

очень эффективным средством для освоения космоса и других планет, а также завершить проект глобализации и объединить мир одной целью. В последствии это даст огромный толчок в развитии техники в целом.

## ЛИТЕРАТУРА

1. Проектування і конструкція ракет-носіїв: Підручник / В.В. Близниченко, Є.О. Джур, Р. Д.Красніков, Л.Д. Кучма, А.К. Линник та ін.; за ред. акад. С .М. Конюхова. -Д.: Вид-во ДНУ, 2007.-504 с.

2. Вступ до ракетної техніки та космонавтики / А. К. Линник ; ДНУ ім. О. Гончара. – Д. : Вид-во ДНУ ім. О. Гончара, 2010. – 112 с.

УДК 629.439

## МАГНИТОЛЕВИТИРУЮЩИЙ ПОЕЗД В НЕСТАЦИОНАРНЫХ РЕЖИМАХ ДВИЖЕНИЯ

**В.А. Поляков<sup>1</sup>, Н.М. Хачапуридзе<sup>2</sup>**

<sup>1</sup>кандидат технических наук, старший научный сотрудник отдела динамики и прочности новых и нетрадиционных видов транспорта, Институт транспортных систем и технологий Национальной академии наук Украины, г. Днепр, Украина, e-mail: [pva725@mail.ru](mailto:pva725@mail.ru)

<sup>2</sup>кандидат технических наук, заместитель директора по научной работе, Институт транспортных систем и технологий Национальной академии наук Украины, г. Днепр, Украина, e-mail: [itst@westa-inter.com](mailto:itst@westa-inter.com)

**Аннотация.** Объект исследования – нестационарные режимы движения магнитолевитирующего поезда. Цель исследования – оценить его динамические качества и нагруженность в таких режимах. Работа выполнена путём проведения ряда экспериментов с компьютерной моделью динамики поезда, полученной в результате релевантной трансформации в неё созданной модели математической. Компьютерная модель программно фиксировалась на входном языке системы компьютерной математика Mathematica. Результаты моделирования приведены в графической форме и отражают движение поезда в режимах разгона, прохождения тоннеля, а также служебного и экстренного торможения. Анализ этих результатов позволил оценить динамические качества магнитолевитирующего поезда в различных нестационарных режимах движения и его нагруженность в их процессе.

*Ключевые слова:* магнитолевитирующий поезд, нестационарные режимы движения, динамические качества, динамическая нагруженность, компьютерный эксперимент.

## MAGNETICALLY LEVITATED TRAIN IN NON-STATIONARY MODE OF MOTION

**Vladislav Poljakov<sup>1</sup>, Nikolay Khachapuridze<sup>2</sup>**

<sup>1</sup>Ph.D in Technical Science, Senior Research Assistant of Department of Dynamics and Strength of a New and Nonconventional Types of Transport, Institute of Transport Systems and

Technologies of Ukraine's National Academy of Sciences, Dnepr, Ukraine, e-mail: [p.v.a.725@mail.ru](mailto:p.v.a.725@mail.ru)

<sup>2</sup>Ph.D in Technical Science, Deputy Director for Science, Institute of Transport Systems and Technologies of Ukraine's National Academy of Sciences Dnepr, Ukraine, e-mail: [itst@westa-inter.com](mailto:itst@westa-inter.com)

**Abstract.** The non-stationary modes of a magnetically levitated train's motion are the researches' subject. Its purpose is to assess the dynamic qualities and loading of a train in such modes. The work was carried out by conducting a series of experiments with the computer model of a train's dynamics, which was obtained as a result of the relevant transformation into it of the created mathematical model. The computer model was programmed in the input language of mathematical computer system's Mathematica. The simulation results are shown in graphical form and reflect the motion of the train in the modes of acceleration, passage of the tunnel, as well as service and emergency braking. An analysis of these results made it possible to evaluate the dynamic properties of a magnetically levitated train in various non-stationary modes of motion and its loading in their process.

*Keywords:* magnetically levitated train, non-stationary modes of motion, dynamic qualities, dynamic loading, computer experiment.

**Введение.** Магнитолевитирующий поезд (МЛП) – большая, сложная система, элементы которой весьма разнотипны. Её основное предназначение – транспортирование пассажиров и грузов. Качество транспортирования – ключевой критерий оценки потребительские свойства поезда.

**Цель работы.** На указанное качество определяющее влияет динамика электромеханической подсистемы. Особо критичны нестационарные режимы её движения. Они являются лимитирующими и подлежат первоочередному исследованию. Его проведение – основная задача работы.

**Материал и результаты исследования.** 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 связывается 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 описана с помощью одной обобщённой координаты:

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

Движение рассматривается в состоянии электродинамической левитации – после отрыва от путенаправляющих конструкций. В процессе движения считаются отсутствующими отклонения центра масс тела  $m$  от стационарной траектории, параллельной кривой оси пути и симметрично расположенной относительно его конструкций. На тело действуют следующие

силы [1]:  $F_{Tx}$  – 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 электродинамического усилия – со стороны путевых контуров подвешивания;  $F_{Wx}$  – продольная составляющая веса поезда – вследствие наличия продольного уклона пути.

Продольное поступательное движение МП МЛП описуемо уравнением второго закона Ньютона:

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

где  $\ddot{x}$  – продольная составляющая ускорения точки  $C$ .

Значения  $F_{Tx}$  в рассматриваемом случае определимы [2] соотношениями:

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

где  $f_{\lambda\chi}$  – сила взаимодействия полей токов цепей  $\chi$ -го прямолинейного элемента  $\lambda$ -го контура индуктора двигателя и его якоря;  $l_{\lambda\chi}, i^\lambda, B_{\lambda\chi}$  – 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 [3] 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;  $\rho$  – плотность окружающего его воздуха.

Значения величин  $F_{EDx}$  аппроксимируемы [4] полиномом вида:

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

в котором  $k_\rho \quad \forall \rho \in [1, n_r]$  получаются регрессией экспериментальных зависимостей  $F_{EDx}(t)$  с избранной степенью аппроксимационного полинома  $n_r$ .

Наконец, изменение значений усилия  $F_{Wx}$  описывается выражением:

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

где  $g$  – гравитационная постоянная;  $\varphi_\kappa$  – угол уклона профиля  $\kappa$ -го участка пути, по которому движется поезд.

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 для построения релевантной компьютерной

модели того же процесса движения, являющейся инструментом его исследования. Элементы компьютерной модели программно фиксированы в рамках входного языка системы компьютерной математики Mathematica и подразделяется на расчётную и графическую части. Первая из этих частей, функционально, решает прямую задачу динамики исследуемой системы, а вторая из частей – преобразует результаты расчётов в графическую форму. Исследование осуществлено путём проведения ряда экспериментов с указанной компьютерной моделью. Их результатом, в каждом из рассмотренных режимов движения, явились графики функциональных зависимостей от времени различных характеризующих и порождающих это движение величин. Было исследовано движение в следующих нестационарных режимах: набор скорости (от момента перехода в состояние электродинамической левитации до установившейся скорости движения); проход тоннеля; служебное и экстренное торможение. Ниже изложены и проанализированы некоторые результаты этого исследования.

Частота напряжения, питающего якорную обмотку ЛСД, всегда автоматически поддерживается [1] 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 могут использоваться 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

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

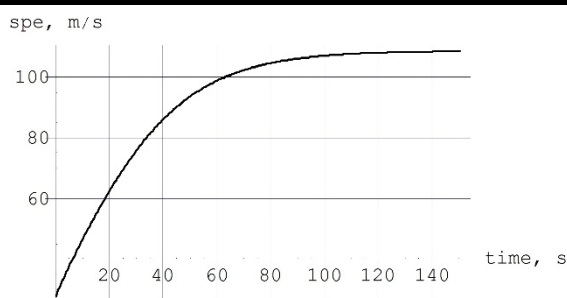
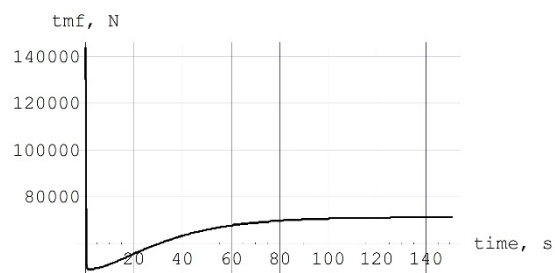
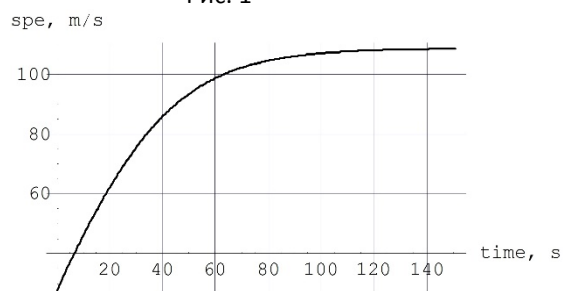
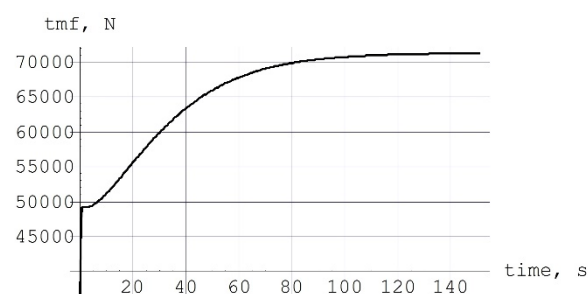
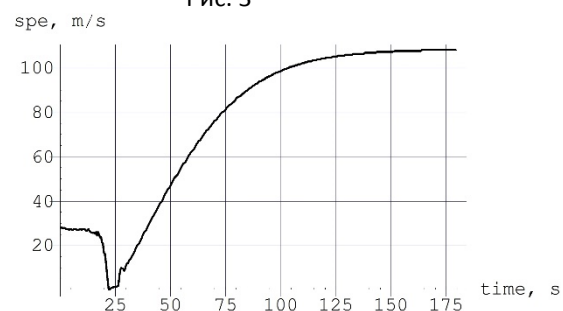
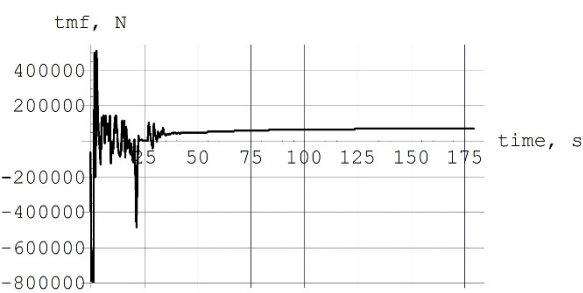
где  $U_a^*$  – предельное значение этой амплитуды;  $k_{vd}$  – коэффициент, определяющий интенсивность нарастания амплитуды напряжения.

В случае же фазового варианта регулирования 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  $\alpha_u$  – 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 – фазочастотному управлению. При этом, 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**

**Рис. 2**

**Рис. 3**

**Рис. 4**

**Рис. 5**

**Рис. 6**

Анализ результатов моделирования разгона поезда свидетельствует о неприемлемости как только частотного варианта управления – из-за высокого значения ускорения поезда, так и фазочастотного – вследствие возникающей высокочастотной осцилляции скорости МЛП. Кроме того, в последнем случае недопустимо высоки якорные токи ЛСД. Наиболее приемлем амплитудно-частотный вариант управления якорным напряжением.

Вход поезда в тоннель и выход из него приводят к перепадам аэродинамического сопротивления примерно на 30 % [5], 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 описывается соотношениями

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

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

где  $l_v$  – длина поезда;  $\xi_{ts}, \xi_{tf}$  – 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. Соблюдение этого условия достигается путём частотного, амплитудно-частотного, либо фазочастотного управления напряжением  $U_a$ . Требуемые для этого законы его изменения находились с использованием модели (2) (в которой  $F_{ADx}$  заменялось величиной  $F_{ADx}^*$ , вычисляемой согласно соотношениям (9), а  $\ddot{x}$  заменялось величиной  $\ddot{x}_{ts}$ , вычисляемой согласно (10)), а также модели динамики ЛСД [2].

Иллюстративные примеры результатов исследования движения МЛП в тоннеле приведены на рис. 7 – 12. Рис. 7 и 8 соответствуют управлению только частотой якорного напряжения, рис. 9 и 10 – амплитудно-частотному управлению этим напряжением, а рис. 11 и 12 – фазочастотному управлению. При этом на рис. 7, 9 и 11 приведены графики скорости экипажа, а на рис. 8, 10 и 12 – графики действующей на него тяговой силы ЛСД.

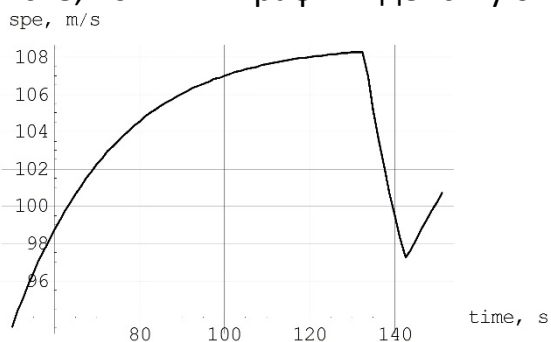


Рис. 7

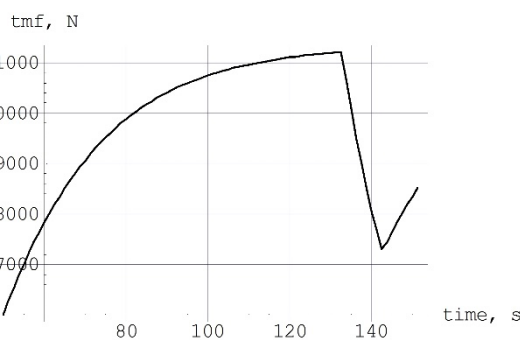


Рис. 8

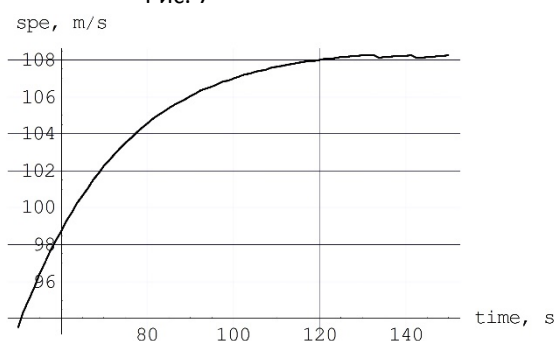


Рис. 9

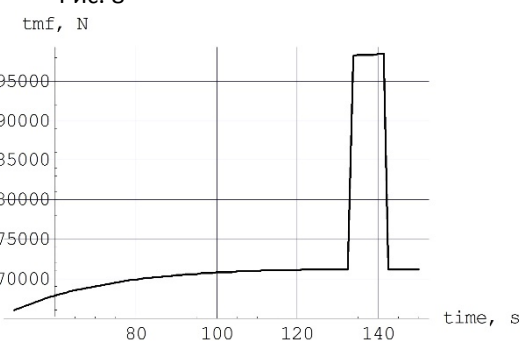
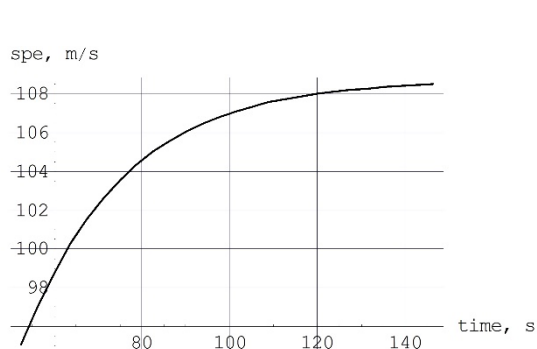
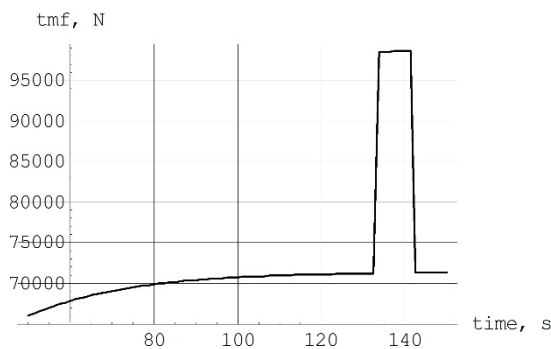


Рис. 10


**Рис. 11**

**Рис. 12**

Анализ результатов моделирования указанных трёх вариантов управления проходом поезда сквозь тоннель приводит к следующим 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 сколько-нибудь существенные колебания скорости и ускорения МЛП при проходе тоннеля. В тоже время, фазочастотный 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 взаимоиндукции, 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 фазочастотное 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 могут использоваться

для служебного торможения поезда. Для экстренного же его 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 фазочастотном. Наконец, рис. 17 и 18 соответствуют экстренному 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.

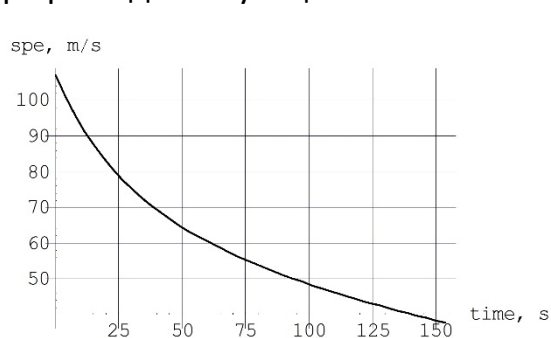


Рис. 13

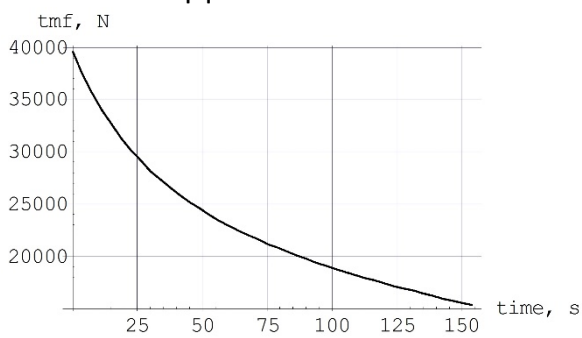


Рис. 14

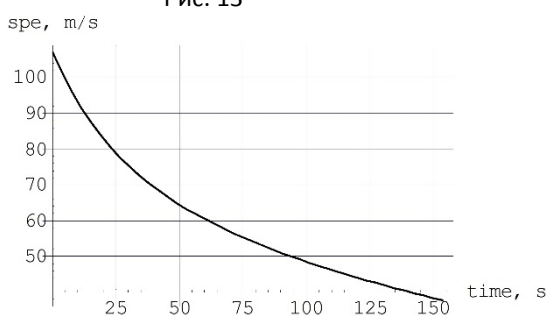


Рис. 15

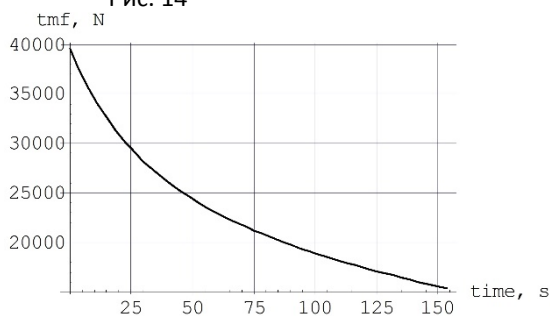


Рис. 16

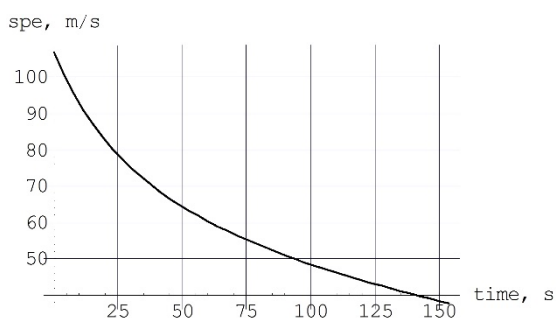


Рис. 17

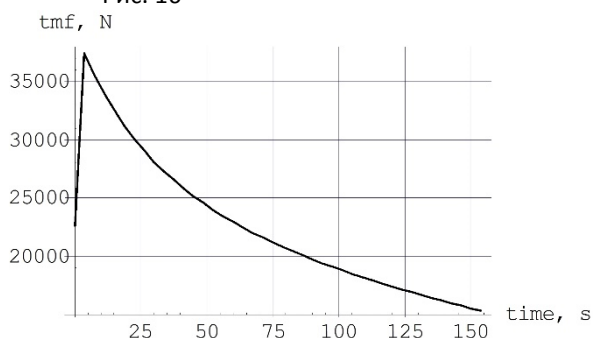


Рис. 18

Анализ результатов моделирования указанных тормозных режимов движения МЛП позволяет сделать следующие выводы. Рассмотренные режимы служебного торможения (при амплитудно-частотном и фазочастот-



ном 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.

**Выводы.** Путём компьютерного моделирования, изучена динамика магнитолевитирующего поезда, подверженного естественным возмущениям и управляемого линейным синхронным двигателем, в режимах разгона, прохода тоннеля, а также служебного и экстренного торможения. Анализ полученных результатов позволил оценить динамические качества поезда в рассмотренных нестационарных режимах движения, а также его нагруженность в их процессе. Этим решена задача настоящей части исследования.

## ЛИТЕРАТУРА

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. Поляков В. А. Модель процесса реализации тяговой силы двигателя магнитолевитирующего поезда / В. А. Поляков, Н. М. Хачапуридзе // Наука та прогрес транспорту. Вісн. Дніпропетр. нац. ун-ту залізн. трансп. ім. акад. В. Лазаряна – № 4(64) – Дніпропетровськ, 2016. – С. 55 - 62.
3. Лебедев А. А. Динамики полёта беспилотных летательных аппаратов / А. А. Лебедев, Л. С. Чернобровкин – М.: Машиностроение, 1973 – 616 с.
4. Дзензерский В. А. Устойчивость вертикальных колебаний в системе электродинамического подвеса с дискретной путевой структурой / В. А. Дзензерский, А. А. Зевин, Л. А. Филоненко // Прикл. механика – 1995 – Т. XXXI, №7. – С. 88 – 93.
5. Фудзиэ Дз. Наземный транспорт на подвесе на сверхпроводящих магнитах. II. Система подвеса на сверхпроводящих магнитах// Дэнгакуси (Япония). – 1991. – Т. 3. – С. 457 – 459.