

РУХОМИЙ СКЛАД І ТЯГА ПОЇЗДІВ

УДК 629.439

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

^{1*}Отд. № 7 Института транспортных систем и технологий НАН Украины, ул. Писаржевского, 5, Днипро, Украина, 49005, тел. +38 (056) 232 30 55, эл. почта p_v_a_725@i.ua, 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

ПРОДОЛЬНЫЕ НЕСТАЦИОНАРНЫЕ ДВИЖЕНИЯ МАГНИТОЛЕВИТИРУЮЩЕГО ПОЕЗДА

Цель. Качество транспортирования пассажиров и грузов магнитолевитирующим поездом (МЛП) является ключевым критерием оценки его потребительских свойств. Определяющее влияние на это качество оказывает динамика электромеханической подсистемы (ЭМП) поезда. Особо критичны нестационарные режимы движения этой подсистемы, такие как набор скорости, служебное и экстренное торможение, а также проход тоннеля. Движение поезда в таких режимах лимитировано допустимыми нормами безопасности. Исходя из указанного, цель настоящего исследования состоит в оценке динамических качеств и нагруженности поезда в нестационарных режимах. Методика. На современном этапе основным и наиболее универсальным инструментом анализа и синтеза процессов в системах является их математическое и, в частности, компьютерное моделирование. Исходя из этого, работа выполнена путём проведения ряда экспериментов с компьютерной моделью динамики ЭМП МЛП, полученной в результате релевантного преобразования в неё соответствующей модели математической. Компьютерная модель программно зафиксирована на входном языке системы компьютерной математики Mathematica. Результаты. Полученные результаты моделирования приведены в графической форме и отражают движение поезда в режимах разгона, прохождения тоннеля, а также служебного и экстренного торможения. Управление электромеханической подсистемой поезда во всех рассматриваемых переходных режимах движения, за исключением экстренного торможения, осуществляют путём изменения, согласно тому или иному закону, напряжения, питающего якорную обмотку линейного синхронного двигателя. Поэтому при моделировании движения поезда в каждом из таких режимов рассмотрены варианты только частотного, амплитудно-частотного, а также фазо-частотного управления изменением упомянутого якорного напряжения двигателя. Анализ результатов моделирования позволил оценить динамические качества МЛП в различных нестационарных режимах движения и его нагруженность в их процессе. Научная новизна. Исследование приоритетно по критерию холического рассмотрения нестационарных режимов движения электромеханической подсистемы магнитолевитирующего поезда. Практическая значимость. Основным проявлением практической значимости работы является возможность, в случае использования её результатов, существенного повышения эффективности динамических исследований нестационарных режимов магнитолевитирующего поезда при одновременном снижении их ресурсоёмкости.

Ключевые слова: магнитолевитирующий поезд; МЛП; нестационарные режимы движения; динамические качества; динамическая нагруженность; компьютерный эксперимент

Введение

Магнитолевитирующий поезд (МЛП) – большая, сложная система, элементы которой весьма разнотипны. Её основное предназначение –

транспортирование пассажиров и грузов. Качество транспортирования – ключевой критерий оценки потребительски свойств поезда.

РУХОМИЙ СКЛАД І ТЯГА ПОЇЗДІВ

Цель

На указанное качество детерминирующее влияние оказывает динамика электромеханической подсистемы (ЭМП). Особо критичны нестационарные режимы её движения. Они являются лимитирующими и подлежат первоочередному исследованию. Его проведение – основная цель работы.

Методика

Работа выполнена путём проведения ряда экспериментов с компьютерной моделью динамики ЭМП МЛП, полученной в результате релевантной трансформации в неё созданной модели математической.

Результаты

Рассмотрено одномерное продольное движение МЛП. В качестве расчётной схемы его механической подсистемы (МП) принято твёрдое тело массой m . Движение рассматривается относительно инерциальной неподвижной декартовой системы отсчёта $OXYZ$. С упомянутым телом связан декартов триэдр $Cxyz$, оси которого являются его главными центральными. Изменение положения тела во времени t определяется декартовой координатой $x(t)$ центра масс. На тело не наложены аналитические связи. Конфигурация МП МЛП может быть описана с помощью одной обобщённой координаты:

$$\eta^1 = x. \quad (1)$$

Движение рассматриваем в состоянии электродинамической левитации – после отрыва от путенаправляющих конструкций. В процессе движения считаем отсутствующими отклонения центра масс тела m от стационарной траектории, параллельной кривой оси пути и симметрично расположенной относительно его конструкций. На тело действуют следующие силы [2]: F_{Tx} – продольная составляющая тягового усилия – со стороны линейного синхронного двигателя (ЛСД); F_{ADx} – продольная составляющая аэродинамического усилия – со стороны окружающей воздушной среды; F_{EDx} – продольная составляющая электродинамиче-

ского усилия – со стороны путевых контуров подвешивания; F_{Wx} – продольная составляющая веса поезда – вследствие наличия продольного уклона пути.

Продольное поступательное движение МП МЛП описуемо вторым законом Ньютона:

$$m \cdot \ddot{x} = F_{Tx} + F_{ADx} + F_{EDx} + F_{Wx}, \quad (2)$$

где \ddot{x} – продольное ускорение точки C .

Значения F_{Tx} определимы [3] соотношениями:

$$F_{Tx} = f_{\lambda\chi} \cdot e^\lambda \cdot e^\chi; \quad e^\lambda = e^\chi = 1;$$

$$f_{\lambda\chi} = l_{\lambda\chi} \cdot i^\lambda \cdot B_{\lambda\chi} \quad \forall \lambda \in [\overline{1, N}], \chi \in [\overline{1, 2}], \quad (3)$$

где $f_{\lambda\chi}$ – сила взаимодействия полей токов цепей χ -го прямолинейного элемента λ -го контура индуктора с якорем; $l_{\lambda\chi}, i^\lambda, B_{\lambda\chi}$ – длина такого элемента, ток в нём, а также индукция (условно однородного – в пределах элемента) магнитного поля, в котором элемент находится.

Значения величин F_{ADx} оценочно описуемы [4, 7, 8] соотношениями:

$$F_{ADx} = -C_x \cdot q \cdot S; \quad q = 0,5 \cdot \rho \cdot \dot{x}^{(2)}, \quad (4)$$

где C_x – безразмерный аэродинамический коэффициент в направлении Cx ; S – характерная площадь сечения поезда в том же направлении; ρ – плотность окружающего его воздуха.

Значения величин F_{EDx} аппроксимируемы [5, 9, 11] полиномом вида:

$$F_{EDx} = k_\rho \cdot \dot{x}^\rho \cdot e^\rho; \quad e^\rho = 1 \quad \forall \rho \in [\overline{1, n_r}], \quad (5)$$

в котором $k_\rho \quad \forall \rho \in [\overline{1, n_r}]$ – коэффициенты регрессии экспериментальных зависимостей $F_{EDx}(t)$ со степенью аппроксимационного полинома n_r .

Наконец, изменение F_{Wx} описываем выражением:

$$F_{Wx} = m \cdot g \cdot \sin \phi_k, \quad (6)$$

где g – ускорение свободного падения; ϕ_k – угол уклона профиля k -го участка пути, по которому движется поезд.

РУХОМИЙ СКЛАД І ТЯГА ПОЇЗДІВ

Математическая модель (2) описывает продольное одномерное движение МП МЛП под действием учитываемых внешних возмущений, а также управления со стороны его ЛСД. Упомянутая модель была принята в качестве алгоритмической основы построения компьютерной модели того же процесса движения. Элементы компьютерной модели подразделяем на расчётную и графическую части. Первая из этих частей решает прямую задачу динамики подсистемы, а вторая – преобразует результаты расчётов в графическую форму. Исследование осуществлено проведением экспериментов с компьютерной моделью. Их результатом явились графики функциональных зависимостей от времени характеризующих и порождающих это движение величин. Было исследовано движение в нестационарных режимах набора скорости, прохода тоннеля, служебного и экстренного торможения. Ниже изложены и проанализированы некоторые результаты этого исследования.

Частоту напряжения, питающего якорную обмотку ЛСД, всегда автоматически поддерживают [2] пропорциональной скорости движения МЛП. Помимо частотного, управление системой может иметь дополнительный компонент, обеспечивающий повышение плавности электромагнитных процессов в ЛСД и механических – в МП. В качестве такого компонента можно использовать амплитудное либо фазовое управление. В первом из этих случаев, в процессе разгона МЛП, плавность подачи энергии на ЛСД обеспечивается за счёт повышения амплитуды напряжения, питающего его якорь, например, по закону:

$$U_a(t) = U_a^* \cdot th(t \cdot k_{vd}), \quad (7)$$

где U_a^* – предельное значение этой амплитуды; k_{vd} – коэффициент, определяющий интенсивность нарастания амплитуды напряжения.

При фазовом регулировании разгона поезда начальная фаза якорного напряжения может изменяться, например, согласно закону:

$$\theta_u(t) = \alpha_u \cdot [th(t \cdot k_{fd}) - 1], \quad (8)$$

где α_u – его текущая фаза; k_{fd} – коэффициент, определяющий темп изменения начальной фазы.

Иллюстративные примеры результатов исследования движения МЛП в режиме набора скорости приведены на рис. 1–6. Рис. 1 и 2 соответствуют управлению только частотой напряжения, рис. 3 и 4 – амплитудно-частотному управлению, рис. 5 и 6 – фазо-частотному управлению. На рис. 1, 3 и 5 приведены графики скорости экипажа, а на рис. 2, 4 и 6 – графики действующей на него тяговой силы ЛСД.

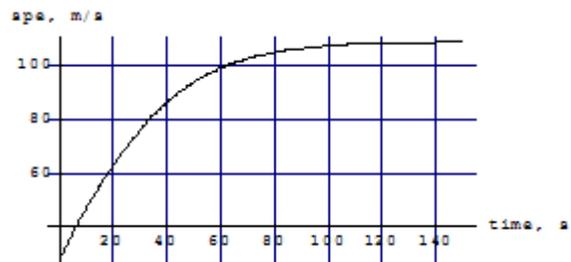


Рис. 1. График скорости поезда при управлении частотой напряжения

Fig. 1. The train's speed graph with voltage frequency control

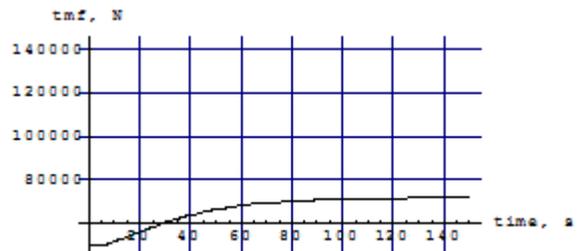


Рис. 2. График тяговой силы МЛП при управлении частотой напряжения

Fig. 2. The maglev train's traction force graph with voltage frequency control

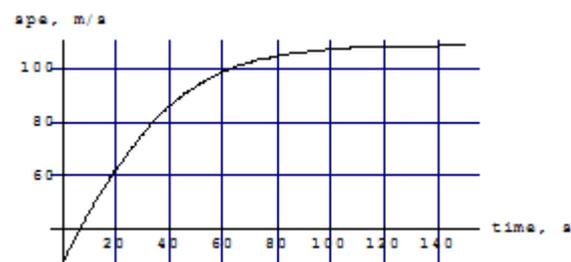


Рис. 3. График скорости поезда при амплитудно-частотном управлении напряжением

Fig. 3. The train's speed graph with amplitude-frequency voltage control

РУХОМИЙ СКЛАД І ТЯГА ПОЇЗДІВ

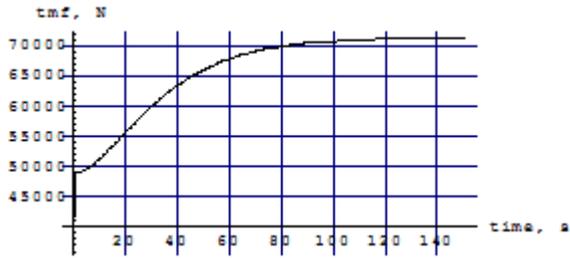


Рис. 4. Графік тягової сили МЛП при амплитудно-частотному управлінні напругою

Fig. 4. The maglev train's traction force graph with amplitude-frequency voltage control

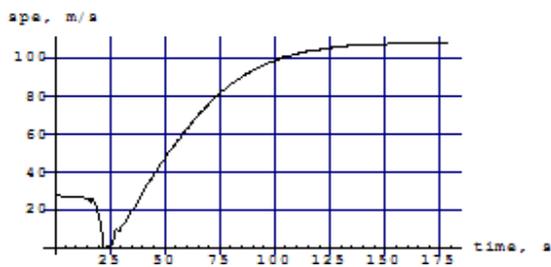


Рис. 5. Графік швидкості поїзда при фазо-частотному управлінні напругою

Fig. 5. The train's speed graph with phase-frequency voltage control

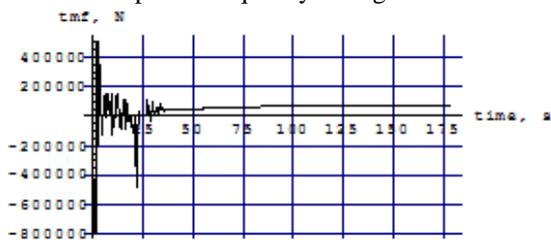


Рис. 6. Графік тягової сили МЛП при фазо-частотному управлінні напругою

Fig. 6. The maglev train's traction force graph with phase-frequency voltage control

Анализ результатов моделирования разгона поезда свидетельствует о неприемлемости как только частотного управления – из-за высокого ускорения поезда, так и фазо-частотного – вследствие осцилляции скорости МЛП. Наиболее приемлемо амплитудно-частотное управление якорным напряжением.

Вход поезда в тоннель и выход из него приводят к перепадам аэродинамического сопротивления примерно на 30 % [1, 6, 8, 10], что может приводить к резким колебаниям ускорения и скорости движения. Это недопустимо

и делает целесообразной автоматизацию управления им. При входе и выходе из тоннеля это дополнительное сопротивление изменяется почти по линейному закону. Поэтому при моделировании такого режима движения считалось, что аэродинамическое сопротивление ему описывают соотношения:

$$F_{ADx}^* = F_{ADx} \cdot [1 + (1/0,7 - 1) \cdot \kappa];$$

$$\kappa = \begin{cases} 0 & \forall x < \xi_{ts} - 0,5 \cdot l_v \vee x > \xi_{tf} + 0,5 \cdot l_v; \\ (x + 0,5 \cdot l_v - \xi_{ts}) \cdot l_v^{(-1)} & \forall \xi_{ts} - 0,5 \cdot l_v \leq x \leq \xi_{ts} + 0,5 \cdot l_v; \\ 1 & \forall \xi_{ts} + 0,5 \cdot l_v < x < \xi_{tf} - 0,5 \cdot l_v; \\ (\xi_{tf} - x + 0,5 \cdot l_v) \cdot l_v^{(-1)} & \forall \xi_{tf} - 0,5 \cdot l_v \leq x \leq \xi_{tf} + 0,5 \cdot l_v, \end{cases} \quad (9)$$

где l_v – длина поезда; ξ_{ts}, ξ_{tf} – расстояния от точки начала отсчёта пути до начала и конца тоннеля. Цель управления при движении в тоннеле:

$$\ddot{x}(t) = \ddot{x}_{ts} = const, \quad (10)$$

где \ddot{x}_{ts} – ускорение поезда при входе в тоннель. Этого условие достигается частотным, амплитудно-частотным либо фазо-частотным управлением напряжением U_a . Требуемые законы его изменения найдены с использованием модели (2) (в которой F_{ADx} заменено величиной F_{ADx}^* , вычисляемой согласно соотношениям (9), а \ddot{x} заменено величиной \ddot{x}_{ts} , вычисляемой согласно (10)), а также модели динамики ЛСД [4].

Иллюстративные примеры результатов исследования движения МЛП в тоннеле приведены на рис. 7–12. Рис. 7 и 8 соответствуют управлению частотой якорного напряжения, рис. 9 и 10 – амплитудно-частотному управлению этим напряжением, а рис. 11 и 12 – фазо-частотному управлению. При этом на рис. 7, 9

РУХОМИЙ СКЛАД І ТЯГА ПОЇЗДІВ

и 11 приведены графики скорости экипажа, а на рис. 8, 10 и 12 – графики действующей на него тяговой силы ЛСД.



Рис. 7. График скорости поезда во время движения в тоннеле при управлении частотой напряжения

Fig. 7. The train's speed graph at motion in the tunnel while frequency voltage controlling

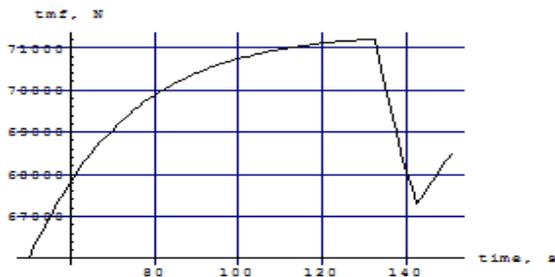


Рис. 8. График тяговой силы МЛП во время движения в тоннеле при управлении частотой напряжения

Fig. 8. The maglev train's traction force graph at motion in the tunnel while frequency voltage controlling

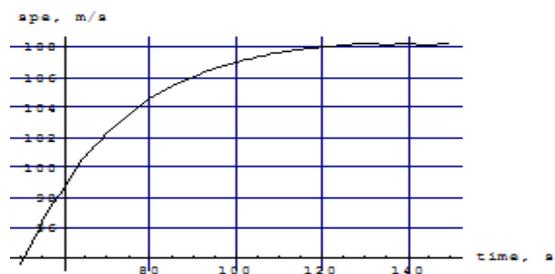


Рис. 9. График скорости поезда во время движения в тоннеле при амплитудно-частотном управлении напряжением

Fig. 9. The train's speed graph at motion in the tunnel with amplitude-frequency voltage control

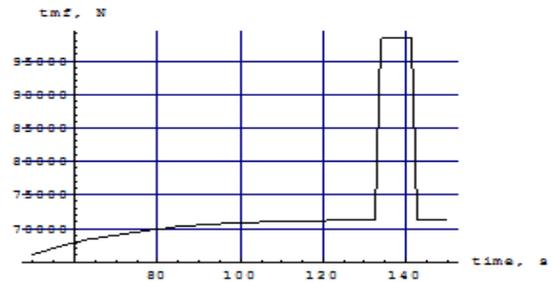


Рис. 10. График тяговой силы МЛП во время движения в тоннеле при амплитудно-частотном управлении напряжением

Fig. 10. The maglev train's traction force graph at motion in the tunnel with amplitude-frequency voltage control

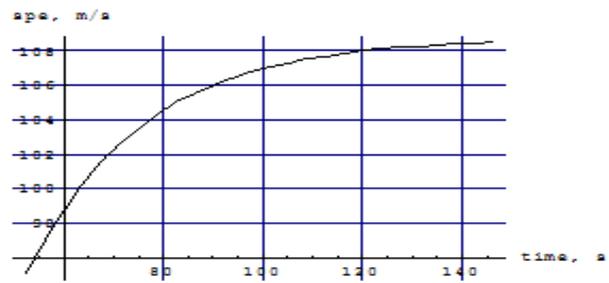


Рис. 11. График скорости поезда во время движения в тоннеле при фазо-частотном управлении напряжением

Fig. 11. The train's speed graph at motion in a tunnel with phase-frequency voltage control

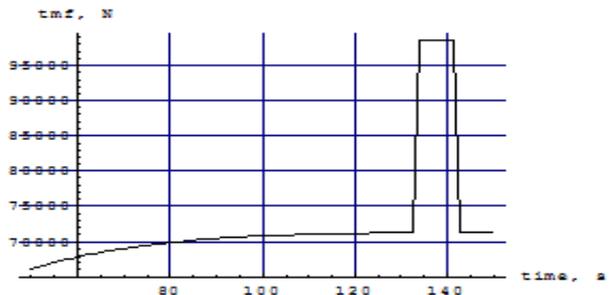


Рис. 12. График тяговой силы МЛП во время движения в тоннеле при фазо-частотном управлении напряжением

Fig. 12. The maglev train's traction force graph at motion in a tunnel with phase-frequency voltage control

Анализ результатов моделирования указанных трёх вариантов управления проходом поезда сквозь тоннель приводит к следующим

РУХОМИЙ СКЛАД І ТЯГА ПОЇЗДІВ

выводам. В случае только частотного управления перепад значения скорости МЛП составляет около 10 %, что, безусловно, недопустимо. Иные два способа автоматического регулирования напряжения примерно эквивалентны, так как в обоих этих случаях отсутствуют сколь угодно существенные колебания скорости и ускорения МЛП при проходе тоннеля. В то же время фазо-частотный способ регулирования проще (поскольку отпадает необходимость регулирования высоковольтных напряжений). Однако при амплитудно-частотном регулировании пиковые значения фазовых токов примерно в полтора раза ниже, что снижает токовую нагрузку на электрооборудование двигателя.

В процессе движения МЛП происходит взаимное перемещение якорной и индукторных обмоток ЛСД. В этих обмотках индуцируются электродвижущие силы взаимной индукции, ведущие к возникновению механических сил, противодействующих взаимному смещению обмоток. Напряжение, питающее якорную обмотку двигателя, обычно компенсирует указанные электродвижущие силы, и ЛСД работает в тяговом режиме. Но если текущее значение якорного напряжения $u_v, \forall v \in [A, B, C]$ снижается, двигатель автоматически переходит в тормозной режим. Как и разгон МЛП, его электродинамическое торможение должно быть плавным. Поэтому двумя наиболее приемлемыми путями осуществления служебного торможения поезда являются амплитудно-частотное и фазо-частотное регулирование якорного напряжения ЛСД. Для реализации указанных режимов плавного регулирования амплитуда и начальная фаза напряжения на якоре могут изменяться, например, согласно законам:

$$U_a(t) = U_a^* \cdot [1 - th(t \cdot k_{vi})]; \quad (11)$$

$$\theta_u(t) = -\alpha_u \cdot th(t \cdot k_{fm}), \quad (12)$$

где k_{vi}, k_{fm} – коэффициенты, определяющие темп изменения амплитуды и начальной фазы якорного напряжения. Эти законы можно использовать для служебного торможения поезда. Для экстренного же торможения применимо мгновенное снятие питающего напряжения

с якорной обмотки двигателя, но с сохранением замкнутости её контуров – путём двубортного трёхфазного короткого замыкания этой обмотки.

Иллюстративные примеры результатов исследования движения МЛП в различных тормозных режимах приведены на рис. 13–18. Рис. 13 и 14 соответствуют реализации служебного торможения при амплитудно-частотном регулировании напряжения, а рис. 15 и 16 – при фазо-частотном. Наконец, рис. 17 и 18 соответствуют экстремному торможению – путём двубортного трёхфазного короткого замыкания якорной обмотки ЛСД. При этом на рис. 13, 15 и 17 приведены графики скорости поезда, а на рис. 14, 16 и 18 – графики действующей на него тяговой силы ЛСД.



Рис. 13. График скорости поезда во время служебного торможения при амплитудно-частотном регулировании напряжения

Fig. 13. The train's speed graph at service braking with amplitude-frequency voltage control



Рис. 14. График тяговой силы МЛП во время служебного торможения при амплитудно-частотном регулировании напряжения

Fig. 14. The maglev train's traction force graph at service braking with amplitude-frequency voltage regulation

РУХОМИЙ СКЛАД І ТЯГА ПОЇЗДІВ



Рис. 15. График скорости поезда во время служебного торможения при фазо-частотном регулировании напряжения

Fig. 15. The train's speed graph at service braking with phase-frequency voltage regulation

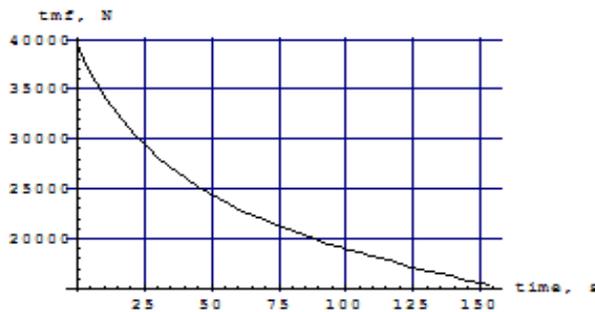


Рис. 16. График тяговой силы МЛП во время служебного торможения при фазо-частотном регулировании напряжения

Fig. 16. The maglev train's traction force graph at service braking with phase-frequency voltage regulation

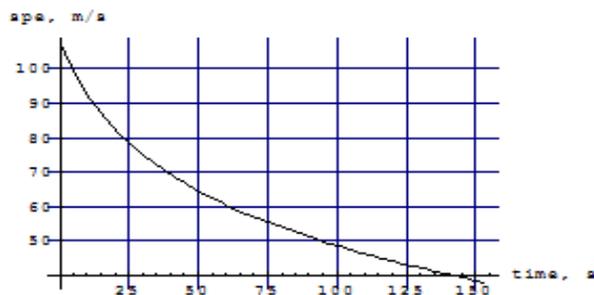


Рис. 17. График скорости поезда во время экстренного торможения

Fig. 17. The train's speed graph at emergency braking

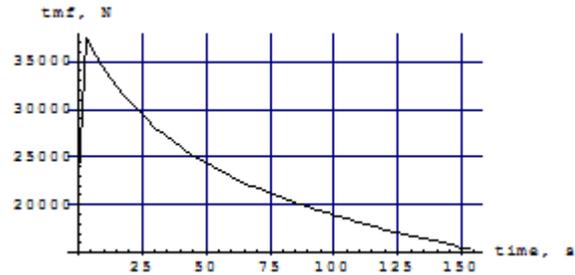


Рис. 18. График тяговой силы МЛП во время экстренного торможения

Fig. 18. The maglev train's traction force graph at emergency braking

Анализ результатов моделирования указанных тормозных режимов движения МЛП позволяет сделать следующие выводы. Рассмотренные режимы служебного торможения (при амплитудно-частотном и фазо-частотном регулировании якорного напряжения двигателя) по реализуемым тормозным характеристикам примерно равноценны. Оба они обеспечивают достаточную плавность изменения ускорения и скорости поезда. Пиковые значения ускорения при этом не превышают $0,15 \cdot g$, что вполне приемлемо. Реализация экстренного торможения приводит к значительным пиковым ускорениям – около $0,22 \cdot g$, устранить которые не представляется возможным. Однако такое кратковременное повышение ускорения в экстремальных ситуациях является оправданным.

Научная новизна и практическая значимость

Научная новизна исследования состоит в приоритетности количественного исследования нестационарных режимов движения ЭМП МЛП. Основным же проявлением практической значимости является возможность, в случае использования результатов работы, существенного повышения эффективности динамических исследований МЛП при одновременном снижении их ресурсоёмкости.

Выводы

Путём компьютерного моделирования изучена динамика магнитолевитирующего поезда, подверженного естественным возмущениям

РУХОМИЙ СКЛАД І ТЯГА ПОЇЗДІВ

и управляемого линейным синхронным двигателем в режимах разгона, прохода тоннеля, а также служебного и экстренного торможения. Анализ полученных результатов позволил оце-

нить динамические качества поезда в рассмотренных нестационарных режимах движения, а также его нагруженность в их процессе. Этим решена задача настоящей части исследования.

СПИСОК ИСПОЛЬЗОВАННЫХ ИСТОЧНИКОВ

1. Анисимов, В. А. Тяговые расчёты : монография / В. А. Анисимов, В. В. Анисимов. – Хабаровск : [б. и.], 2013. – 185 с.
2. Высокоскоростной магнитный транспорт с электродинамической левитацией / В. А. Дзензерский, В. И. Омеляненко, С. В. Васильев [и др.]. – Киев : Наукова думка, 2001. – 479 с.
3. Поляков, В. А. Модель процесса реализации тяговой силы двигателя магнитолевитирующего поезда / В. А. Поляков, Н. М. Хачапуридзе // Наука та прогрес транспорту. – 2016. – № 4 (64). – С. 55–62. doi: 10.15802/stp2016/77909
4. Baker, C. The Flow Around High Speed Trains / C. Baker // J. of Wind Engineering and Industrial Aerodynamics. – 2010. – Vol. 98. – Iss. 6-7. – P. 277–298. doi: 10.1016/j.jweia.2009.11.002
5. Behbahani, H. Development of technical and economical models for widespread application of magnetic levitation system in public transport / H. Behbahani, H. Yaghoubi, M. A. Rezvani // International Journal of Civil Engineering. – 2012. – Vol. 10, No. 1. – P. 13–24.
6. Choi, J.-K. Effects of nose shape and tunnel cross-sectional area on aerodynamic drag of train traveling in tunnels / J.-K. Choi, K.-H. Kim // Tunnelling and Underground Space Technology. – 2014. – Vol. 41. – P. 62–73. doi: 10.1016/j.tust.2013.11.012
7. Djabbarov, S. T. Aerodynamic field model of high-speed train / S. T. Djabbarov, M. Mirakhmedov, B. Mardonov // Transport Problems : VIII Conf. Intern. (27.06–29.06.2016) / Silesian University of Technology. – Katowice, 2016. – P. 107–115.
8. CFD simulation of train aerodynamics: train-induced wind conditions at an underground railroad passenger platform / A. Khayrullina, B. Blocken, W. Janssen, J. Straathof // J. of Wind Engineering and Industrial Aerodynamics. – 2015. – Vol. 139. – P. 100–110. doi: 10.1016/j.jweia.2015.01.019
9. Paudel, N. Modeling the dynamic electromechanical suspension behavior of an electrodynamic eddy current maglev device / N. Paudel, J. Z. Bird // Progress in Electromagnetic Research B. – 2013. – Vol. 49. – P. 1–30. doi: 10.2528/pierb12121115
10. Rabani, M. Numerical analysis around a passenger train entering the tunnel / M. Rabani, A. K. Faghih // Tunneling and Underground Space Technology. – 2015. – Vol. 45. – P. 203–213. doi: 10.1016/j.tust.2014.10.005
11. Yaghoubi, H. Development of a Maglev Vehicle/Guideway System Interaction Model and Comparison of the Guideway Structural Analysis with Railway Bridge Structures / H. Yaghoubi, H. Ziari // Journal of Transportation Engineering. – 2011. – Vol. 137. – Iss. 2. – P. 140–154. doi: 10.1061/(asce)te.1943-5436.0000197

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

^{1*}Від. № 7 Інституту транспортних систем і технологій НАН України, вул. Пісаржевського, 5, Дніпро, Україна, 49005, тел. +38 (056) 232 30 55, ел. пошта p_v_a_725@i.ua, 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

ПОЗДОВЖНІ НЕСТАЦІОНАРНІ РУХИ МАГНІТОЛЕВІТУЮЧОГО ПОЇЗДА

Мета. Якість транспортування пасажирів і вантажів магнитолевітуючим поїздом (МЛП) є ключовим критерієм оцінки його споживчих властивостей. Визначальний вплив на цю якість має динаміка електромеханічної підсистеми (ЕМП) поїзда. Особливо критичні нестационарні режими руху цієї підсистеми, такі як набір швидкості, службове й екстремне гальмування, а також проходження тунелю. Тому рух поїзда в таких режимах

Creative Commons Attribution 4.0 International

doi: 10.15802/stp2019/165891

© В. А. Поляков, Н. М. Хачапуридзе, 2019

РУХОМИЙ СКЛАД І ТЯГА ПОЇЗДІВ

лімітовано допустимими нормами безпеки. Зважаючи на зазначене, мета цього дослідження полягає в оцінці динамічних якостей і навантаженості поїзда в нестационарних режимах. **Методика.** На сучасному етапі основним і найбільш універсальним інструментом аналізу й синтезу процесів у системах є їх математичне і, зокрема, комп'ютерне моделювання. Тому робота виконана шляхом проведення ряду експериментів із комп'ютерною моделлю динаміки ЄМП МЛП, отриманої в результаті релевантного впровадження в неї відповідної моделі математичної. Комп'ютерна модель програмно зафіксована вхідною мовою системи комп'ютерної математики Mathematica. **Результати.** Отримані результати моделювання наведені в графічній формі й відображають рух поїзда в режимах розгону, проходження тунелю, а також службового й екстреного гальмування. Керування електромеханічною підсистемою поїзда в усіх розглянутих перехідних режимах руху, за винятком екстреного гальмування, здійснюють шляхом зміни, згідно з тим чи іншим законом, напруги, що живить якірну обмотку лінійного синхронного двигуна. Тому під час моделювання руху поїзда в кожному з таких режимів розглянуті варіанти тільки частотного, амплітудно-частотного, а також фазо-частотного керування змінною якірної напруги двигуна. Аналіз результатів моделювання дозволив оцінити динамічні якості МЛП в різних нестационарних режимах руху і його навантаженість у їх процесі. **Наукова новизна.** Дослідження пропонує установити пріоритетність холичного розгляду нестационарних режимів руху електромеханічної підсистеми магнітолевітуючого поїзда. **Практична значимість.** Основним проявом практичної значимості роботи є можливість, у разі використання її результатів, істотного підвищення ефективності динамічних досліджень нестационарних режимів магнітолевітуючого поїзда за одночасного зниження їх ресурсомісткості.

Ключові слова: магнітолевітуючий поїзд; МЛП; нестационарні режими руху; динамічні якості; динамічна навантаженість; комп'ютерний експеримент

V. O. POLYAKOV^{1*}, N. M. KHACHAPURIDZE^{2*}

^{1*}Dep. No. 7 of the Institute of Transport Systems and Technologies of NAS of Ukraine, Piszarzhewskiy St. 5, Dnipro, Ukraine, 49005, tel. +38 (056) 232 30 55, e-mail p_v_a_725@i.ua, ORCID 0000-0002-4957-8028

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

LONGITUDINAL NON-STATIONARY MOTIONS OF MAGLEV TRAIN

Purpose. The quality of passenger's and good's transportation by a magnetically levitated train (MLT) is a key criterion for evaluating its consumer properties. The dynamics of a train's electromechanical subsystem (EMS) has a decisive influence on this quality. Non-stationary modes of this subsystem's motion, such as a speed increase, service and emergency braking, as well as the passage of the tunnel are especially critical. Therefore, the train's motion in such modes is limited by acceptable safety standards. Based on this, the purpose of this study is to assess the dynamic qualities and load of the train in the above-mentioned non-stationary modes. **Methodology.** At the present stage, the main and most universal tool for analyzing and synthesizing processes in systems is their mathematical and, in particular, computer modelling. On this basis, the work was done by conducting a series of experiments with computer model of EMS MLT dynamics. This computer model was obtained as a result of the relevant transformation of the corresponding mathematical model into it. The mentioned computer model was programmatically recorded in the input language of the Mathematica computer mathematics system. **Findings.** The obtained results of modelling are presented in graphical form and reflect the train's motion in the modes of acceleration, the passage through a tunnel, as well as service and emergency braking. The control by the train's electromechanical subsystem in all considered transient modes of motion, with the exception of emergency braking, is carried out by changing the voltage feeding of the linear synchronous motor's armature's winding according to one or another law. Therefore, during modelling the train's motion in each of these modes, frequency, amplitude-frequency, and phase-frequency control options for the motor's armature's voltage changing were considered. Analysis of the simulation results made it possible to estimate the MLT's dynamic qualities in various non-stationary modes of motion and its load in their process. **Originality.** The research suggests setting the priority of the holistic consideration of non-stationary modes of MLT's EMS's motion. **Practical value.** The main manifestation of the practical value of the work is the possibility, in the case of using its results, of significant increasing in the efficiency of dynamic studies of MLT while reducing their resource intensity.

Keywords: magnetically levitated train; MLT; nonstationary modes of motion; dynamic qualities; dynamic loading; computer experiment

REFERENCES

1. Anisimov, V. A., & Anisimov, V. V. (2013). *Tyagovye raschety: Monografiya*. Khabarovsk. (in Russian)
2. Dzenzerskiy, V. A., Omelyanenko, V. I., Vasilev, S. V., Matin, V. I., & Sergeev, S. A. (2001). *Vysokoskorostnoy magnitnyy transport s elektrodinamicheskoy levitatsiey*. Kiev: Naukova dumka. (in Russian)
3. Polyakov, V. O., & Khachapuridze, M. M. (2016). Implementation model of motor traction force of maglev train. *Science and Transport Progress*, 4(64), 55-62. doi: 10.15802/stp2016/77909 (in Russian)
4. Baker, C. (2010). The flow around high speed trains. *Journal of Wind Engineering and Industrial Aerodynamics*, 98(6-7), 277-298. doi: 10.1016/j.jweia.2009.11.002 (in English)
5. Behbahani, H., Yaghoubi, H., & Rezvani, M. A. (2012). Development of technical and economical models for widespread application of magnetic levitation system in public transport. *International Journal of Civil Engineering*, (10/1), 13-24. (in English)
6. Choi, J.-K., & Kim, K.-H. (2014). Effects of nose shape and tunnel cross-sectional area on aerodynamic drag of train traveling in tunnels. *Tunnelling and Underground Space Technology*, 41, 62-73. doi: 10.1016/j.tust.2013.11.012 (in English)
7. Djabbarov, S. T., Mirakhmedov, M., & Mardonov B. (2016). Aerodynamic field model of high-speed train. In *Proceedings of the VIII International Conference Transport Problems, June 27-29, Katowice*. (pp. 107-115). Katowice: SilesianUniversity of Technology. (in English)
8. Khayrullina, A., Blocken, B., Janssen, W., & Straathof, J. (2015). CFD simulation of train aerodynamics: traininduced wind conditions at an underground railroad passenger platform. *Journal of Wind Engineering and Industrial Aerodynamics*, 139, 100-110. doi: 10.1016/j.jweia.2015.01.019 (in English)
9. Paudel, N., & Bird, J. Z. (2013). Modeling the dynamic electromechanical suspension behavior of an electrodynamic eddy current maglev device. *Progress in Electromagnetics Research B*, 49, 1-30. doi: 10.2528/pierb12121115 (in English)
10. Rabani, M. & Faghieh, A. K. (2015) Numerical analysis around a passenger train entering the tunnel. *Tunneling and Underground Space Technology* (45), 203–213. doi: 10.1016/j.tust.2014.10.005 (in English)
11. Yaghoubi, H., & Ziari, H. (2011). Development of a Maglev Vehicle/Guideway System Interaction Model and Comparison of the Guideway Structural Analysis with Railway Bridge Structures. *Journal of Transportation Engineering*, 137(2), 140-154. doi: 10.1061/(asce)te.1943-5436.0000197 (in English)

Поступила в редколлегию: 16.11.2018

Принята к печати: 20.03.2019