

УДК 621.86.062

DOI: 10.30987/article_5d9317b331b985.47744040

А.В. Киреев, Н.В. Гребенников

МОДЕЛИРОВАНИЕ ГИБРИДНОГО ЭЛЕКТРОМАГНИТНОГО ПОДВЕСА ДЛЯ ВЫСОКОСКОРОСТНОГО ВАКУУМНОГО ТРАНСПОРТА

Представлен гибридный электромагнитный подвес для высокоскоростного вакуумного транспорта, где основная сила левитации создается за счет постоянных магнитов, а электромагнит осуществляет управление воздушным зазором. Разработана компьютерная модель в программном комплексе MATLAB/Simulink, которая позволяет осуществлять моделирование динамических режимов

работы системы. Проведено моделирование при разгоне транспортного средства до 1000 км/ч, с учетом неровностей пути.

Ключевые слова: электромагнитный подвес, высокоскоростной вакуумный транспорт, электромагнит, левитационная сила, левитация, воздушный зазор.

A. V. Kireev, N. V. Grebennikov

MODELING OF HYBRID ELECTROMAGNETIC HANGER FOR HIGH-SPEED VACUUM TRANSPORT MEANS

A hybrid electromagnetic hanger is presented for high-speed vacuum transport means where a main force of levitation is created at the expense of constant magnets and an electromagnet performs air gap control. There is developed a computer model in MATLAB/Simulink program complex which allows carrying out the dynamic mode simulation of a system

work. The simulation of transport means acceleration up to 1000 km/h taking into account road irregularities is carried out.

Key words: electromagnetic hanger, high-speed vacuum transport means, electromagnet, levitation force, levitation, air gap.

Введение

Концепция создания высокоскоростного наземного транспорта предусматривает отсутствие системы контакта «колесо - рельс». Вместо этого предлагаются различные системы левитации транспортного средства: воздушная подушка [1], электромагнитная левитация [2-4], электродинамическая левитация [5]. Для высокоскоростного вакуумного транспорта, движущегося в условиях вакуума (разреженной среды), одной из проблем является утилизация выделяющихся потерь энергии в виде тепла. В настоящей статье представлен гибридный электромагнитный подвес [6], где основное левитационное усилие создается за счет постоянных магнитов, а для управления воздушным зазором используется электромагнит [7], что позволяет снизить затраты энергии на создание левитационной силы, а следовательно, и количество потерь, выделяемых в виде тепла.

На высокоскоростном транспортном средстве (ВТС) располагается как минимум четыре гибридных левитационных

модуля, состоящих из U-образных электромагнитов, на торцах которых расположены постоянные магниты. Схема гибридного электромагнитного подвеса приведена на рис. 1.

Обмотки U-образного электромагнита получают питание от силового преобразователя (СП). Гибридный электромагнитный подвес является неустойчивой системой, и для управления им требуется быстродействующая система управления [8]. Система управления работает по данным, получаемым с датчиков тока ТА и воздушного зазора В_z. При отклонении от заданного значения воздушного зазора необходимо сразу же осуществлять корректирующее воздействие путем подачи напряжения на обмотки U-образного электромагнита. При этом чем больше величина отклонения, тем больше должно быть корректирующее воздействие. Наиболее качественное управление показала система, имеющая в своем составе промежуточное звено, формирующее квадратичную зави-

симость изменения воздушного зазора [9], которая является входным сигналом для ПИД-регулятора значения тока в обмотках U-образного электромагнита. В основе системы управления воздушным зазором лежит принцип «нулевой мощности» [10] в номинальном режиме работы [11]. Вели-

чина воздушного зазора изменяется в зависимости от внешней нагрузки таким образом, чтобы среднее значение тока управляющего электромагнита стремилось к нулю. Такой подход позволяет максимально минимизировать затраты энергии на создание левитационной силы.

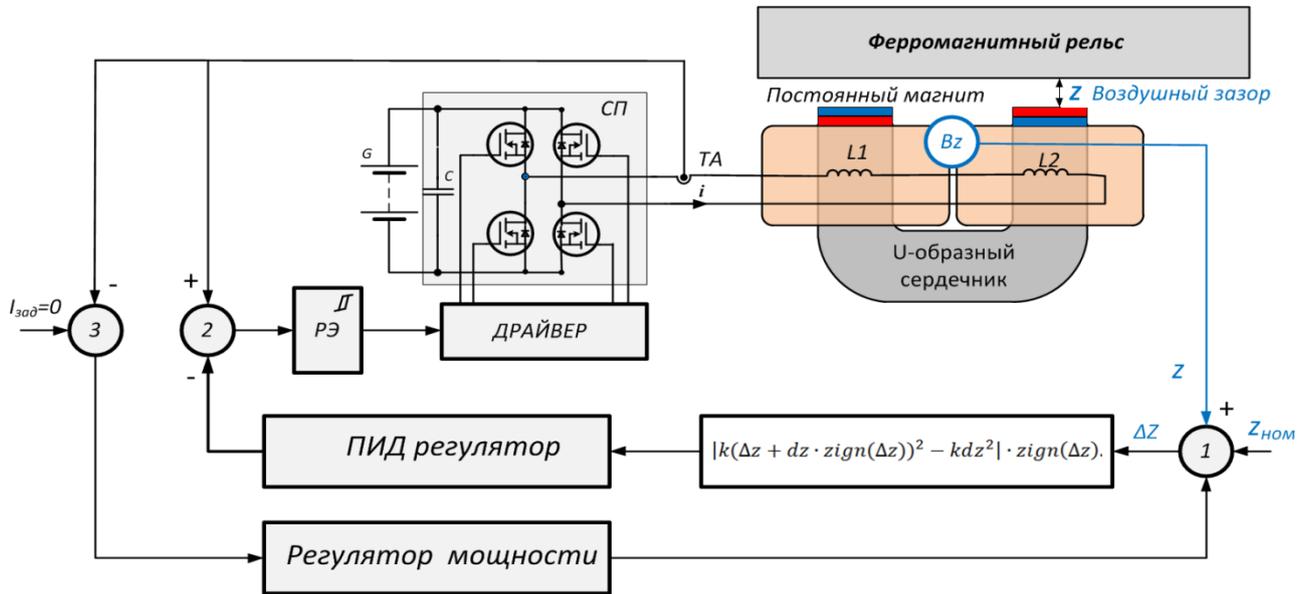


Рис. 1. Схема гибридного электромагнитного подвеса

Компьютерная модель гибридного электромагнитного подвеса

Для моделирования динамических режимов в гибридном электромагнитном подвесе целесообразно применить принципы построения компьютерной модели,

описанные в [12-14]. В основе модели лежит система дифференциальных уравнений, описывающая электрические и механические процессы в системе:

$$\begin{cases} v = R \cdot i + \frac{d\psi(i, z)}{dt} + \frac{d\Phi_{PM}(z)}{dt} w, \\ m \frac{d^2 z}{dt^2} = F_{EM}(i, z) + F_{PM}(z) - m \cdot g - f_z, \end{cases} \quad (1)$$

- где
- i – ток в обмотке;
 - z – воздушный зазор;
 - w – число витков обмотки;
 - ψ – потокосцепление обмотки;
 - Φ_{PM} – магнитный поток постоянного магнита;
 - g – ускорение свободного падения;
 - m – масса левитирующего объекта;
 - R – активное сопротивление обмотки;
 - v – напряжение питания обмотки;
 - F_{EM} – электромагнитная сила;
 - F_{PM} – сила постоянного магнита;
 - f_z – возмущающая сила.

Необходимой информацией для компьютерной модели являются результаты электромагнитного расчета (зависимости потокосцепления $\psi(i, z)$, электромагнитной силы $F_{EM}(i, z)$ в функции тока и воздушного зазора, силы притяжения постоянного магнита в функции воздушного зазора $F_{PM}(z)$), выполненного методом конечных элементов (FEMM). Расчет методом конечных элементов выполняем для модуля гибридного электромагнитного подвеса, т.е. сразу рассматриваем сборку U-образного электромагнита и постоянных магнитов. В результате расчета сразу получаем зависимость левитационной силы гибридного электромагнитного модуля

$F_L(i, z)$ в функции тока и воздушного зазора. Такой подход позволяет упростить систему (1) и представить её в следующем виде:

$$\begin{cases} v = R \cdot i + \frac{d\psi(i, z)}{dt}, \\ m \frac{d^2 z}{dt^2} = F_L(i, z) - m \cdot g - f_z. \end{cases} \quad (2)$$

Для проведения исследований разработан компьютерная модель системы гибридного электромагнитного подвеса в программном комплексе ATLAB/Simulink (рис. 2).

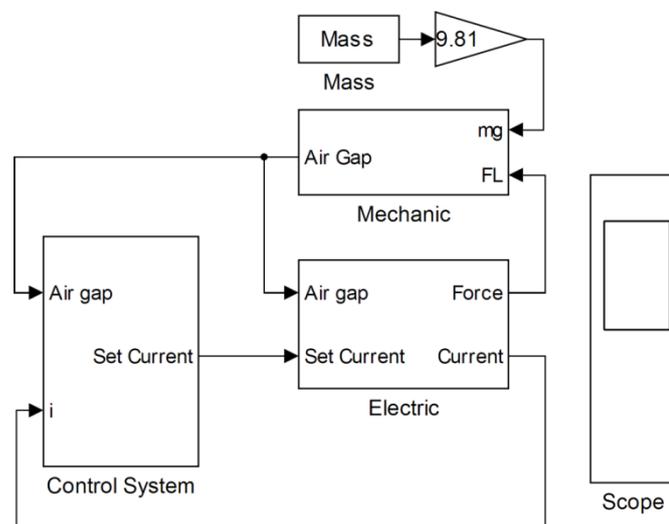


Рис. 2. Компьютерная модель системы подвеса

Компьютерная модель состоит из следующих основных частей:

1. Electric – блок решения уравнения электрических процессов, структура которого представлена на рис. 3.

2. Mechanic – блок решения уравнения механических процессов, структура которого представлена на рис. 5.

3. Control System – блок системы управления, структура которого представлена на рис. 6.

Блок Electric. Блок Electric (рис. 3) предназначен для решения дифференциального уравнения электрических процессов в U-образном электромагните.

Основным элементом является блок Table Current, который содержит табличные данные зависимости тока обмоток

электромагнита в функции воздушного зазора и потокосцепления $i = f(z, \psi)$. Эта зависимость получается путем обработки результатов расчета 3D-модели гибридного электромагнитного подвеса, и формируется зависимость вида $\psi = f(i, z)$. Элемент Rs учитывает падение напряжения на активном сопротивлении обмоток электромагнита. Управление подачей напряжения к обмоткам электромагнита осуществляется блоком Switch. Для поддержания заданного тока используется блок Relay, который формирует гистерезис при коммутации ключа Switch. Допустимое значение амплитуды гистерезиса определяется возможностями элементной базы полупроводниковых приборов, используемых в схеме питания гибридного электро-

магнитного подвеса. Чем ниже амплитуда гистерезиса, тем более точно осуществляется регулирование и снижается действующее значение тока в обмотках электромагнита, но при этом увеличивается частота коммутаций полупроводниковых ключей. По полученному значению тока опре-

деляется левитационная сила. Для этого предназначен блок Table Force, который содержит табличные данные зависимости левитационной силы гибридного электромагнитного модуля в функции воздушного зазора и тока в обмотках $F_L(i, z)$ (рис. 4).

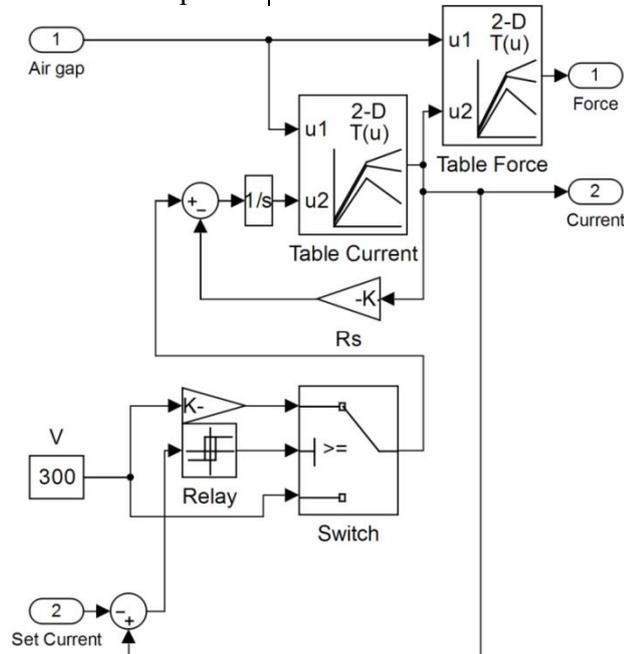


Рис. 3. Структура блока Electric

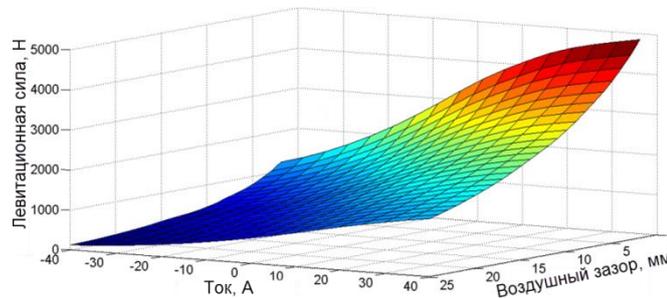


Рис. 4. Зависимость левитационной силы $F_L(i, z)$

Блок Mechanic. Блок Mechanic (рис. 5) предназначен для решения дифференциального уравнения вертикального движения транспортного средства. Дополнительно здесь имеется блок определения сил реакций (Reaction force), который предназначен для ограничения перемещения объекта в области допустимого воздушного зазора. Ограничение происходит как сверху (в случае уменьшения воздушного зазора до нуля), так и снизу (в случае увеличения воздушного зазора до максимального заданного значения). Использование данного блока позволяет приблизить

модель к реальному объекту и сократить время на отладку алгоритмов управления.

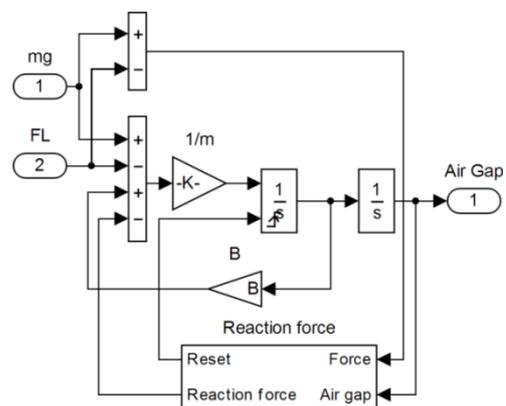


Рис. 5. Структура блока Mechanic

Блок Control System. Блок Control System (рис. 6) построен в соответствии со схемой гибридного электромагнитного подвеса (рис. 1) и состоит из быстродействующего регулятора (PID Controller 1) тока в обмотках электромагнита в зависимости от квадратичной величины отклонения воздушного зазора от заданного значения. Второй регулятор (PID Controller 2) является более медленным и предназначен для корректировки задания воздушного зазора с целью минимизации среднего значения тока в обмотках электромагнита.

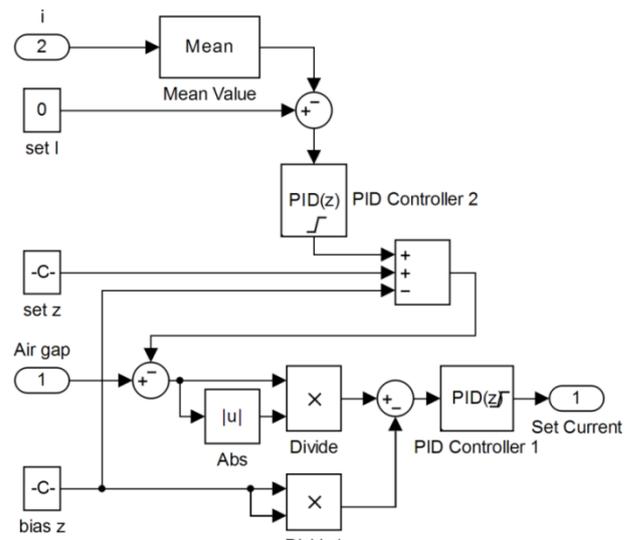


Рис. 6. Структура блока Control System

Результаты моделирования

На первом этапе исследований было выполнено моделирование устойчивости системы при резком изменении вертикальной нагрузки (сброс/наброс). Исследования переходных процессов проводились при скачкообразном изменении вертикальной нагрузки за счет изменения массы, приходящейся на один гибридный левитационный модуль, на 50 %. В момент вре-

мени $t = 5$ с происходит уменьшение нагрузки. В момент времени $t = 10$ с происходит увеличение нагрузки. На рис. 7 и 8 приведены осциллограммы левитационной силы (Levitation force), воздушного зазора (Air gap), тока в управляющей обмотке (Current), потребляемой мощности (Power) при переходном процессе.

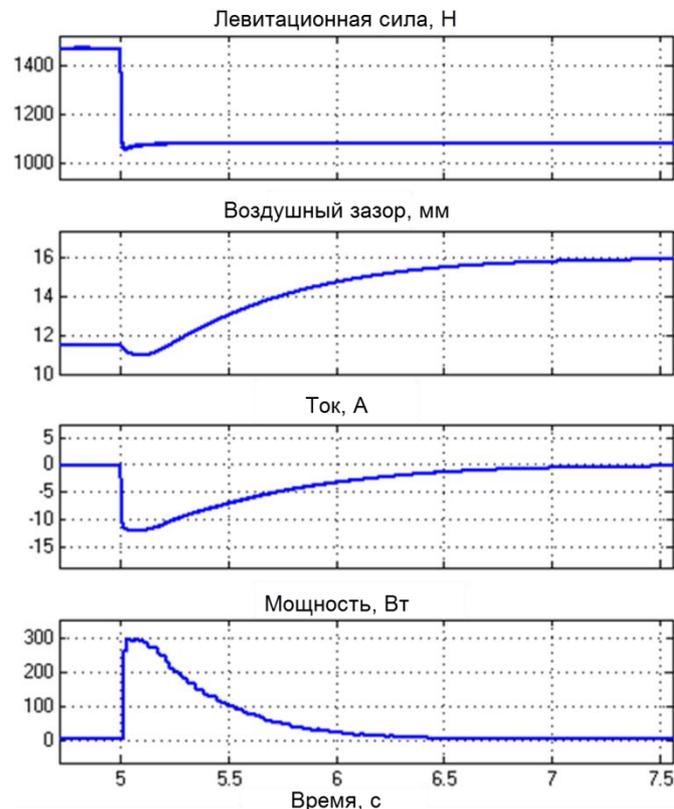


Рис. 7. Осциллограммы процессов при уменьшении полезной нагрузки на 50 %

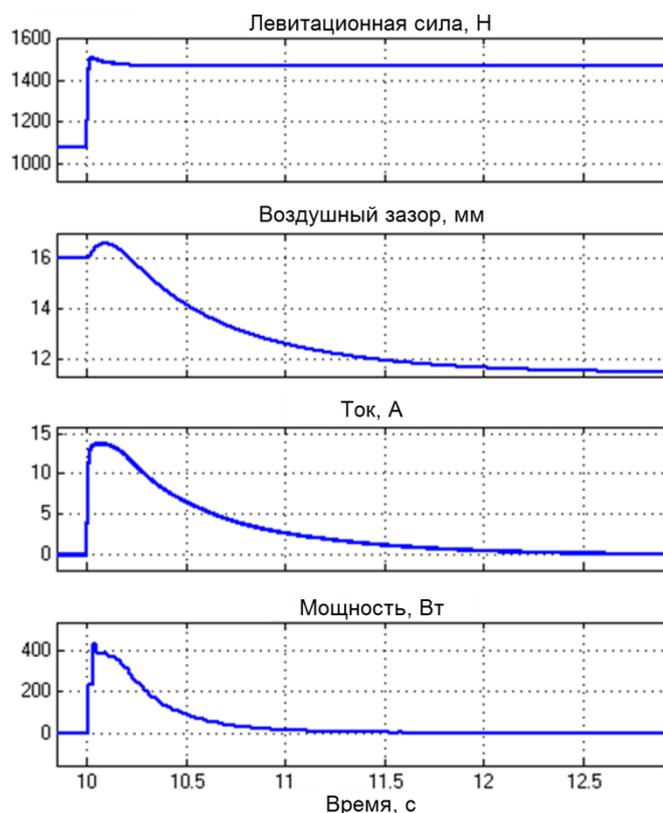


Рис. 8. Осциллограммы процессов при увеличении полезной нагрузки на 50 %

По результатам компьютерного моделирования видно, что предлагаемая система гибридного электромагнитного подвеса и разработанная система управления успевает своевременно отработать изменение нагрузки, приходящейся на левитационный модуль. На стабилизацию переходного процесса после резкого изменения нагрузки требуется 2,5 с. Наибольшее энергопотребление возникает в момент резкого изменения нагрузки. Пиковая мощность, затрачиваемая на стабилизацию, растет с увеличением величины скачкообразного изменения нагрузки. Энергопотребление при набросе нагрузки больше, чем при снятии.

Вторым этапом исследований стало моделирование процесса левитации в движении с учетом возмущений со стороны путевой структуры. Моделирование процесса левитации в движении проводилось при различных нагрузках, приходящихся на один модуль. В настоящей статье результаты моделирования представлены для полной нагрузки, равной 150 кг, при имитации возмущений со стороны путевой структуры. Неровности пути, обусловленные провисанием путевой полотна на

опорах, принимаются равными 4 мм на 30 м пути. Начальный воздушный зазор равен 25 мм. В течение первых двух секунд происходит подъем транспортного средства и устанавливается номинальный рабочий зазор, при котором среднее значение тока стремится к нулю. В момент времени 2 с начинается разгон ВТС. Для моделирования гибридного электромагнитного подвеса принято ускорение разгона ВТС, равное $2,5 \text{ м/с}^2$. Принято, что рельсы подвеса длиной 30 м провисают на 4 мм, что представлено синусоидальным сигналом (отклонение путевой структуры) амплитудой 2 мм. Частота изменения воздушного зазора увеличивается пропорционально скорости.

На рис. 9 и 10 приведены результаты компьютерного моделирования. Осциллограммы представлены средствами визуализации системы программного комплекса MATLAB. На рис. 9, 10 показаны следующие осциллограммы (сверху вниз):

- осциллограмма изменения скорости движения;
- осциллограмма синусоидального сигнала, моделирующего провисание путевой структуры;

- осциллограмма изменения левитационной силы;
- осциллограмма изменения воздушного зазора;
- осциллограмма изменения положения транспортного средства в вертикальной плоскости;
- осциллограмма изменения тока в управляющих обмотках системы магнитного подвеса;

- осциллограмма изменения потребляемой мощности.

На приведенных осциллограммах интервал времени $t = 0 \dots 2$ с соответствует времени перехода системы в режим левитации, интервал времени $t = 2 \dots 120$ с соответствует времени разгона транспортного средства с постоянным ускорением $a = 2,5$ м/с².

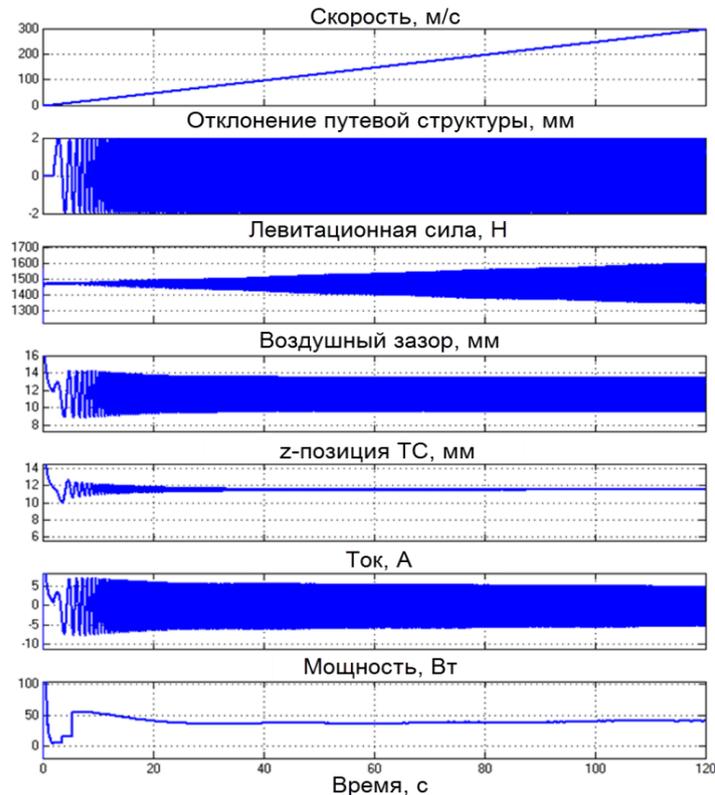


Рис. 9. Осциллограммы процессов в тягово-левитационной системе в режиме разгона при учете неровностей путевой структуры

По результатам компьютерного моделирования получено, что амплитудное значение тока гибридного электромагнитного подвеса составляет 5 А. При подъеме транспортного средства потребляемая мощность одного гибридного электромагнита составила 1600 Вт (на рис. 9 не видно), а при движении мощность достигала порядка 50 Вт на один гибридный электромагнит. Положение транспортного средства в пространстве вдоль оси z практически не изменяется, что обусловлено инертностью системы и фильтрацией сигнала зазора в системе управления с пере-

менной частотой, зависящей от скорости. На рис. 9, 10 видно, что величина воздушного зазора меняется так же, как и отклонение рельсов. При увеличении скорости величина воздушного зазора изменяется практически в соответствии с заданным внешним воздействием, при этом изменения вертикального положения ВТС практически не происходит (нет тряски ВТС). Величина амплитуды перемещения ВТС (без применения амортизаторов и гасителей колебаний) в пространстве при скорости 1000 км/ч составляет 0,06 мм.

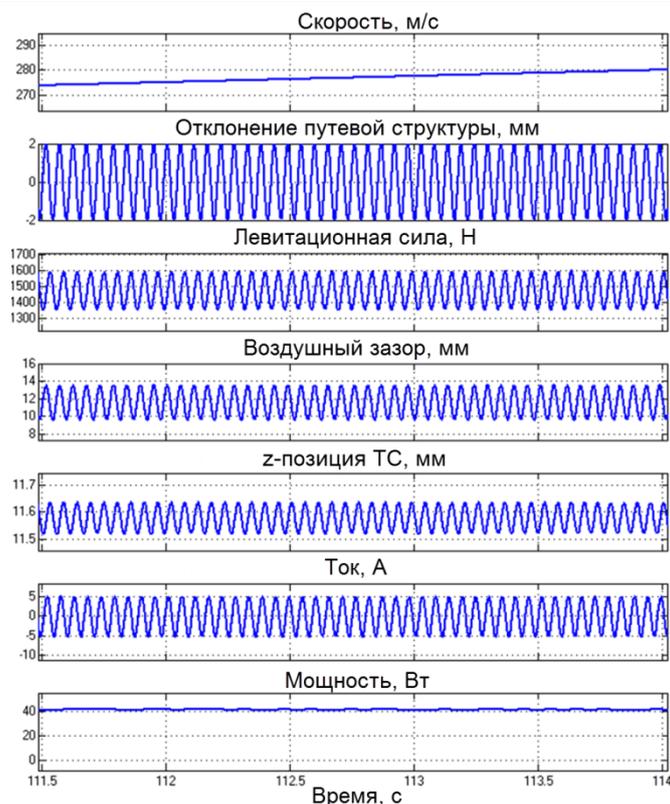


Рис. 10. Осциллограммы процессов в тягово-левитационной системе в режиме разгона при учете неровностей путевой структуры (увеличенный фрагмент)

Третьим этапом исследований стало моделирование процесса левитации в движении, с учетом возмущений со стороны путевой структуры, при преодолении подъема. Моделирование переходного процесса, возникающего при переходе с горизонтального участка пути на подъем с заданным уклоном и дальнейшем движении по подъему, осуществляется для скорости линейного перемещения ВТС 278 м/с и величины уклона (подъема) 40 %. На рис. 11 приведены осциллограммы процессов при преодолении подъема.

Из осциллограмм следует, что на интервале времени от 5 до 12 с происходит плавный переход с горизонтального участка пути на подъем 40 %, длина переходного участка составляет 3336 м. Наблюдается колебательный характер изменения вели-

чины воздушного зазора с амплитудой отклонения относительно среднего значения, составляющей 20 %, и частотой около 10 Гц. Колебательный характер изменения воздушного зазора обусловлен отслеживанием неровностей пути. Наличие переходного участка и движение по подъёму 40 % практически не отражается на общей картине процессов, не учитывающих неровности пути. Пиковое потребление мощности наблюдается в начале переходного участка и его окончании. На участке 40 % подъема мощность, требуемая системой левитации при движении по подъему, практически равна мощности, потребляемой системой левитации на горизонтальном участке (с учетом возмущений со стороны путевой структуры).

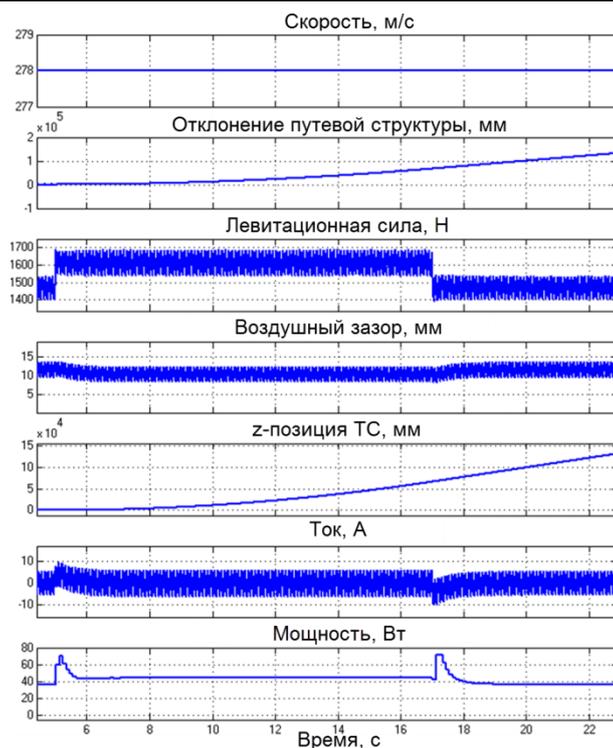


Рис. 11. Осциллограммы процессов в тягово-левитационной системе при преодолении подъема

Заключение

Итак, рассмотрен гибридный электромагнитный подвес для высокоскоростного транспортного средства. Совместное применение электромагнита и постоянных магнитов для левитации позволяет добиться значительного снижения энергетических затрат для обеспечения левитации транспортного средства. Сила левитации создается за счет постоянных магнитов, а электромагнит осуществляет управление воздушным зазором.

По результатам проведенного моделирования гибридного электромагнитного подвеса можно сделать следующие выводы:

1. Величина левитационного зазора зависит от величины вертикальной нагрузки и регулируется в пределах от 10 до 16 мм.
2. Максимальное значение тока управляющих обмоток левитационных модулей не превышает 15 А. Такой ток необ-

ходим кратковременно, только в переходных режимах (подъем ВТС с максимальной нагрузкой).

3. В установившихся режимах левитации значение тока управляющих обмоток левитационных модулей стремится к нулю.

4. Гибридный электромагнитный подвес обеспечивает стабилизацию установившегося (в зависимости от нагрузки) значения левитационного зазора на уровне $\pm 2,5\%$ во всех режимах движения.

5. Амплитуда колебаний левитационного зазора при внешних возмущающих воздействиях (сброс/наброс нагрузки) не превышает $\pm 10\%$ от установившегося значения.

6. Максимальное значение электрических потерь в модуле гибридного электромагнитного подвеса ВТС в установившихся режимах не превышает 50 Вт.

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. Hyperloop Alpha. - URL: http://www.spacex.com/sites/spacex/files/hyperloop_alpha-20130812.pdf (дата обращения: 31.07.2019).

2. The website of the Evacuated Tube Transport Technology. - URL: <http://et3.eu/et3-online-education.html> (дата обращения: 31.07.2019).

3. Kireev, A.V. Potential Development of Vehicle Traction Levitation Systems with Magnetic Suspension / A.V. Kireev, N.M. Kozhemyaka, G.N. Kononov // International Journal of Power Electronics and Drive Systems (IJPEDS). - 2015. - № 6 (1). - P. 26-31.
4. Kireev, A.V. Starting Operating Mode of the Combined Traction Levitation System of the Vehicle Equipped with Magnetic Suspension / A.V. Kireev, G.N. Kononov, A.V. Lebedev // International Journal of Power Electronics and Drive Systems (IJPEDS). - 2017. - № 8 (1). - P. 176-183.
5. The website of Hyperloop One. - URL: <https://hyperloop-one.com/blog/how-and-why-were-levitating> (дата обращения: 31.07.2019).
6. Jo, Jeong-Min. Design of the Miniature Maglev using Hybrid Magnets in Magnetic Levitation System / Jeong-Min Jo, Young-Jae Han, Chang-Young Lee // International Journal of Mathematical, Computational, Physical, Electrical and Computer Engineering. - 2012. - № 6 (2). - P. 195-198.
7. Jo, Jeong-Min. Design and control of the miniature maglev using electromagnets and permanent magnets in magnetic levitation system / Jeong-Min Jo [et al.] // Control Automation and Systems (ICCAS). - 2010.
8. Grebennikov, N. Electromagnetic Suspension used for High-Speed Vacuum Transport / N. Grebennikov, A. Kireev // International Journal of Applied Engineering Research. - 2017. - № 12 (12). - P. 3293-3297.
9. Grebennikov, N. Control System Designed for Electromagnetic Suspension of High-Speed Vacuum Transportation / N. Grebennikov, A. Kireev, A. Lebedev // International Journal of Applied Engineering Research. - 2017. - № 12(16). - P. 5485-5487.
10. Tzeng, Yeou-Kuang. Optimal design of the electromagnetic levitation with permanent and electro magnets / Yeou-Kuang Tzeng, T.C. Wang // IEEE Transactions on Magnetics. - 1994. - № 30 (6). - P. 4731-4733.
11. Homen de Mello, Orlando. Zero power controle in the single axis controlled magnetic bearing / Orlando Homen de Mello, Isaias da Silva, Fernando Antonio Camargo, José Roberto Cardoso, Oswaldo Horikawa // ABCM Symposium Series in Mechatronics. - 2012. - № 5. - P. 39-48.
12. Grebennikov, N. Computer modeling of combined traction levitation system equipped with linear switched reluctance motors / N. Grebennikov, A. Kireev, G. Kononov // Journal of Engineering and Applied Sciences. - 2015. - № 10 (8-12). - P. 247-251.
13. Grebennikov, N. Mathematical Model of Linear Switched Reluctance Motor with Mutual Inductance Consideration / N. Grebennikov, A. Kireev, N. Kozhemyaka // International Journal of Power Electronics and Drive Systems (IJPEDS). - 2015. - № 6 (1). - P. 26-31.
14. Flankl, M. Scaling laws for electrodynamic suspension in high-speed transportation / Michael Flankl, Tobias Wellerdieck, Arda Tüysüz, Johann W. Kolar // IET Electric Power Applications. - 2018. - № 12 (3). - P. 357-364.
1. Hyperloop Alpha. - URL: http://www.spacex.com/sites/spacex/files/hyperloop_alpha-20130812.pdf (дата обращения: 31.07.2019).
2. The website of the Evacuated Tube Transport Technology. - URL: <http://et3.eu/et3-online-education.html> (дата обращения: 31.07.2019).
3. Kireev, A.V. Potential Development of Vehicle Traction Levitation Systems with Magnetic Suspension / A.V. Kireev, N.M. Kozhemyaka, G.N. Kononov // International Journal of Power Electronics and Drive Systems (IJPEDS). - 2015. - № 6 (1). - P. 26-31.
4. Kireev, A.V. Starting Operating Mode of the Combined Traction Levitation System of the Vehicle Equipped with Magnetic Suspension / A.V. Kireev, G.N. Kononov, A.V. Lebedev // International Journal of Power Electronics and Drive Systems (IJPEDS). - 2017. - № 8 (1). - P. 176-183.
5. The website of Hyperloop One. - URL: <https://hyperloop-one.com/blog/how-and-why-were-levitating> (дата обращения: 31.07.2019).
6. Jo, Jeong-Min. Design of the Miniature Maglev using Hybrid Magnets in Magnetic Levitation System / Jeong-Min Jo, Young-Jae Han, Chang-Young Lee // International Journal of Mathematical, Computational, Physical, Electrical and Computer Engineering. - 2012. - № 6 (2). - P. 195-198.
7. Jo, Jeong-Min. Design and control of the miniature maglev using electromagnets and permanent magnets in magnetic levitation system / Jeong-Min Jo [et al.] // Control Automation and Systems (ICCAS). - 2010.
8. Grebennikov, N. Electromagnetic Suspension used for High-Speed Vacuum Transport / N. Grebennikov, A. Kireev // International Journal of Applied Engineering Research. - 2017. - № 12 (12). - P. 3293-3297.
9. Grebennikov, N. Control System Designed for Electromagnetic Suspension of High-Speed Vacuum Transportation / N. Grebennikov, A. Kireev, A. Lebedev // International Journal of Applied Engineering Research. - 2017. - № 12(16). - P. 5485-5487.
10. Tzeng, Yeou-Kuang. Optimal design of the electromagnetic levitation with permanent and electro magnets / Yeou-Kuang Tzeng, T.C. Wang // IEEE Transactions on Magnetics. - 1994. - № 30 (6). - P. 4731-4733.
11. Homen de Mello, Orlando. Zero power controle in the single axis controlled magnetic bearing / Orlando Homen de Mello, Isaias da Silva, Fernando Antonio Camargo, José Roberto Cardoso, Oswaldo

- Horikawa // ABCM Symposium Series in Mechatronics. - 2012. - № 5. - P. 39-48.
12. Grebennikov, N. Computer modeling of combined traction levitation system equipped with linear switched reluctance motors / N. Grebennikov, A. Kireev, G. Kononov // Journal of Engineering and Applied Sciences. - 2015. - № 10 (8-12). - P. 247-251.
13. Grebennikov, N. Mathematical Model of Linear Switched Reluctance Motor with Mutual Induct-

ance Consideration / N. Grebennikov, A. Kireev, N. Kozhemyaka // International Journal of Power Electronics and Drive Systems (IJPEDS). - 2015. - № 6 (1). - P. 26-31.

14. Flankl, M. Scaling laws for electrodynamic suspension in high-speed transportation / Michael Flankl, Tobias Wellerdieck, Arda Tüysüz, Johann W. Kolar // IET Electric Power Applications. - 2018. - № 12 (3). - P. 357-364.

Ссылка для цитирования:

Киреев, А.В. Моделирование гибридного электромагнитного подвеса для высокоскоростного вакуумного транспорта / А.В. Киреев, Н.В. Гребенников // Вестник Брянского государственного технического университета. – 2019. – № 9. – С.58 – 68. DOI: 10.30987/article_5d9317b331b985.47744040.

Статья поступила в редакцию 6.09.19

Рецензент: д.т.н., профессор Брянского государственного технического университета
член редсовета журнала «Вестник БГТУ»

Кобищанов В.В.

Статья принята к публикации 16. 09. 19.

Сведения об авторах:

Киреев Александр Владимирович, к.т.н., доцент кафедры «Энергоснабжение и электропривод» Южно-Российского государственного технического университета, ген. директор ЗАО «Научно-технический центр «ПРИВОД-Н», e-mail: akireev@privod-n.ru.

Гребенников Николай Вячеславович, к.т.н., доцент кафедры «Тяговый подвижной состав» Ростовского государственного университета путей сообщения, специалист по расчету электрических машин ЗАО «Научно-технический центр «ПРИВОД-Н», e-mail: grebennikovnv@mail.ru.

Kireev Alexander Vladimirovich, Can. Sc. Tech., Assistant Prof. of the Dep. “Power Supply and Electric Drive”, South-Russian State Technical University, Director General of CC “PRIVOD-N Scientific-Technical Center”, e-mail: akireev@privod-n.ru.

Grebennikov Nikolay Vyacheslavovich, Can. Sc. Tech., Assistant Prof. of the Dep. “Traction Rolling-Stock”, Rostov State University of Communications, Expert for Electric Machinery Computation, CC “PRIVOD-N”, e-mail: grebennikovnv@mail.ru.