

Рубрика 2. НАУЧНЫЕ И ПРАКТИЧЕСКИЕ РАЗРАБОТКИ

Направление – Электротехнология и электрофизика

УДК 629.439:621.313.282:621.318.1/.3

DOI 10.17816/transsyst20228243-54

*Памяти профессора Юрия Фёдоровича Антонова*

© В.М. Амосков<sup>1</sup>, Д.Н. Арсланова<sup>1</sup>, А.А. Белов<sup>1</sup>, А.В. Белов<sup>1</sup>,  
В.Н. Васильев<sup>1</sup>, В.В. Деомидов<sup>1</sup>, М.В. Капаркова<sup>1</sup>, В.П. Кухтин<sup>1</sup>,  
Е.А. Ламзин<sup>1</sup>, М.С. Ларионов<sup>1</sup>, И.А. Морозов<sup>2</sup>, А.Н. Неженцев<sup>1</sup>,  
Д.А. Овсянников<sup>3</sup>, Д.А. Овсянников (мл.), И.Ю. Родин<sup>1</sup>,  
С.А. Смирнов<sup>5</sup>, О.Ю. Смирнова<sup>5</sup>, С.Е. Сычевский<sup>3,1</sup>,  
Н.А. Шатиль<sup>1</sup>, А.А. Фирсов<sup>1</sup>, Т.А. Фирсова<sup>1</sup>

<sup>1</sup> АО «Научно-исследовательский институт электрофизической аппаратуры им. Д. В. Ефремова»

<sup>2</sup> НАО НПЦ «ТИТ»

<sup>3</sup> Санкт-Петербургский государственный университет

<sup>4</sup> Санкт-Петербургский Государственный Университет промышленных технологий и дизайна

<sup>5</sup> Петербургский государственный университет путей сообщения Императора Александра I (Санкт-Петербург, Россия)

## ГИБРИДНЫЙ И ТРАДИЦИОННЫЙ ЭЛЕКТРОМАГНИТЫ ДЛЯ ЦЕЛЕЙ МАГНИТНОГО ПОДВЕШИВАНИЯ: СОПОСТАВИТЕЛЬНЫЙ АНАЛИЗ

**Цель:** сравнение гибридных электромагнитов (ГЭМ) и традиционных электромагнитов (ЭМ) левитационного подвеса.

**Методы:** Сопоставление проводится на базе вычислительного эксперимента для варианта ГЭМ, достоверность численной модели которого подтверждается верификацией с использованием адекватной натурной (физической) модели.

**Результаты:** Конструкция гибридных электромагнитов (ГЭМ) совмещает в качестве источников поля в единой магнитной цепи токовые катушки и постоянные магниты. Сравнение продемонстрировало семикратное снижение энергопотребление для ГЭМ по сравнению с ЭМ, причём вес гибридного магнита в два раза меньше.

**Заключение:** Подтверждена правильность выбранной концепции построения магнитной системы предложенного варианта магнитолевитационного подвеса.

**Ключевые слова:** магнитная левитация, гибридные электромагниты, постоянные магниты, электромагниты, подъемная сила, математическое моделирование, натурный макет, физические измерения.

Rubric 2. SCIENTIFIC AND PRACTICAL DEVELOPMENTS

Field – Electrotechnology and Electrophysics

© V.M. Amoskov<sup>1</sup>, D.N. Arslanova<sup>1</sup>, A.A. Belov<sup>1</sup>, V.N. Vasiliev<sup>1</sup>,  
V.V. Deomidov<sup>1</sup>, M.V. Kaparkova<sup>1</sup>, V.P. Kukhtin<sup>1</sup>, E.A. Lamzin<sup>1</sup>,  
M.S. Larionov<sup>1</sup>, I.A. Morozov<sup>2</sup>, A.N. Nezhentzev<sup>1</sup>, D.A. Ovsyannikov<sup>3</sup>,  
D.A. Ovsyannikov (Jr)<sup>4,1</sup>, I.Yu. Rodin<sup>1</sup>, S.A. Smirnov<sup>5</sup>, O.Yu. Smirnova<sup>5</sup>,  
S.E. Sytchevsky<sup>3,1</sup>, N.A. Shatil<sup>1</sup>, A.A. Firsov<sup>1</sup>, T.A. Firsova<sup>1</sup>

<sup>1</sup> Joint Stock Company “NIIIEFA”

<sup>2</sup> TIT RDC PJSC

<sup>3</sup> St. Petersburg State University

<sup>4</sup> St. Petersburg State University of Industrial Technologies and Design

<sup>5</sup> Emperor Alexander I St. Petersburg State Transport University  
(St. Petersburg, Russia)

## COMPARATIVE ANALYSIS OF PERFORMANCE OF HYBRID AND PURE EM SUSPENSIONS

**Aim:** The aim of the study is a comparative representation of a hybrid EM suspension (HEMS) for maglev transport and a pure EM configuration.

**Methods:** Several designs have been numerically investigated and compared to conventional EMS. The numerical model has been validated with magnetic measurements on the experimental set-up.

**Results:** The HEMS implies a combination of electromagnets (EM) and permanent magnets (PM) in a common magnetic circuit. The magnets synergy of HEMS has been demonstrated that leads to sufficient reduction in energy consumption and weight as compared to a conventional EMS.

**Conclusions:** A desired performance of HEMS has been achieved. Efficiency of the design solutions has been verified numerically and experimentally.

**Key words:** maglev, hybrid suspension, permanent magnet, electromagnet, lifting force, numerical model, experimental set-up, measurement.

## ВВЕДЕНИЕ

Анализ систем электромагнитных подвесов (ЭМП) [1] указывает на ряд преимуществ применения в них так называемых «гибридных электромагнитов» (ГЭМ) [2–10] по сравнению с электромагнитами «традиционного» исполнения (ЭМ). В АО «НИИЭФА» испытан прототип гибридного магнита [11, 12] из разработанной линейки ГЭМ, отличающихся грузоподъемностью и, соответственно, размерами.

Адаптированная для численного моделирования таких систем вычислительная технология [13, 2] позволяет конструировать и создавать подвесы любой требуемой на практике грузоподъемности.

Для изготовленного прототипа варианта серийного ГЭМ (детальнее см. параметры в [14] и в Табл. 1, заимствованной из [14]) был выполнен комплекс работ на сертифицированном стенде АО «НИИЭФА» [14] и любезно предоставленной АО ИНЦ «ТЕМП» испытательной установке [15].

Таблица 1. Параметры гибридного электромагнита АО «НИИЭФА»

Сечение токовой катушки, мм <sup>2</sup>	1450
Коэффициент заполнения проводника медью	0,8
Максимальная рассеиваемая мощность, Вт	240
Проводник марки ПЭЭИП2-155, мм <sup>2</sup>	1,12x3,55 (1,28x3,71 в изол.)
Количество витков проводника в катушке	306
Максимальный ток (стационарный), А	10
Максимальный ток (кратковременный), А	15
Индуктивность (при зазоре 5 мм), мГн	150 (I=13 А) и 300 (I=0 А)
Индуктивность (при зазоре ∞), мГн	180 (I=0 А)
Собственная индуктивность катушки, мГн	25
Сопротивление обмотки, Ом	2
Марка постоянных Nd-Fe-B магнитов	N48SH
Размеры Д×Ш×В, мм	650×130×89
Вес, Н	450

Измерения проводились с целью:

- определения зависимости подъемной силы магнита от величины тока в катушке при различных величинах задаваемого левитационного зазора (воздушного промежутка между установленной на путевой структуре ферромагнитной направляющей и поверхностью полюсов ГЭМ);
- сопоставления измеренной зависимости подъемно силы с данными вычислительного эксперимента, полученными на разработанной детальной трехмерной (3D) математической модели магнита подвеса.

Сравнение данных продемонстрировало приемлемую для практических целей точность как числовой, так физической моделей. А дополнительные перекрестные проверки прототипа на двух измерительных установках подтверждают достоверность реализованной методики измерения. Таким образом выполнена верификация вычислительной технологии для анализа магнитов, специфичных для целей магнитолевитационных подвесов.

## СРАВНЕНИЕ ГЭМ И ЭМ ЛЕВИТАЦИОННОГО ПОДВЕСА

Следует подчеркнуть, что методически величина подъемной силы моделируется путем интегрирования плотности пондеромоторных сил по объему исследуемой системы. Распределение сил получается в результате

использования тензора натяжений Максвелла, компоненты которого, в свою очередь, вычисляются на основе расчета компонент векторов магнитной индукции и напряженности магнитного поля. Таким образом, анализ результатов расчетов и измерения сил позволяет сделать заключение о достоверности моделирования как полей, так и сил в системах магнитолевитационных подвесов. Этот вывод, впрочем, соответствует аналогичным выводам, сделанным при анализе моделей электрофизических установок других типов (ускорители заряженных частиц и системы их транспортировки, термоядерные реакторы с магнитным удержанием плазмы, синхронные электродвигатели и т.п.).

На Рис. 1 приведено характерное распределение магнитного поля в поперечном сечении магнита вблизи центральной части.

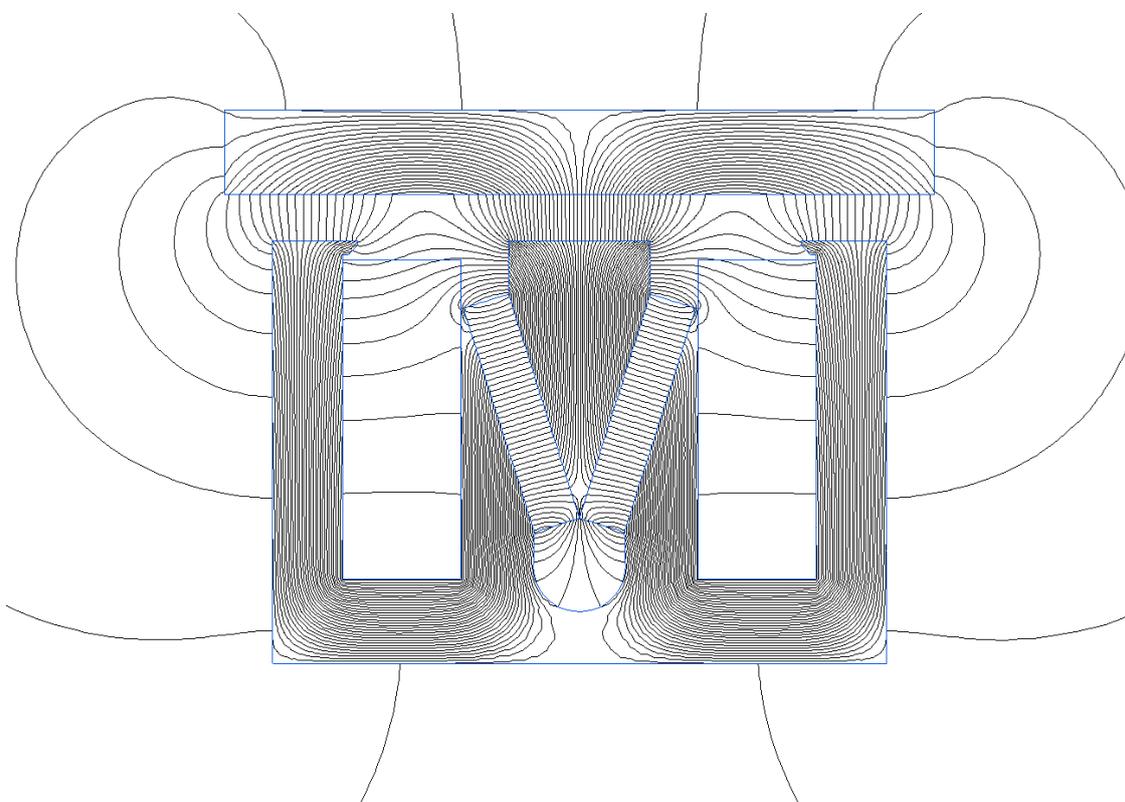


Рис. 1. Характерное распределение магнитного поля в поперечном сечении вблизи центральной части ГЭМ АО «НИИЭФА»

С целью сравнительной оценки силовых и энергетических характеристик электромагнита ГЭМ АО «НИИЭФА» была также разработана вычислительная модель электромагнита традиционного исполнения, показанная на Рис. 2. Этот магнит представляет собой U-образный магнит с параметрами близкими к оптимальным. Магниты такого типа успешно применялись в магнитолевитационных транспортных системах (например, в Германии, Китае, Южной Корее). Сила притяжения традиционного магнита к ферромагнитной направляющей определяется

величиной тока в катушке. Поэтому для увеличения несущей способности как систем разгрузки осей, так и магнитолевитационных систем (на первый взгляд) необходимо стремиться к повышению величины тока. Известно, что работоспособность таких систем ограничивается допустимым нагревом (температурой), вызванным тепловыделением тока в катушке.

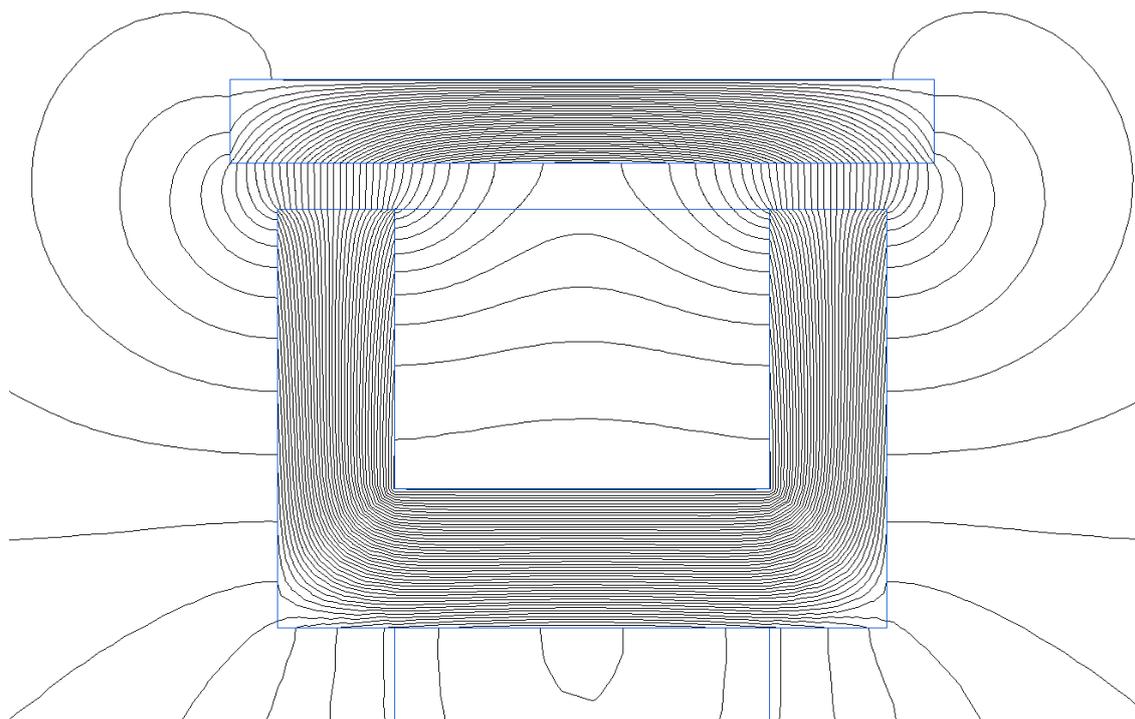


Рис. 2. Характерное распределение магнитного поля в модели электромагнита традиционного исполнения с параметрами, близкими к оптимальным

В анализируемом случае оба магнита сравниваются по энергопотреблению и рабочей температуре при условии генерации одинаковой силы. При этом сама максимально возможная величина силы определялась предельно допустимой температурой катушки магнита.

На Рис. 3 приведено распределение температуры в поперечном сечении традиционного ЭМ при джоулевых тепловыделениях, составляющих  $P = 576$  Вт (полный ток в катушке 9600 А). При температуре окружающей среды 300 К и величине коэффициента конвективной теплоотдачи (ККТ), равном  $10 \text{ Вт/м}^2$ : максимальная температура в катушке составляет  $T_{\text{макс}} = 416 \text{ К}$  и минимальная  $-T_{\text{мин}} = 402 \text{ К}$ .

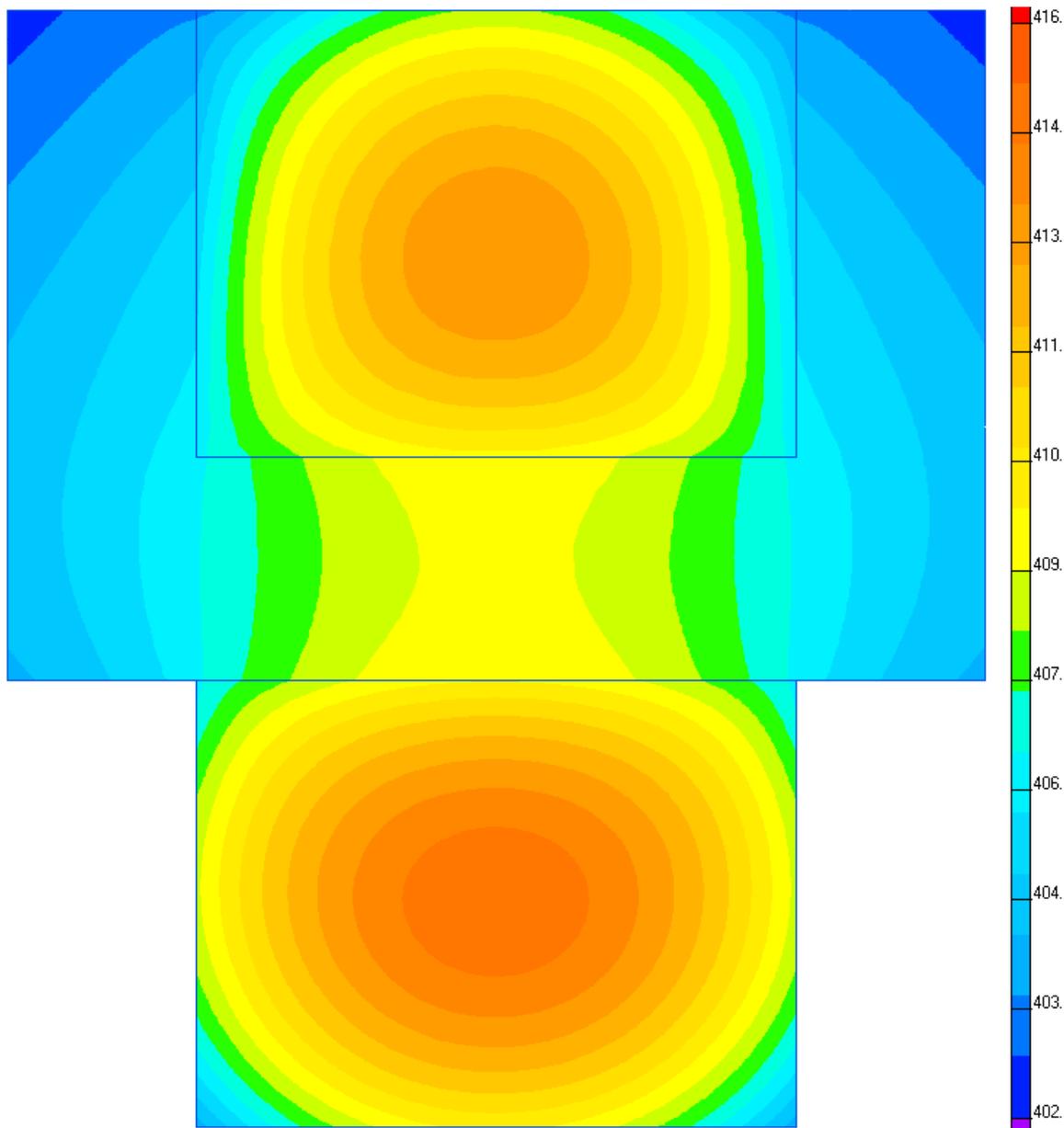


Рис. 3. Распределение температуры в электромагните традиционного исполнения.  
ККТ равен  $10 \text{ Вт/м}^2\text{К}$ .

В результате проведенных численных расчетов были определены следующие характеристики модели U – образного магнита. При генерации силы величиной 4700 Н и зазоре 10 мм он потребляет более **600 Вт** (при генерации силы в 3000 Н магнит потребляет **380 Вт** энергии). При величине коэффициента конвективной теплоотдачи равном  $20 \text{ Вт/м}^2\text{К}$  (интенсивный обдув) и коэффициенте черноты поверхности 0,5 перегрев проводника обмотки магнита относительно окружающей среды составляет  $\sim 76^0\text{К}$  (при ККТ равном  $10 \text{ Вт/м}^2\text{К}$  перегрев проводника составит  $\sim 116^0\text{К}$ ). Вес магнита равен  $\sim 90 \text{ кг}$ .

На Рис. 4 приведено распределение температуры в поперечном сечении ГЭМ АО «НИИЭФА». При генерации силы величиной 4700 Н и зазоре 10 мм джоулевы тепловыделения составляют  $P = 76$  Вт (ток в проводнике 7 А). При температуре окружающей среды 300 К и ККТ равном  $10 \text{ Вт/м}^2$ :  $T_{\text{макс}} = 324$  К и  $T_{\text{мин}} = 322$  К. Магнит при этом потребляет около **80** Вт электроэнергии. При генерации силы в 3000 Н магнит энергии практически **не потребляет**. При коэффициенте теплоотдачи  $20 \text{ Вт/м}^2\text{К}$  перегрев проводника обмотки магнита относительно окружающей среды составит  $\sim 12^\circ\text{К}$  (при  $10 \text{ Вт/м}^2\text{К}$  перегрев проводника составит  $\sim 24^\circ\text{К}$ ). Вес магнита равен  $\sim 50$  кг.

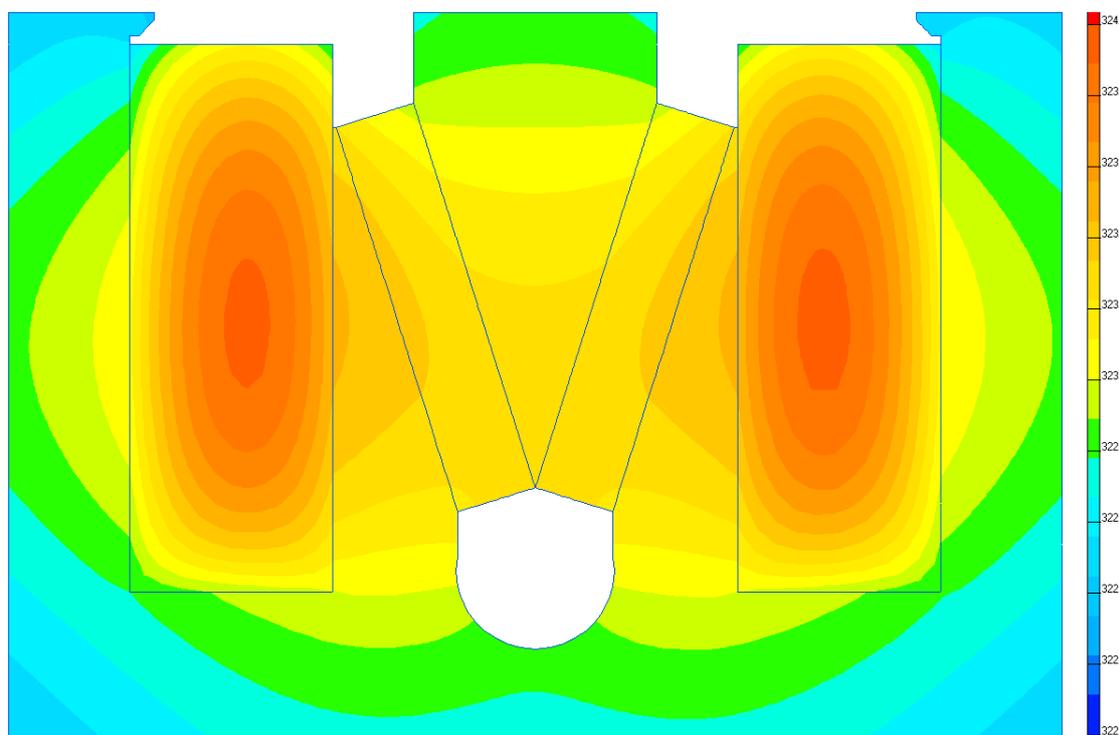


Рис. 4. Распределение температуры в ГЭМ АО «НИИЭФА». ККТ равен  $10 \text{ Вт/м}^2\text{К}$ .

## ВЫВОДЫ

В АО «НИИЭФА» разработан и изготовлен полномасштабный прототип серийного образца гибридного электромагнита подвеса магнитолевитационных транспортных систем. С целью сопоставительного анализа разработана математическая модель адекватного гибридного магниту электромагнита «традиционного» исполнения в виде U-образного магнита. Параметры этого ЭМ были выбраны близкими к оптимальным для целей обеспечения разгрузки осей транспортных систем или магнитолевитационных подвесов.

Вычислительный эксперимент показал, что стационарно генерируемая традиционным магнитом пондеромоторная сила 4,7 кН при

зазоре 10 мм достигается при сильном разогреве проводника обмотки (~450 К), Та же сила может быть создана гибридным магнитом разработки АО «НИИЭФА» при потреблении им в 7,5 раза меньшего количества энергии.

Гибридный магнит почти в два раза легче.

При генерации силы в 3 кН (режим работы обеспечивается только постоянными магнитами) ГЭМ практически не потребляет энергии в то время, как эквивалентный магнит традиционного исполнения потребляет 380 Вт.

## БЛАГОДАРНОСТИ

Работа выполнена при частичной поддержке Фонда Академика Василия Андреевича Глухих.

Авторы признательны В.П. Занину, А.А. Галенко, А.Т. Горелову за плодотворные дискуссии.

### Авторы заявляют, что:

1. У них нет конфликта интересов;
2. Настоящая статья не содержит каких-либо исследований с участием людей в качестве объектов исследований.

## БИБЛИОГРАФИЧЕСКИЙ СПИСОК / References

1. Журавлев Ю.Н. Активные магнитные подшипники. Теория, расчет, применение. – СПб: Политехника, 2003. – 206 с. [Zhuravljov JuN. Aktivnye magnitnye podshipniki. Teoriya, raschyot, primeneniye. SPb: Politehnika, 2003. 206 s. (In Russ.)]. Ссылка активна на: 27.10.2021. Доступно по: [https://www.studmed.ru/zhuravlev-yun-aktivnye-magnitnye-podshipniki-teoriya-raschet-primeneniye-2003\\_ae0c7437419.html](https://www.studmed.ru/zhuravlev-yun-aktivnye-magnitnye-podshipniki-teoriya-raschet-primeneniye-2003_ae0c7437419.html)
2. Amoskov VM, Arslanova DN, Bazarov AM, et al. Modeling EMS maglev systems to develop control algorithms. *Cybernetics and physics*. 2018;7(1):11-17. doi: 10.35470/2226-4116-2018-7-1-11-17
3. Tzeng YK, Wang TC. Optimal design of the electromagnetic levitation with permanent and electro magnets. *IEEE Transaction on Magnetics*. 1994;30(6):4731-733. doi: 10.1109/20.334204
4. Onuki T, Toda Y. Optimal Design of Hybrid Magnet in Maglev System with Both Permanent and Electro Magnets. *IEEE Transaction on Magnetics*. 1993;29(2):1783-1786. doi: 10.1109/20.250751
5. Kim K, Han H, Kim C, Yang S. Dynamic Analysis of a Maglev Conveyor Using an EM-PM Hybrid Magnet. *Journal of Electrical Engineering and Technology*. 2013;8(6):1571-1578. doi: 10.5370/JEET.2013.8.6.1571
6. Kim C-H, Cho H-W, Lee J-M, et al. Zero-power control of magnetic levitation vehicles with permanent magnets. *ICCAS 2010: Proceedings of the International Conference on Control, Automation and Systems; 2010 Oct 27-30; Gyeonggi-do, Korea (South)*. 2010. p. 732-735. doi: 10.1109/ICCAS.2010.5670118

7. Safaei F, Suratgar AA, Afshar A, et al. Characteristics Optimization of the Maglev Train Hybrid Suspension System Using Genetic Algorithm. *IEEE Transactions on Energy Conversion*. 2015;30(3):1163-1170. doi: 10.1109/tec.2014.2388155
8. Erkan K, Okur B, Koseki T, et al. Experimental evaluation of zero-power levitation control by transfer function approach for a 4-pole hybrid electromagnet. In: Proceeding of the 2011 IEEE International Conference on Mechatronics; 2011 April 13-15; Istanbul, Turkey. 2011. p. 23-28, doi: 10.1109/ICMECH.2011.5971299
9. Morishita M, Azukizawa T, Kanda S, et al. A new MAGLEV system for magnetically levitated carrier system. *IEEE Transactions on Vehicular Technology*. 1989;38(4):230-236. doi: 10.1109/25.45486
10. Wang TC, Tzeng YK. A new electromagnetic levitation system for rapid transit and high speed transportation. *IEEE Transactions on Magnetics*. 1994;30(6):4734-4736. doi: 10.1109/20.334205
11. Патент РФ на изобретение № RU2739939/ 30.12.2020. Бюл. № 1. Амосков В.М., Арсланова Д.Н., Белов А.В., Васильев В.Н., Кухтин В.П., Капаркова М.В., Ламзин Е.А., Ларионов М.С., Неженцев А.Н., Родин И.Ю., Сычевский С.Е., Фирсов А.А., Шатиль Н.А. «Гибридный электромагнит для системы маглев». [Pat. RUS № RU2739939/ 30.12.2020. Выул. № 1. Amoskov V.M., Arslanova D.N., Belov A.V., et al. “Gibridnyj jelektromagnit dlya sistemy maglev”. (In Russ.)]. Доступно по: <https://patenton.ru/patent/RU2739939C1> Ссылка активна на: 27.10.2021.
12. Патент РФ на изобретение № RU2743753/ 25.02.2021. Бюл. № 6. Амосков В.М., Арсланова Д.Н., Белов А.В., Васильев В.Н., Кухтин В.П., Капаркова М.В., Ламзин Е.А., Ларионов М.С., Неженцев А.Н., Родин И.Ю., Сычевский С.Е., Фирсов А.А., Шатиль Н.А. «Гибридный магнит без полей рассеяния для системы маглев». [Pat. RUS № RU2743753/ 25.02.2021. Выул. № 6. Amoskov V.M., Arslanova D.N., Belov A.V., et al. “Gibridnyj magnit bez poley rassejaniya dlya sistemy maglev”. (In Russ.)]. Ссылка активна на: 27.10.2021. Доступно по: <https://patenton.ru/patent/RU2743753C1>
13. Amoskov VM, Belov AV, Belyakov VA, et al. Computation technology based on KOMPOT and KLONDIKE codes for magnetostatic simulations in tokamaks. *Plasma Devices and Operations*. 2008;16(2):89-103. doi: 10.1080/10519990802018023
14. Акулицкий С.Г., Амосков В.М., Арсланова Д.Н. и др. Результаты стендовых испытаний прототипа полномасштабного гибридного электромагнита для систем маглев // Инновационные транспортные системы и технологии. – 2021. – Т. 7. – № 4. – С. 14–32. [Akulitzky SG, Amoskov VM, Arslanova DN, et al. Bench testing of hybrid EMS prototype. *Modern Transportation Systems and Technologies*. 2021;7(4):14-32. (In Russ.)]. doi: 10.17816/transsyst20217400-00
15. Амосков В.М., Арсланова Д.Н., Белов А.В. и др. Натурные испытания и верификация математической модели гибридного электромагнита подвеса для больших величин левитационных зазоров // Инновационные транспортные системы и технологии. – 2022. – Т. 8. – № 1. – С. 28–37. [Amoskov VM, Arslanova DN, Belov AV, et al. Verification of numerical model of hybrid ems using test bench measurements at large air gap. *Modern Transportation Systems and Technologies*. 2022;8(1):28-37. (In Russ.)]. doi: 10.17816/transsyst20228128-37

#### Сведения об авторах:

**Амосков Виктор Михайлович**, к.ф.-м.н.;

eLibrary SPIN: 2436-3828; ORCID: 0000-0001-9781-9116; Scopus ID: 6701846033;

E-mail: amoskov-sci@yandex.ru

- Арсланова Дарья Николаевна**, магистр;  
eLibrary SPIN: 3234-8141; ORCID: 0000-0002-3791-723X; Scopus ID: 55314279800;  
E-mail: arslanova-sci@yandex.ru
- Белов Андрей Александрович**, магистр;  
eLibrary SPIN: 6291-0480; ORCID: 0000-0001-7040-6741;  
E-mail: andrewthewhite@mail.ru
- Белов Александр Вячеславович**, магистр;  
eLibrary SPIN: 3748-2363; ORCID: 0000-0001-9486-3437; Scopus ID: 7202831959;  
E-mail: belov-sci@yandex.ru
- Васильев Вячеслав Николаевич**;  
eLibrary SPIN: 5444-8639; ORCID: 0000-0002-1218-6274; Scopus ID: 7005989574;  
E-mail: vvnm@mail.ru
- Деомидов Валерий Викторович**, магистр;  
eLibrary SPIN: 5931-9704; ORCID: 0000-0003-2795-8342;  
E-mail: deomidov@icloud.com
- Капаркова Марина Викторовна**;  
eLibrary SPIN: 6881-2266; ORCID: 0000-0002-3489-5581; Scopus ID: 12445243900;  
E-mail: kaparkova-sci@yandex.ru
- Кухтин Владимир Петрович**, к.ф.-м.н.;  
eLibrary SPIN: 1628-3135; ORCID: 0000-0001-6925-6141; Scopus ID: 35353250700;  
E-mail: kukhtin-sci@yandex.ru
- Ламзин Евгений Анатольевич**, д.ф.-м.н.;  
eLibrary SPIN: 8287-7879; ORCID: 0000-0002-6072-5711; Scopus ID: 12756829300;  
E-mail: lamzin-sci@yandex.ru
- Ларионов Михаил Сергеевич**;  
eLibrary SPIN: 1631-3598; ORCID: 0000-0002-8570-7210; Scopus ID: 36443801800;  
E-mail: larionov-sci@yandex.ru
- Морозов Игорь Александрович**, магистр;  
eLibrary SPIN: 4815-5843; ORCID: 0000-0001-7451-730X;  
E-mail: morozov083@gmail.com
- Неженцев Андрей Николаевич**;  
eLibrary SPIN: 7319-8924; ORCID: 0000-0002-8724-7211; Scopus ID: 57201374326;  
E-mail: nezhentzev-sci@yandex.ru
- Овсянников Дмитрий Александрович**, д.ф.-м.н., профессор;  
eLibrary SPIN: 7762-9740; ORCID: 0000-0002-0829-2023;  
E-mail: d.a.ovsyannikov@spbu.ru
- Овсянников Дмитрий Александрович (Мл.)**, магистр;  
eLibrary SPIN: 5657-4707; ORCID: 0000-0003-4191-8494  
E-mail: d-ovs@yandex.ru
- Родин Игорь Юрьевич**, к.т.н.;  
eLibrary SPIN: 4935-6473; Scopus ID: 7005063976;  
E-mail: rodin@sintez.niiefa.spb.su
- Смирнов Сергей Александрович**, в.н.с.;  
eLibrary SPIN: 3042-2910; ORCID: 0000-0002-2096-6967;  
E-mail: noc-pgups@yandex.ru
- Смирнова Ольга Юрьевна**, с.н.с.;  
eLibrary SPIN: 9083-2984; ORCID: 0000-0002-2239-4384;  
E-mail: noc-pgups@yandex.ru

**Сычевский Сергей Евгеньевич**, д.ф.-м.н.;

eLibrary SPIN: 3073-0334; ORCID: 0000-0003-1527-4015; Scopus ID: 6602159085;

E-mail: sytch-sie@yandex.ru

**Шатиль Николай Александрович**, к.т.н.;

eLibrary SPIN: 2818-0206; ORCID: 0000-0001-8529-130X; Scopus ID: 6507475131;

E-mail: shatiln@yandex.ru

**Фирсова Татьяна Александровна**;

eLibrary SPIN: 2858-7562; ORCID: 0000-0002-9229-9622

E-mail: firsova@sintez.niiefa.spb.su

**Фирсов Алексей Анатольевич**;

eLibrary SPIN: 7943-4297; ORCID: 0000-0002-7846-8717; Scopus ID: 56069602000;

E-mail: firsov-sci@yandex.ru

#### **Information about the authors:**

**Victor M. Amoskov**, PhD in Physics and Mathematics;

eLibrary SPIN: 2436-3828; ORCID: 0000-0001-9781-9116; Scopus ID: 6701846033;

E-mail: amoskov-sci@yandex.ru

**Darya N. Arslanova**, MSc;

eLibrary SPIN: 3234-8141; ORCID: 0000-0002-3791-723X; Scopus ID: 55314279800;

E-mail: arslanova-sci@yandex.ru

**Andrei A. Belov**, MSc;

eLibrary SPIN: 6291-0480; ORCID: 0000-0001-7040-6741;

E-mail: andrewthewhite@mail.ru

**Alexander V. Belov**, MSc;

eLibrary SPIN: 3748-2363; ORCID: 0000-0001-9486-3437; Scopus ID: 7202831959;

E-mail: belov-sci@yandex.ru

**Valery V. Deomidov**, MSc;

eLibrary SPIN: 5931-9704; ORCID: 0000-0003-2795-8342;

E-mail: deomidov@icloud.com

**Tatiana A. Firsova**;

eLibrary SPIN: 2858-7562; ORCID: 0000-0002-9229-9622

E-mail: firsova@sintez.niiefa.spb.su

**Alexey A. Firsov**, MSc;

eLibrary SPIN: 7943-4297; ORCID: 0000-0002-7846-8717; Scopus ID: 56069602000;

E-mail: firsov-sci@yandex.ru

**Marina V. Kaparkova**, MSc;

eLibrary SPIN: 6881-2266; ORCID: 0000-0002-3489-5581; Scopus ID: 12445243900;

E-mail: kaparkova-sci@yandex.ru

**Vladimir P. Kukhtin**, PhD in Physics and Mathematics;

eLibrary SPIN: 1628-3135; ORCID: 0000-0001-6925-6141; Scopus ID: 35353250700;

E-mail: kukhtin-sci@yandex.ru

**Evgeny A. Lamzin**, PhD, DSc in Physics and Mathematics;

eLibrary SPIN: 8287-7879; ORCID: 0000-0002-6072-5711; Scopus ID: 12756829300;

E-mail: lamzin-sci@yandex.ru

**Mikhail S. Larionov**, MSc;

eLibrary SPIN: 1631-3598; ORCID: 0000-0002-8570-7210; Scopus ID: 36443801800;

E-mail: larionov-sci@yandex.ru

**Igor A. Morozov**, MSc;

eLibrary SPIN: 4815-5843; ORCID: 0000-0001-7451-730X;

E-mail: morozov083@gmail.com

**Andrey N. Nezhentzev**, MSc;

eLibrary SPIN: 7319-8924; ORCID: 0000-0002-8724-7211; Scopus ID: 57201374326;

E-mail: nezhentzev-sci@yandex.ru

**Dmitry A. Ovsyannikov**, DSc in Physics and Mathematics, Full Professor;

eLibrary SPIN: 7762-9740; ORCID: 0000-0002-0829-2023;

E-mail: d.a.ovsyannikov@spbu.ru

**Dmitry A. Ovsyannikov (Jr)**, MSc;

eLibrary SPIN: 5657-4707; ORCID: 0000-0003-4191-8494

E-mail: d-ovs@yandex.ru

**Igor Yu. Rodin**, PhD in Engineering;

eLibrary SPIN: 4935-6473; Scopus ID: 7005063976;

E-mail: rodin@sintez.niiefa.spb.su

**Nicolai A. Shatil**, MSc, PhD in Engineering;

eLibrary SPIN: 2818-0206; ORCID: 0000-0001-8529-130X; Scopus ID: 6507475131;

E-mail: shatiln@yandex.ru

**Sergei A. Smirnov**, Leading Researcher;

eLibrary 3042-2910; ORCID: 0000-0002-2096-6967;

E-mail: noc-pgups@yandex.ru

**Olga Yu. Smirnova**, Senior Researcher;

eLibrary SPIN: 9083-2984; ORCID: 0000-0002-2239-4384;

E-mail: noc-pgups@yandex.ru

**Sergey E. Sytchevsky**, DSc in Physics and Mathematics;

eLibrary SPIN: 3073-0334; ORCID: 0000-0003-1527-4015; Scopus ID: 6602159085;

E-mail: sytch-sie@yandex.ru

**Vyacheslav N. Vasiliev**, MSc;

eLibrary SPIN: 5444-8639; ORCID: 0000-0002-1218-6274; Scopus ID: 7005989574;

E-mail: vvnm@mail.ru

#### **Цитировать:**

Амосков В.М., Арсланова Д.Н., Белов А.В. и др. Гибридный и традиционный электромагниты для целей магнитного подвешивания: сопоставительный анализ // Инновационные транспортные системы и технологии. – 2022. – Т. 8. – № 2. – С. 43–54. doi: 10.17816/transsyst20228243-54

#### **To cite this article:**

Amoskov VM, Arslanova DN, Belov AV et al. Comparative analysis of performance of hybrid and pure EM suspensions. *Modern Transportation Systems and Technologies*. 2022;8(2):43-54. doi: 10.17816/transsyst20228243-54