ – токи ДПК; $M_{\rho\beta}^{\kappa} \forall \rho \in [(\chi_{\beta} - E), (\chi_{\beta} + E)], \kappa = u \vee \kappa = l$ – взаимные индуктивности между β -ым СПК и катушками взаимодействующих с ним ДПК; t – текущее время.

Благодаря принятым конструкционным мерам [4], значения токов $i_s^{\lambda} \forall \lambda \in [1, K]$, изменяются достаточно медленно и, на интервалах, соизмеримых со временем наблюдения движения поезда, могут считаться равными между собой и постоянными

$$i_s^{\lambda} = i_s = \text{const} \quad \forall \lambda \in [1, K], \quad (4)$$

где K – число СПК, установленных на МЛП. Значение же E нужно выбирать так, чтобы по обеим сторонам от каждого β -го СПК в ДПК,

РУХОМИЙ СКЛАД ЗАЛІЗНИЦЬ І ТЯГА ПОЇЗДІВ

предшествующих, а также следующих за учитываемыми, величины

$\sigma_{\rho\beta}^{\kappa} \forall \rho < \chi_{\beta} - E \vee \rho > \chi_{\beta} + E, \kappa = u \vee \kappa = l$ даже в неравновесном состоянии ЛУ, были бы пренебрежимо малы.

СПК и ДПК взаимоподвижны. Поэтому $L_{\rho\rho}, L_{\rho\mu}, M_{\rho\lambda}^{\kappa} \forall \rho, \mu \in [(\chi_{\lambda} - E), (\chi_{\lambda} + E)],$

$\lambda \in [1, K], \kappa = u \vee \kappa = l$ имеют циклически изменяющиеся во времени значения. Это, в свою очередь, приводит к нестационарности коэффициентов уравнений (2), (3) и, как отмечено, существенно снижает практическую ценность версии модели. С целью устранения указанного недостатка, реализацию слагающих ЛС МЛП следует рассматривать относительно координатных систем, в каждой из которых рассматриваемый СПК и учитываемые во взаимодействии с ним ДПК условно взаимно неподвижны. В таком качестве, удобнее всего принять [11] отсчётные системы

$C_{\lambda} \eta^{\mu} \forall \lambda \in [1, K], \mu \in [1, 3]$, каждая из которых жёстко связана с λ -ым СПК. Инерциальными $C_{\lambda} \eta^{\mu} \forall \lambda \in [1, K], \mu \in [1, 3]$, в общем случае, не являются. В то же время, весьма желательно [7], чтобы уравнения, описывающие динамику электромагнитного компонента взаимодействия СПК с ДПК, 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 модели (2), (3) к координатам $\eta_{\lambda}^{\mu} \forall \lambda \in [1, K], \mu \in [1, 3]$. Соотношение между упомянутыми производными, как известно, имеет вид [10]:

$$\frac{D}{dt} \eta_{\alpha}^{\mu} = \frac{d}{dt} \eta_{\alpha}^{\mu} + e_{\mu\alpha\nu} \cdot \omega_{\alpha} \cdot \eta_{\alpha}^{\nu} \forall \mu, \nu \in [1, 3], \quad (5)$$

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

После указанной замены, 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 ко-

ординатам $\eta_{\alpha}^{\mu} \forall \mu \in [1, 3]$ осуществим согласно выражениям:

$$\eta_{\alpha}^{\mu} = \mathfrak{g}_{\rho}^{\mu} \cdot \varepsilon^{\rho}$$

$$\forall \rho \in [(\chi_{\alpha} - E), (\chi_{\alpha} + E)]; \mu \in [1, 3] \quad (6)$$

где $\mathfrak{g}_{\rho}^{\mu}$ – матрица преобразования координат:

$$\mathfrak{g}_{\rho}^{\mu} = \frac{\partial \eta_{\alpha}^{\mu}}{\partial \varepsilon^{\rho}}$$

$$\forall \rho \in [(\chi_{\alpha} - E), (\chi_{\alpha} + E)]; \mu \in [1, 3]. \quad (7)$$

На оси $\eta_{\alpha}^{\mu} \forall \mu \in [1, 3]$ и $\varepsilon^{\rho} \forall \rho \in [(\chi_{\alpha} - E), (\chi_{\alpha} + E)]$ могут проектироваться любые векторные величины, характеризующие электродинамику взаимодействия СПК и ДПК в системах отсчёта соответственно $C_{\alpha} \eta^{\mu} \forall \mu \in [1, 3]$ и $Q \varepsilon^{\rho} \forall \rho \in [(\chi_{\alpha} - E), (\chi_{\alpha} + E)]$. В частности, ими могут быть векторы токов, э. д. с. и индукции полей.

Выражения для связей вида

$$\eta_{\alpha}^{\mu} = \eta_{\alpha}^{\mu}(\varepsilon^{\rho})$$

$$\forall \rho \in [(\chi_{\alpha} - E), (\chi_{\alpha} + E)]; \mu \in [1, 3] \quad (8)$$

могут быть получены исходя из того, что [5], в процессе описываемого координатного преобразования, его инвариантами являются амплитуды токов в рассматриваемых контурах, а также их э. д. с.

С помощью же матрицы

$$\mathfrak{g}_{\mu}^{\rho} = \frac{\partial \varepsilon^{\rho}}{\partial \eta_{\alpha}^{\mu}} = (\mathfrak{g}_{\rho}^{\mu})^T$$

$$\forall \rho \in [(\chi_{\alpha} - E), (\chi_{\alpha} + E)]; \mu \in [1, 3], \quad (9)$$

осуществимо обратное преобразование

$$\varepsilon^{\rho} = \mathfrak{g}_{\mu}^{\rho} \cdot \eta_{\alpha}^{\mu}$$

$$\forall \rho \in [(\chi_{\alpha} - E), (\chi_{\alpha} + E)]; \mu \in [1, 3]. \quad (10)$$

В выражениях (3) для $\sigma_{\rho\beta}^{\kappa} \forall \rho \in [(\chi_{\beta} - E), (\chi_{\beta} + E)], \kappa = u \vee \kappa = l,$ $M_{\rho\beta}^{\kappa} \forall \rho \in [(\chi_{\beta} - E), (\chi_{\beta} + E)], \kappa = u \vee \kappa = l$ существенно зависят, в частности, от взаимного рас-

РУХОМИЙ СКЛАД ЗАЛІЗНИЦЬ І ТЯГА ПОЇЗДІВ

положения рассматриваемого β -го СПК и ДПК, взаимодействие с которыми для него рассматривается. Поэтому

$$M_{\rho\beta}^{\kappa} = M_{\rho\beta}^{\kappa}(w_{\beta}) \quad \forall \rho \in [(\chi_{\beta} - E), (\chi_{\beta} + E)],$$

$$\kappa = u \vee \kappa = l, \quad (11)$$

где w_{β} – координата, определяющая текущее положение рассматриваемого β -го СПК относительно начала отсчёта движения МЛП вдоль оси пути. При этом, поскольку ДПК вдоль трассы движения поезда располагаются регулярно, последние зависимости имеют гармонический характер. В то же время, современные способы измерения позволяют [9] экспериментально-расчётными методами со вполне приемлемой точностью определять значения взаимных индуктивностей контуров магнитосвязанных электрических цепей при различном текущем их пространственном взаиморасположении. Это, в свою очередь, позволяет, используя упомянутые методы, поточно строить искомые зависимости (11) на требуемой сетке w_{β} . Далее, с использованием методов, например, полиномиальной регрессии [6], реализация которых доступна в ряде современных систем компьютерной математики (например, Mathematica), зависимостям вида (11) может, с сохранением достаточно высокой точности содержания, быть придана форма аналитических выражений. Помимо того, с учётом равенств (4), выражения (3) могут быть преобразованы к виду

$$\sigma_{\rho\beta} = \sigma_{\rho\beta}^u - \sigma_{\rho\beta}^l; \quad \sigma_{\rho\beta}^{\kappa} = -i_s \cdot \dot{w}_{\beta} \cdot \frac{d}{dw_{\beta}} M_{\rho\beta}^{\kappa}$$

$$\forall \rho \in [(\chi_{\beta} - E), (\chi_{\beta} + E)], \quad \kappa = u \vee \kappa = l, \quad (12)$$

где \dot{w}_{β} – скорость продольного (вдоль касательной к оси) движения рассматриваемого β -го СПК относительно пути. Значения $\frac{d}{dw_{\beta}} M_{\rho\beta}^{\kappa} \quad \forall \rho \in [(\chi_{\beta} - E), (\chi_{\beta} + E)], \quad \kappa = u \vee \kappa = l$ для подстановки в выражения (12) могут быть получены с использованием, созданных описанным путём в форме аналитических выраже-

ний, зависимостей вида (11). Таким образом, каждый из β векторов $\overline{\sigma_{\rho\beta}} \quad \forall \rho \in [(\chi_{\beta} - E), (\chi_{\beta} + E)]$ оказывается определёнными в системе отсчёта $Q\varepsilon^{\rho} \quad \forall \rho \in [(\chi_{\beta} - E), (\chi_{\beta} + E)]$. Далее, с использованием соотношений вида (6) – (8), каждый такой вектор может быть определён в системе $C_{\beta}\eta^{\mu} \quad \forall \mu \in [1, 3]$ проекциями $\sigma_{\mu\beta} \quad \forall \mu \in [1, 3]$.

После преобразований, уравнения, полученные из (2) и (3) путём их трансформации в триэдр $C_{\beta}\eta^{\mu} \quad \forall \mu \in [1, 3]$ с использованием соотношений (5) и (6), приобретают вид

$$\sigma_{\mu\beta} = L_{\mu\mu} \cdot \left(\frac{d}{dt} i^{\mu} + e_{\mu\beta\nu} \cdot \omega_{\beta} \cdot i^{\nu} \right) +$$

$$+ L_{\mu\tau} \cdot \left(\frac{d}{dt} i^{\tau} + e_{\tau\beta\theta} \cdot \omega_{\beta} \cdot i^{\theta} \right) + r_{\mu} \cdot i^{\mu}$$

$$\forall \mu, \nu, \tau, \theta \in [1, 3]; \quad (13)$$

$$\sigma_{\mu\beta} = \mathfrak{G}_{\rho}^{\mu} \cdot \sigma_{\rho\beta}$$

$$\forall \rho \in [(\chi_{\beta} - E), (\chi_{\beta} + E)]; \mu \in [1, 3]$$

$$\sigma_{\rho\beta} = \sigma_{\rho\beta}^u - \sigma_{\rho\beta}^l;$$

$$\sigma_{\rho\beta}^{\kappa} = -i_s \cdot \dot{w}_{\beta} \cdot \frac{d}{dw_{\beta}} M_{\rho\beta}^{\kappa}$$

$$\forall \rho \in [(\chi_{\beta} - E), (\chi_{\beta} + E)], \quad \kappa = u \vee \kappa = l. \quad (14)$$

Уравнения (13) имеют постоянные коэффициенты, являются тензорными и описывают токовую динамику ЛУ МЛП в координатах $i^{\mu} \quad \forall \mu \in [1, 3]$. После их (как правило – численного) разрешения относительно этих переменных, последние, с использованием соотношений (10), могут быть преобразованы в координаты $i^{\rho} \quad \forall \rho \in [(\chi_{\beta} - E), (\chi_{\beta} + E)]$, значения которых определяют реальные токи в цепях ДПК.

Магнитная цепь ЛУ предполагается ненасыщенной [4]. Поэтому она может считаться условно-линейной подсистемой и, следовательно, к ней применим принцип аддитивности. Исходя из этого, результирующее поле токов ДПК в любой точке геометрического простран-

РУХОМИЙ СКЛАД ЗАЛІЗНИЦЬ І ТЯГА ПОЇЗДІВ

ства $O\Xi_\gamma \forall \gamma \in [\overline{1,3}]$, в котором реально движется СПК относительно ДПК, может описываться как сумма полей, создаваемых в этой точке токами отдельных модулей ДПК:

$$B_{\gamma\beta} = B_{\gamma\rho\beta} \cdot e^\rho; e^\rho = 1;$$

$$\forall \rho \in [(\overline{\chi_\beta - E}), (\overline{\chi_\beta + E})], \gamma \in [\overline{1,3}], \quad (15)$$

где $B_{\gamma\beta}, B_{\gamma\rho\beta} \forall \rho \in [(\overline{\chi_\beta - E}), (\overline{\chi_\beta + E})], \gamma \in [\overline{1,3}]$ – пространственные компоненты индукции поля, создаваемого всеми (учитываемыми во взаимодействии с β -ым СПК) модулями ДПК, а также отдельными такими модулями в рассматриваемой точке этого пространства. В свою очередь, значения компонентов $B_{\gamma\alpha\beta} \forall \gamma \in [\overline{1,3}]$ для каждого α -ого модуля ДПК, определимы выражениями

$$B_{\gamma\alpha\beta}(i^\alpha) = B_{\gamma\alpha\beta}^u(i^\alpha) - B_{\gamma\alpha\beta}^l(i^\alpha) \forall \gamma \in [\overline{1,3}], \quad (16)$$

где $B_{\gamma\alpha\beta}^k \forall \gamma \in [\overline{1,3}], k = u \vee k = l$ – пространственные компоненты индукции поля токов катушек α -ого ДПК (взаимодействующего с β -ым СПК). Выражения для определения значений $B_{\gamma\rho\beta}^k(i^\rho) \forall \rho \in [(\overline{\chi_\beta - E}), (\overline{\chi_\beta + E})], \gamma \in [\overline{1,3}], k = u \vee k = l$ получены в [3]. Далее, в соотношения вида (16) последовательно подставляются значения токов $i^\rho \forall \rho \in [(\overline{\chi_\beta - E}), (\overline{\chi_\beta + E})]$ и, таким образом, находятся значения $B_{\gamma\rho\beta} \forall \rho \in [(\overline{\chi_\beta - E}), (\overline{\chi_\beta + E})], \gamma \in [\overline{1,3}]$, а затем по ним, согласно (15), – и $B_{\gamma\beta} \forall \gamma \in [\overline{1,3}]$.

Поскольку пространство системы $O\Xi_\gamma \forall \gamma \in [\overline{1,3}]$ – евклидово, то, исходя из его метрики, мгновенное значение модуля вектора пол-

ной индукции поля, создаваемого токами ДПК, взаимодействующих с β -ым СПК, может быть определено выражением

$$B_\beta = \sqrt{B_{\gamma\beta}^{(2)} \cdot e^\gamma}; e^\gamma = 1 \forall \gamma \in [\overline{1,3}]. \quad (17)$$

Результаты

Создана интегративная парадигма моделирования подвешивания МЛП, ассимилирующая достоинства теорий цепей и поля, но свободная от их недостатков. Построена ММП МЛП, не имеющая дефектов предыдущих версий модели. Этим решена задача настоящей части исследования.

Научная новизна и практическая значимость

Научную новизну исследования составляют приоритетность создания интегративной холистической парадигмы моделирования подвешивания МЛП, а также соответствующей версии модели реализации ЛС. Основным проявлением практической значимости работы является возможность, в случае использования её результатов, существенного повышения эффективности динамических исследований МЛП при одновременном снижении их ресурсоёмкости.

Выводы

Холистичность и интегративность созданной парадигмы исследования позволили существенно повысить качество ММП МЛП, созданной с использованием такой парадигмы. Её использование в процессе динамических исследований МЛП позволит повысить их эффективность и снизить ресурсоёмкость.

СПИСОК ИСПОЛЬЗОВАННЫХ ИСТОЧНИКОВ

1. Арменский, Е. В. Единая теория электрических машин : учеб. пособие / Е. В. Арменский, И. В. Кузина. – Москва : Изд-во Моск. ин-та электрон. машиностроения, 1975. – 256 с.
2. Бессонов, Л. А. Теоретические основы электротехники: электрические цепи : учебник / Л. А. Бессонов. – Москва : Высш. шк., 1996. – 578 с.
3. Бирюков, В. А. Магнитное поле прямоугольной катушки с током / В. А. Бирюков, В. А. Данилов // Журнал техн. физики. – 1961. – Т. XXXI, № 4. – С. 428–435.

РУХОМИЙ СКЛАД ЗАЛІЗНИЦЬ І ТЯГА ПОЇЗДІВ

4. Высокоскоростной магнитный транспорт с электродинамической левитацией : монография / В. А. Дзензерский, В. И. Омеляненко, С. В. Васильев, В. И. Матин, С. А. Сергеев. – Киев : Наук. думка, 2001. – 479 с.
5. Копылов, И. П. Математическое моделирование электрических машин : учеб. для вузов / И. П. Копылов. – Москва : Высш. шк., 2001. – 327 с.
6. Корн, Г. Справочник по математике для научных работников и инженеров / Г. Корн, Е. Корн. – Москва : Наука, 1973. – 831 с.
7. Крон, Г. Применение тензорного анализа в электротехнике : монография / Г. Крон. – Москва ; Ленинград : Госэнергоиздат, 1955. – 275 с.
8. Львович, А. Ю. Электромеханические системы : учеб. пособие / А. Ю. Львович. – Ленинград : Изд-во ЛГУ, 1989. – 296 с.
9. Панфилов, В. А. Электрические измерения : учебник / В. А. Панфилов. – Москва : Академия, 2006. – 288 с.
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) : учеб. для вузов / Г. А. Сипайлов, Е. В. Кононенко, К. А. Хорьков. – Москва : Высш. шк., 1987. – 287 с.
12. A Review on Development and Analysis of Maglev Train / G. K. Tandan, P. K. Sen, G. Sahu [et al.] // Intern. J. of Research in Advent Technology. – 2015. – Vol. 3. – Iss. 12. – P. 14–17.
13. Magnetic suspension applications on the railway traction for high speed maglev trains / M. Dumitrescu, V. Ştefan, C. Pleşcan [et al.] // Bulletin of the Transylvania University of Braşov. – 2015. – Vol. 8 (57). – Special Issue No. 1. – P. 233–244.
14. Wairagade, A. K. R. Magnetic Levitation Train / A. K. R. Wairagade, M. B. H. Balapure, P. Ganer // J. for Research. – 2015. – Vol. 01. – Iss. 08. – P. 1–5.

В. О. ПОЛЯКОВ^{1*}, М. М. ХАЧАПУРИДЗЕ^{2*}

^{1*}Від. № 7, Інститут 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 ПІДВИШУВАННЯ МАГНІТОЛЕВІТУЮЧОГО ПОЇЗДА

Мета. Реалізація левітаційної сили (ЛС) магнітолевітуючого поїзда (МЛП) відбувається у процесі взаємодії магнітних полів надпровідних поїзних (НПК) і короткозамкнених шляхових контурів (КШК) левітаційного вузла (ЛВ). Виходячи із цього, метою цього дослідження є одержання коректного опису такої взаємодії. На сучасному етапі основним і найбільш універсальним інструментом аналізу й синтезу процесів і систем є їх математичне та, зокрема, комп'ютерне моделювання. **Методика.** У той же час радикальні переваги цього інструмента роблять ще більш важливою прецизійність вибору конкретної методики проведення дослідження. Особливу актуальність це має стосовно таких 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 реалізації ЛС свідчать про те, що кожна з них, поряд із перевагами, має й істотні недоліки. У зв'язку з цим, одним із основних результатів дослідження повинна бути побудова математичної моделі реалізації зазначеної сили, що зберігає переваги згаданих версій, але вільної від їх недоліків. У роботі аргументовано обґрунтована раціональність застосування, для цілей дослідження ЛС поїзда, інтегративної холистичної парадигми, що асимілює переваги теорій електричних ланцюгів і магнітного поля. **Наукова новизна.** Пріоритетність створення такої парадигми, а також відповідної версії моделі реалізації ЛС 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 зниженні їх ресурсоємності.

Ключові слова: магнітолевітуючий поїзд; математична модель левітації; інтегративна парадигма дослідження

V. A. POLYAKOV¹, N. M. KHACHAPURIDZE^{2*}¹Dep. № 7. Institute of Transport Systems and Technologies of Ukraine's NAS, Piszhevsky 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, Piszhevsky St., 5, Dnipro, Ukraine, 49005, tel. +38 (056) 370 21 86, e-mail itst@westa-inter.com, ORCID 0000-0003-0682-6068

MAGNETICALLY LEVITATED TRAIN'S SUSPENSION MODEL

Purpose. The implementation of the magnetically levitated train's (MLT) levitation force (LF) occurs during the interaction between fields of superconducting train's (STC) and short-circuited track's contours (STC), which are included in to levitation module (LU). Based on this, the purpose of this study is to obtain a correct description of such interaction. **Methodology.** At the present stage, the main and most universal tool for the analysis and synthesis of processes and systems is their mathematical and, in particular, computer modeling. At the same time, the radical advantages of this tool make even more important the precision of choosing a specific methodology for research conducting. This is particularly relevant in relation to such large and complex systems as MLT. For this reason, the work pays special attention to the reasoned choice of the selective features of the research paradigm. **Findings.** The analysis results of existing versions of LF implementation's models show that each of them, along with the advantages, also has significant drawbacks. In this regard, one of the main results of the study should be the construction of this force implementation's mathematical model, which preserves the advantages of the mentioned versions, but free from their shortcomings. The rationality of application, for the train's LF researching, of an integrative holistic paradigm, which assimilates the advantages of the electric circuit's and magnetic field's theory's, is reasonably justified in work. **Originality.** The scientific novelty of the research – in priority of such a paradigm's and the corresponding version's of the LF's implementation's model's creating. **Practical value.** The main manifestation of the practical significance of the work is the possibility, in the case of using its results, to significantly increase the effectiveness of dynamic MLT research while reducing their resource costing.

Keywords: magnetically levitated train; mathematical model of levitation; integrative paradigm of research

REFERENCES

1. Armenskiy, Y. V., & Kuzina I. V. (1975). *Yedinaya teoriya elektricheskikh mashin* [Monograph]. Moscow: MIEM.
2. Bessonov, L. A. (1996). *Teoreticheskiye osnovy elektrotehniki: elektricheskiye tsepi* [Monograph]. Moscow: Vysshaya shkola.
3. Biryukov, V. A., & Danilov, V. A. (1961). Magnitnoye pole pryamougolnoy katushki s tokom. *Technical Physics, XXXI* (4), 428-435.
4. Dzenzerskiy, V. A., Omelyanenko, V. I., Vasilev, S. V., Matin, V. I., & Sergeev, S. A. (2001). *Vysokoskorostnoy magnitnyy transport s elektrodinamicheskoy levitatsiey* [Monograph]. Kyiv: Naukova dumka.
5. Kopylov, I. P. (2001). *Matematicheskoye modelirovaniye elektricheskikh mashin* [Monograph]. Moscow: Vysshaya shkola.
6. Korn, G., & Korn, Y. (1973). *Spravochnik po matematike dlya nauchnykh rabotnikov i inzhenerov*. Moscow: Nauka.
7. Kron, G. (1955). *Primeneniye tenzornogo analiza v elektrotehnike* [Monograph]. Moscow-Leningrad: Gostekhizdat.
8. Lvovich, A. Y. (1989). *Elektromekhanicheskiye sistemy* [tutorial]. Leningrad: St. Petersburg State University.
9. Panfilov, V. A. (2006). *Elektricheskiye izmereniya* [tutorial]. Moscow: Akademiya.
10. Rashevskiy, P. K. (1967). *Rimanova geometriya i tenzornyy analiz*. Moscow: Nauka.
11. Sipaylov, G. A., Kononenko, Y. V., & Khorkov, K. A. (1987). *Elektricheskiye mashiny (spetsialnyy kurs)* [tutorial]. Moscow: Vysshaya shkola.
12. Tandan, G. K., Sen, P. K., Sahu, G., Sharma, R., & Bohidar, S. (2015). A Review on Development and Analysis of Maglev Train. *International Journal of Research in Advent Technology*, 3 (12), 14-17.
13. Dumitrescu, M., Ștefan, V., Pleșcan, C., Bobe, C. I., Dragne, G. M., Badea, C. N., Dumitru, G. (2015). Magnetic suspension applications on the railway traction for high speed maglev trains. Proceeding of the Interna-

РУХОМИЙ СКЛАД ЗАЛІЗНИЦЬ І ТЯГА ПОЇЗДІВ

- tional Scientific Conference «CIBV 2015», October, 30-31, 2015, Brasov, Romania. [Special Issue]. *Bulletin of the Transylvania University of Braşov*, 8 (57), 233-244.
14. Kelwadkar, A., Wairagade, R., Boke, M., Balapure, H., & Ganer, P. (2015). Magnetic Levitation Train. *Journal for Research*, 01 (08), 1-5.

Стаття рекомендована к публікації д.физ.-мат.н., А. А. Зевиним (Україна); д.т.н., проф. И. В. Жуковицким (Україна)

Поступила в редколлегию: 05.06.2017

Принята к печати: 12.09.2017