



ISSN 1995-2732 (Print), 2412-9003 (Online)
УДК 621.313 : 669.018.4 : 537.8
DOI: 10.18503/1995-2732-2025-23-4-102-109

РАСЧЕТ АДДИТИВНЫХ ЭЛЕКТРОМАГНИТНЫХ СВОЙСТВ ДИСПЕРСНО-НАПОЛНЕННЫХ МАГНИТОМЯГКИХ КОМПОЗИЦИОННЫХ МАТЕРИАЛОВ ДЛЯ ПЕРСПЕКТИВНЫХ ЭЛЕКТРОДВИГАТЕЛЕЙ

Гулин А.Е.¹, Линьков С.А.¹, Шеметов А.Н.¹, Кувшинов Д.А.², Ефимов С.В.³

¹Магнитогорский государственный технический университет им. Г.И. Носова, Магнитогорск, Россия

²АО «НПО „Андронидная техника”», Магнитогорск, Россия

³Московский авиационный институт (национальный исследовательский университет), Москва, Россия

Аннотация. Объектом исследования являются магнитопроводы для новых энергоэффективных электродвигателей промышленных роботов и металлообрабатывающих комплексов. Цель работы — выбор и расчет оптимальной структуры перспективных магнитомягких композитов, обеспечивающих технологичность производства и снижение потерь мощности в магнитной системе электродвигателя на широком частотном диапазоне питающего напряжения. Рассмотрены теоретические основы моделирования аддитивных электромагнитных свойств и оценка влияния удельного объемного содержания и характеристик наполнителя и матрицы-связующего в композите на магнитную проницаемость материала. Проведен сравнительный анализ моделей гетерогенной среды по Дж.К. Максвеллу, К.В. Вагнеру, О. Виннеру и В.И. Оделевскому. Выполнен расчетный эксперимент, результаты которого свидетельствуют о возможности применения линейной аппроксимации к расчетным кривым зависимостей магнитных проницаемостей дисперсно-наполненных композиционных материалов от удельного объемного содержания наполнителя, что в дальнейшем может упростить задачу выбора наилучшего решения для достижения требуемых магнитных свойств композиций. В качестве экспериментальной апробации указанной методики приведены результаты экспериментальных исследований физических и магнитных свойств дисперсно-наполненных магнитомягких композитов в лабораторных условиях. Проанализированы возможные преимущества и недостатки использования новых материалов при изготовлении электрических машин и приборов. Достигнутые на экспериментальных образцах показатели выявили недостаточный уровень их магнитной проницаемости, поэтому важным направлением развития этой темы представляется цифровой синтез прогнозных моделей новых композиционных магнитомягких материалов с учетом их структурного состояния и разработка технологии их производства, позволяющей сократить затраты на проектирование и сроки изготовления необходимых типоразмеров электрических машин, сдерживающие развитие автономных транспортных и робототехнических комплексов.

Ключевые слова: электрическая машина, магнитопровод, магнитомягкий композит, электротехническая сталь, материаловедение, технологии обработки материалов, математическая модель.

Работа выполнена при финансовой поддержке Министерства науки и высшего образования России (проект FZRU-2025-0002).

© Гулин А.Е., Линьков С.А., Шеметов А.Н., Кувшинов Д.А., Ефимов С.В., 2025

Для цитирования

Расчет аддитивных электромагнитных свойств дисперсно-наполненных магнитомягких композиционных материалов для перспективных электродвигателей / Гулин А.Е., Линьков С.А., Шеметов А.Н., Кувшинов Д.А., Ефимов С.В. // Вестник Магнитогорского государственного технического университета им. Г.И. Носова. 2025. Т. 23. №4. С. 102-109. <https://doi.org/10.18503/1995-2732-2025-23-4-102-109>



Контент доступен под лицензией Creative Commons Attribution 4.0 License.
The content is available under Creative Commons Attribution 4.0 License.

CALCULATION OF ADDITIVE ELECTROMAGNETIC PROPERTIES OF SOFT MAGNETIC DISPERSED-FILLED COMPOSITE MATERIALS FOR ADVANCED ELECTRIC MOTORS

Gulin A.E.¹, Linkov S.A.¹, Shemetov A.N.¹, Kuvshinov D.A.², Efimov S.V.³

¹Nosov Magnitogorsk State Technical University, Magnitogorsk, Russia

²JSC SPA Android Technics, Magnitogorsk, Russia

³Moscow Aviation Institute (National Research University), Moscow, Russia

Abstract. The subject of the study is cores for new energy-efficient electric motors used in industrial robots and metal-processing complexes. The aim of this work is to select and calculate an optimal structure of advanced soft magnetic composites that ensure manufacturability and reduction of power losses in the motor's magnetic system over a wide frequency range of supply voltage. The theoretical foundations of modeling additive electromagnetic properties and the assessment of the influence of the specific volume content and characteristics of the filler and binder matrix in the composite on the magnetic permeability of the material were considered. A comparative analysis of heterogeneous medium models was carried out according to J.C. Maxwell, K.W. Wagner, O. Wiener, and V.I. Odelevsky. A computational experiment was performed. The results indicated the possibility of applying linear approximation to the calculated curves of the dependences of the magnetic permeability of dispersed-filled composite materials on the specific volume content of the filler. This approach may simplify the task of choosing the best solution to achieve the required magnetic properties of the compositions in the future. The results of experimental studies of the physical and magnetic properties of dispersed-filled soft magnetic composites under laboratory conditions were presented as an experimental approbation of this technique. The potential advantages and disadvantages of using new materials in the manufacture of electrical machines and devices were analyzed. The performance indicators achieved on experimental samples revealed an insufficient level of their magnetic permeability. Therefore, an important direction for developing this topic is the digital synthesis of predictive models for new soft magnetic composite materials. This model must take into account the structural state and the development of production technologies that reduce design costs and production time of the electrical machines of required standard sizes. These improvements can help overcome the constraints hindering the development of autonomous transport and robotic complexes.

Keywords: electrical machine, magnetic core, soft magnetic composite, electrical steel, materials science, material processing technologies, mathematical model

This research is conducted with financial support of the Ministry of Science and Higher Education of the Russian Federation (project no. FZRU-2025-0002).

For citation

Gulin A.E., Linkov S.A., Shemetov A.N., Kuvshinov D.A., Efimov S.V. Calculation of Additive Electromagnetic Properties of Soft Magnetic Dispersed-Filled Composite Materials for Advanced Electric Motors. *Vestnik Magnitogorskogo Gosudarstvennogo Tekhnicheskogo Universiteta im. G.I. Nosova* [Vestnik of Nosov Magnitogorsk State Technical University]. 2025, vol. 23, no. 4, pp. 102-109. <https://doi.org/10.18503/1995-2732-2025-23-4-102-109>

Введение

Ключевым элементом современных промышленных, транспортных и бытовых установок являются электродвигатели, технические и эксплуатационные характеристики которых определяют массогабаритные, энергетические и экономические показатели любого механизма. Отечественный и мировой опыт электромашиностроения показывает, что резервы энергосбережения, заложенные в оптимизации обмоток и механической части, практически исчерпаны. При этом практически не рассматриваются возможности повышения энергоэффективности магнитной системы. Особенно актуальным это направление становится в высокочастотных электроприводах, где нагрев традиционных листовых шихтованных магнитопроводов достигает предельно высоких значений и не обеспечивает требуемого КПД для эффективной

работы электродвигателя [1, 2]. Кроме того, стоимость специальных динамных сталей и трудоемкость изготовления электрических машин классической конструкции существенно снижают рентабельность их производства. Таким образом, необходимо разработать и исследовать качественно новые магнитомягкие материалы, отвечающие современным требованиям энергетической эффективности и технологичности использования для широкого круга типоразмеров электродвигателей.

Одним из решений поставленной задачи является разработка новых гетерогенных магнитомягких материалов, сочетающих в себе перспективные слоистые и дисперсно-наполненные композиты, которые позволили бы гибко варьировать механические и электромагнитные характеристики для использования в электродвигателях различного типоразмера и назначения.

Теоретические предпосылки

Первая модель гетерогенной среды с нерегулярной структурой была предложена Дж. К. Максвеллом [3, 4] для расчета средней диэлектрической проницаемости композиции, состоящей из сферических частиц с удельным сопротивлением k_1 во внешней матричной среде с удельным сопротивлением k_2 . Далее, согласно принципу двойственности, который основан на симметрии уравнений Максвелла относительно электрического и магнитного полей, решение электродинамической задачи можно преобразовать в аналогичное для магнитной системы путем замены соответствующих электрических параметров в проводящих средах для магнитных полей в магнетиках, описываемых уравнением Лапласа:

$$\mu_{\text{см}} = 1 + \frac{3v_1(\mu_1 - 1)}{2 + \mu_1 - v_1(\mu_1 - 1)}, \quad (1)$$

где v_1 – удельное объемное содержание наполнителя в матрице с магнитной проницаемостью μ_1 ; v_2 – то же для матричной среды с магнитной проницаемостью μ_2 (при условии, что $v_1 + v_2 = 1$).

Далее результаты Максвелла уточнялись различными исследователями с учетом исходных предпосылок и степени абстракции описания взаимодействующих компонентов среды. Рассмотрим некоторые наиболее известные из них:

– уравнение К.В. Вагнера [5], учитывающее процессы поляризации неоднородных материалов, таких как суспензии или коллоиды, полимеры с разделёнными фазами, а также кристаллические или жидкокристаллические полимеры:

$$\mu_{\text{см}} = \mu_2 \frac{2\mu_2 + \mu_1 + 2v_1(\mu_1 - \mu_2)}{2\mu_2 + \mu_1 - v_1(\mu_1 - \mu_2)}; \quad (2)$$

– закон смешения О. Винера [6], описывающий смесь с изотропным или анизотропным порядком компонентов, где свойства компонентов, а также структура смеси остаются неизменными для волнового процесса, при котором длина волны велика по сравнению с характерными размерами составных частей структуры, и требуется определить величину рассматриваемого свойства условного однородного тела, которым можно заменить смесь таким образом, что внешнее поле останется неизменным:

$$\mu_{\text{см}} = \mu_2 \frac{1 + 2v_1 \frac{\mu_1 - \mu_2}{\mu_1 + 2\mu_2}}{1 - v_1 \frac{\mu_1 - \mu_2}{\mu_1 + 2\mu_2}}; \quad (3)$$

– логарифмическое правило смешения К. Лихтенекера [8] для хаотических бинарных смесей с взаимопроницающими компонентами:

$$\mu_{\text{см}} = \frac{[v_1\mu_1 + (1 - v_1)\mu_2]^u}{\left[\frac{v_1}{\mu_1} + \frac{(1 - v_1)}{\mu_2}\right]^{1-u}}, \quad (4)$$

где u – мера вероятности вида взаимодействия, когда линия раздела компонентов перпендикулярна силовым линиям поля; $(1 - u)$ – наоборот, частота близости к случаю, когда линия раздела компонентов параллельна силовым линиям поля;

– формула В.И. Оделевского для взаимодействия внутри смеси двух сферических компонентов сопоставимых радиусов:

$$\mu_{\text{см}} = \mu_a \left[1 + \sqrt{1 + \frac{\mu_1\mu_2}{2\mu_a^2}} \right], \quad (5)$$

$$\mu_a = \frac{(3v_1 - 1)\mu_1 + (3v_2 - 1)\mu_2}{4}.$$

Таким образом, основными варьируемыми параметрами при синтезе дисперсно-наполненных композиционных материалов являются удельное объемное содержание наполнителя v_1 в матрице с магнитной проницаемостью μ_1 и удельное объемное содержание матричной среды v_2 – с магнитной проницаемостью μ_2 . Причем v_1 и v_2 , как уже отмечалось, взаимосвязаны через уравнение $v_1 + v_2 = 1$.

При этом наиболее простым технологическим приемом, обеспечивающим управление магнитными свойствами таких материалов, будет управление количеством наполнителя в матрице.

Результаты расчетов

В ходе расчетного эксперимента, проводимого на первом этапе исследований, рассматривалось влияние удельного объемного содержания наполнителей при их разных магнитных свойствах (магнитной проницаемости) на магнитную проницаемость смеси — дисперсно-наполненных композиционных материалов. Результаты расчетов представлены на **рис. 1**.

Как следует из приведенных данных, для любых магнитомягких материалов (при использовании наполнителей с разными характеристиками), магнитные проницаемости таких композитов практически линейно зависят от удельного объемного содержания наполнителя. Очевидно, что чем больше значение μ_1 , тем выше расположена прямая влияния объемного содержания наполнителя на графике и тем больше угол наклона этой прямой к оси удельного объемного содержания.

Для доказательства, что полученные кривые влияния удельного объемного содержания наполнителя на магнитную проницаемость дисперсно-наполненных композиционных материалов близки к линейным, в программном комплексе «OriginPro®» производилась

аппроксимация со статистическим анализом отклонений. Для расчета был выбран вариант с магнитной проницаемостью $\mu_1 = 50000$. Результаты статистической обработки данных приведены в табл. 1.

Представленные данные свидетельствуют о возможности применять линейные аппроксимации к расчетным кривым зависимостей магнитных проницаемостей дисперсно-наполненных композиционных материалов от удельного объемного содержания наполнителя, что в дальнейшем может упростить задачу выбора наилучшего решения для достижения требуемых магнитных свойств композиций.

На втором этапе исследований рассматривалось влияние удельного объемного содержания наполнителей при их разных магнитных свойствах (магнитными проницаемостями материалов наполнителя) на магнитную проницаемость дисперсно-наполненных композиционных материалов. Результаты расчетов представлены на рис. 2.

Как следует из приведенных данных, магнитные проницаемости композиционных материалов практически линейно зависят от магнитных проницаемостей наполнителей при разных значениях удельного содержания наполнителей в матрице. При этом наличие диамагнитной матрицы существенно снижает магнитные свойства всей композиции. Так, например, при $v_1 = 0,34$ магнитная проницаемость среды принимает значение 546 по сравнению с магнитной проницаемостью наполнителя (50000), что свидетельствует об уменьшении магнитной проницаемости в 91 раз, а для случая, когда $v_1 = 0,52$, уменьшение составляет 3,57 раза (снижение магнитной проницаемости с 50000 до 14002). Очевидно, что чем больше значение v_1 , тем выше расположена прямая влияния объемного содержания наполнителя на графике и тем больше угол наклона этой прямой к оси магнитной проницаемости наполнителя.

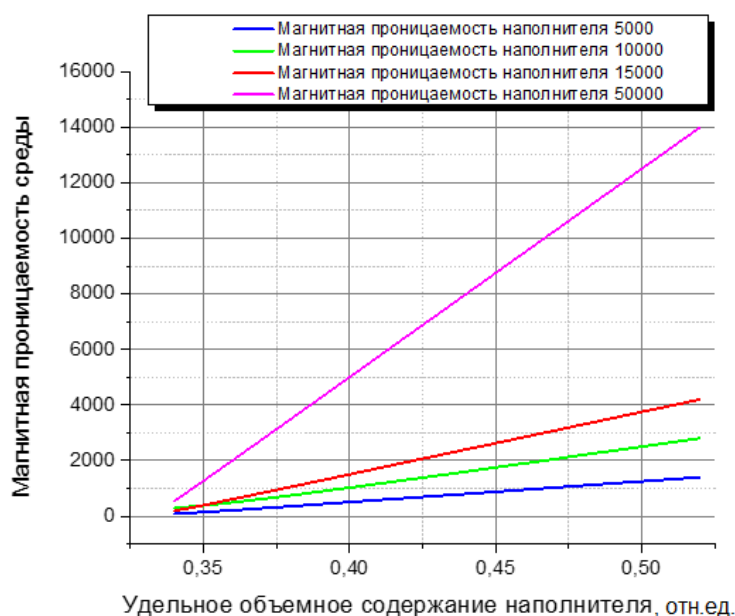


Рис. 1. Влияние удельного объемного содержания наполнителя v_1 при его разных магнитных проницаемостях μ_1 на магнитную проницаемость дисперсно-наполненных композиционных материалов $\mu_{см}$

Fig. 1. Influence of the specific volume content of the filler v_1 at its different magnetic permeability μ_1 on the magnetic permeability of dispersed-filled composite materials $\mu_{см}$

Таблица 1. Результаты аппроксимации кривой влияния удельного объемного содержания наполнителя на магнитную проницаемость дисперсно-наполненных композиционных материалов для случая $\mu_1 = 50000$

Table 1. Results of the approximation of the influence curve of the filler's specific volume content on the magnetic permeability of dispersed-filled composite materials for the case of $\mu_1 = 50000$

| | |
|----------------------------|---------------------------|
| Уравнение | $y = a + b \cdot x$ |
| Коэффициент уравнения a | $-2451,84628 \pm 8,89922$ |
| Коэффициент уравнения b | $7403,43022 \pm 20,52997$ |
| Сумма квадратов отклонений | 408,41 |
| Критерий Пирсона | 0,99993 |
| Критерий R^2 | 0,99987 |

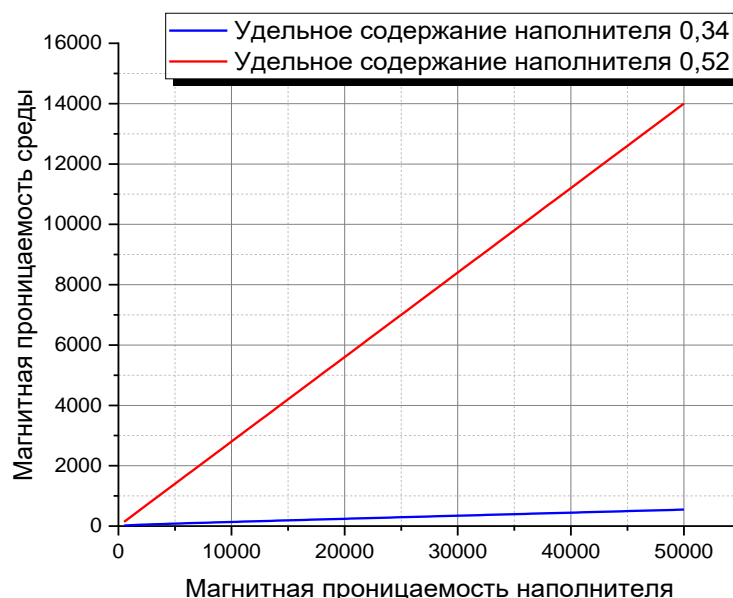


Рис. 2. Расчетные кривые влияния магнитной проницаемости наполнителя на магнитную проницаемость дисперсно-наполненных композиционных материалов для $\nu_1 = 0,34$ и $\nu_1 = 0,52$

Fig. 2. Calculated influence curves of the filler's magnetic permeability on the magnetic permeability of dispersed-filled composite materials for $\nu_1 = 0,34$ and $\nu_1 = 0,52$

Важным технологическим выводом представленных результатов является то, что для повышения магнитной проницаемости магнитомягких композиционных материалов следует стремиться к увеличению удельного объемного содержания наполнителя и использованию в качестве такого наполнителя материалов с высокой магнитной проницаемостью.

Третий эксперимент был направлен на исследование влияния магнитной проницаемости самой матрицы на магнитную проницаемость дисперсно-наполненных композиционных материалов. Если предыдущие исследования выполнялись для случая, когда наполнитель вводится в матрицу из диамагнетиков и парамагнетиков с низкой магнитной проницаемостью ($\mu_2 \approx 1$), то применение в качестве матрицы материалов, обладающих достаточными механическими свойствами, низкой плотностью и повышенной магнитной проницаемостью, может существенно улучшить свойства дисперсно-наполненных композитов, открывая технологические резервы повышения их магнитных свойств.

Для оценки этого эффекта выполнены расчетные эксперименты с использованием матрицы, магнитная проницаемость которой варьируется в диапазоне от 100 до 1000 (рис. 3). Результаты моделирования показали, что при варьировании удельного объемного содержания наполнителя магнитные проницаемости композитов пропорционально зависят от магнитной проницаемости матрицы. Очевидно, что чем больше

значение μ_2 , тем выше расположена поверхность влияния объемного содержания наполнителя на графике и тем больше угол наклона этой прямой к оси удельного объемного содержания.

Оценка адекватности применения математических моделей для расчета магнитных свойств дисперсно-наполненных композиционных материалов осуществлялась путем экспериментального определения значений магнитной проницаемости в зависимости от удельного объемного содержания наполнителя и сопоставления полученных экспериментальных данных с расчетными.

Результаты экспериментально-аналитического определения параметров дисперсно-наполненных композиционных материалов по образцам представлены в табл. 2, а значения магнитной проницаемости дисперсно-наполненных композиционных материалов, полученных экспериментальным путем ($\mu_{см\text{эксп}}$), и значения магнитной проницаемости, полученные по математической модели ($\mu_{см}$), для исследуемых образцов приведены в табл. 3.

В табл. 3 относительное отклонение расчетных данных от экспериментальных значений магнитной проницаемости материалов определяется как абсолютное значение разниц $\mu_{см}$ и $\mu_{см\text{эксп}}$, приведенное к значению $\mu_{см\text{эксп}}$, измеряемое в процентах.

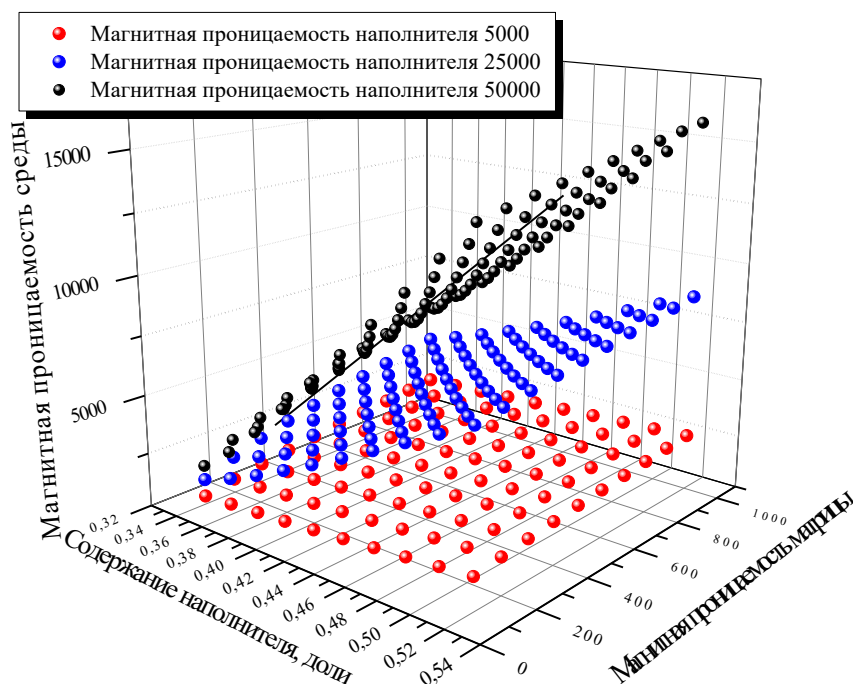


Рис. 3. Расчетные поверхности влияния удельного объемного содержания наполнителя и магнитной проницаемости матрицы $\mu_2 \in [100; 1000]$ на магнитную проницаемость дисперсно-наполненных композиционных материалов при магнитной проницаемости наполнителя 5000, 25000 и 50000

Fig. 3. Calculated surfaces of the influence of the filler's specific volume content and the magnetic permeability of the matrix $\mu_2 \in [100; 1000]$ on the magnetic permeability of dispersed-filled composite materials with a magnetic permeability of the filler of 5000, 25000, and 50000

Таблица 2. Значения относительных объемных содержаний ферромагнитного наполнителя ν_1 , матрицы ν_2 и остаточной пористости Π для образцов дисперсно-наполненных композиционных материалов
Table 2. Values of the relative volume contents of the ferromagnetic filler (ν_1), matrix (ν_2), and the residual porosity Π for samples of dispersed-filled composite materials

| Номер образца | Фракция, мкм | m_1 , масс% | h , мм | $m_{\text{эксп}}$, г | $\rho_{\text{эксп}}$, г/см ³ | $\rho_{\text{расч}}$, г/см ³ | $m_{\text{расч}}$, г | Π | ν_1 | ν_2 |
|---------------|--------------|---------------|----------|-----------------------|--|--|-----------------------|-------|---------|---------|
| 1 | 160 | 10 | 11,8 | 17,5 | 3,93 | 5,51 | 24,55 | 0,287 | 0,343 | 0,657 |
| 2 | 160 | 5 | 9,4 | 13,3 | 3,75 | 6,48 | 23,01 | 0,422 | 0,361 | 0,639 |
| 3 | 160 | 3 | 6,0 | 8,2 | 3,62 | 6,97 | 15,80 | 0,481 | 0,379 | 0,621 |
| 4 | 71 | 10 | 11,7 | 17,1 | 3,87 | 5,51 | 24,34 | 0,298 | 0,333 | 0,667 |
| 5 | 71 | 5 | 6,2 | 8,9 | 3,80 | 6,69 | 15,65 | 0,431 | 0,383 | 0,617 |
| 6 | 71 | 3 | 5,9 | 8,0 | 3,59 | 7,09 | 15,80 | 0,494 | 0,388 | 0,612 |

Таблица 3. Значения магнитной проницаемости дисперсно-наполненных композиционных материалов, полученных экспериментальным и расчетным путем для исследуемых образцов

Table 3. Values of the magnetic permeability of dispersed-filled composite materials obtained experimentally and calculated for the studied samples

| Номер образца | Фракция, мкм | m_1 , масс% | $\mu_{\text{см}}$ | $\mu_{\text{см эксп}}$ | Относительное отклонение, % |
|---------------|--------------|---------------|-------------------|------------------------|-----------------------------|
| 1 | 160 | 10 | 119,46 | 117 | 2,10 |
| 2 | 160 | 5 | 319,03 | 310 | 2,91 |
| 3 | 160 | 3 | 447,94 | 480 | 6,68 |
| 4 | 71 | 10 | 64,35 | 63 | 2,14 |
| 5 | 71 | 5 | 378,95 | 367 | 3,26 |
| 6 | 71 | 3 | 418,27 | 453 | 7,67 |

Заключение

Анализ довинеровских расчетных методик определения эффективных свойств композитов показал недостаточно высокую степень их соответствия полученным экспериментальным данным. Поэтому перспективным направлением развития работы является выявление взаимосвязей между структурными параметрами дисперсно-наполненных композитов и показателями их магнитных свойств.

Достигнутые на экспериментальных образцах показатели выявили недостаточный уровень их магнитной проницаемости для применения в современных электрических машинах, поэтому важным направлением развития этой темы представляется создание прогнозных моделей магнитопроводов с учетом структурного состояния этих материалов.

Новые материалы и технологии позволяют, помимо всего прочего, сократить затраты на производство и сроки изготовления необходимых типоразмеров электрических машин и компонентов, сдерживающие развитие автономных транспортных и робототехнических комплексов.

Список источников

1. Линьков С.А., Сарваров А.С., Бачурин И.В. Анализ систем управления синхронных электроприводов // *Электротехнические системы и комплексы*. 2014. № 2 (23). С. 25-28.
2. Разработка математической модели и технологии производства магнитомягких материалов для магнитопроводов перспективных высокоскоростных электродвигателей / С. А. Линьков, М. В. Чукин, А. Н. Шеметов [и др.] // *Актуальные проблемы современной науки, техники и образования: тезисы докладов 83-й междунар. науч.-техн. конф. Магнитогорск: Изд-во Магнитогорск. гос. техн. ун-та им. Г.И. Носова*, 2025. С. 40.
3. Maxwell J.C. Treatise on electricity and magnetism, 1873, vol. 1, 2, 1881.
4. Нетушил А.В. О расчете средней диэлектрической проницаемости смесей // *Научные доклады высшей школы. Электромеханика и автоматика*. 1959. № 1. С. 203-215.
5. Эдвэбник В.Г. К теории обобщенной проводимости смесей // *Современные проблемы науки и образования*. 2015. № 1-2. С. 76.
6. Wiener O. Zur Theorie der Stäbchendoppelbrechung. *Lepz. Akad. Ber.* 1909, 61, p.113.
7. Ландау Л. Д., Лифшиц Е. М. *Электродинамика сплошных сред*. М.: Гос. изд-во техн.-теор. лит., 1957. 652 с.
8. Свойства порошковых композиционных магнитомягких материалов электротехнического назначения / Е.В. Малая, А.С. Решенкин, Р.А. Гончаров, С.А. Воробьев // *Заготовительные производства в машиностроении*. 2015. №5. С. 45-48.
9. Comparison of high-torque electric motors with magnetic cores made of amorphous iron and electrotechnical steel / F. R. Ismagilov, V. E. Vavilov, R. R. Urazbakhtin [et al.] // *International Review of Electrical Engineering*. 2020, vol. 15, no. 2, pp. 126-133. DOI: 10.15866/iree.v15i2.17923.
10. Chattopadhyay A review of soft magnetic properties of mechanically alloyed amorphous and nanocrystalline powders / Alican Yakin, Tuncay Simsek, Baris Avar, Telem Simsek, Arun K. // *Emergent Materials*. 2023, no. 6, pp. 453-481. DOI: 10.1007/s42247-023-00485-0.

References

1. Linkov S.A., Sarvarov A.S., Bachurin I.V. Analysis of control systems for synchronous electric drives. *Elektrotehnicheskie sistemy i komplekсы* [Electrical Systems and Complexes]. 2014;(2(23));25-28. (In Russ.)
2. Linkov S.A., Chukin M.V., Shemetov A.N. et al. Development of a mathematical model and technology for the production of soft magnetic materials for the magnetic circuits of advanced high-speed electric motors. *Aktualnye problemy sovremennoy nauki, tekhniki i obrazovaniya: tezisy докладов 83-y mezhdu. nauch.-tekh. konf.* [Actual problems of modern science, technology, and education: abstracts of the 83rd International Scientific and Technical Conference]. Magnitogorsk: Publishing House of Nosov Magnitogorsk State Technical University, 2025, pp. 40. (In Russ.)
3. Maxwell J.C. Treatise on electricity and magnetism. 1873, vol. 1, 2, 1881.
4. Netushil A.V. On the calculation of the average dielectric constant of mixtures. *Nauchnye doklady vysshey shkoly. Elektromekhanika i avtomatika* [Scientific reports of higher education. Electromechanics and automation]. 1959;(1):203-215. (In Russ.)
5. Edvabnik V.G. To the theory of generalized conductivity of mixtures. *Sovremennye problemy nauki i obrazovaniya* [Modern problems of science and education]. 2015;(1-2):76. (In Russ.)
6. Wiener O. Zur Theorie der Stäbchendoppelbrechung. *Lepz. Akad. Ber.* 1909, 61, 113 p.
7. Landau L.D., Lifshits E.M. *Elektrodinamika sploshnykh sred* [Continuous media electrodynamics]. Moscow: State Publishing House of Technical and Theoretical Literature, 1957, 652 p. (In Russ.)
8. Malaya E.V., Reshenkin A.S., Goncharov R.A., Vorobyov S.A. Properties of powder composite magnetically soft materials for electricals. *Zagotovitelnye proizvodstva v mashinostroenii* [Procurement in Mechanical Engineering]. 2015;(5):45-48. (In Russ.)
9. Ismagilov F.R., Vavilov V.E., Urazbakhtin R. R. et al. Comparison of high-torque electric motors with magnetic cores made of amorphous iron and electrotechnical steel. *International Review of Electrical Engineering*. 2020;15(2): 26-133. DOI: 10.15866/iree.v15i2.17923.
10. Alican Yakin, Tuncay Simsek, Baris Avar, Telem Simsek, Arun K. Chattopadhyay. A review of soft magnetic properties of mechanically alloyed amorphous and nanocrystalline powders. *Emergent Materials*. 2023;(6):453-481. DOI: 10.1007/s42247-023-00485-0.

Поступила 27.11.2025; принята к публикации 09.12.2025; опубликована 25.12.2025
Submitted 27/11/2025; revised 09/12/2025; published 25/12/2025

Гулин Александр Евгеньевич — кандидат технических наук, старший научный сотрудник, Магнитогорский государственный технический университет им. Г.И. Носова, Магнитогорск, Россия. Email: walter_chel@mail.ru. ORCID 0000-0002-7722-4112.

Линьков Сергей Александрович — кандидат технических наук, доцент, Магнитогорский государственный технический университет им. Г.И. Носова, Магнитогорск, Россия. Email: xx_linkov@rambler.ru. ORCID 0000-0002-0774-3910.

Шеметов Андрей Николаевич — кандидат технических наук, ведущий научный сотрудник, Магнитогорский государственный технический университет им. Г.И. Носова, Магнитогорск, Россия. Email: shemetow-a-n@yandex.ru,. ORCID 0000-0001-7184-2190

Кувшинов Дмитрий Анатольевич — инженер, руководитель отдела, АО «НПО „Андройдная техника”», Магнитогорск, Россия. Email: dmitriy.kuvshinov@npo-at.com. ORCID 0009-0007-2313-2400.

Ефимов Сергей Владимирович — магистрант, Московский авиационный институт (национальный исследовательский университет), Москва, Россия. ORCID 0009-0004-7169-5898

Alexander E. Gulin – PhD (Eng.), Senior Researcher, Nosov Magnitogorsk State Technical University, Magnitogorsk, Russia. Email: walter_chel@mail.ru. ORCID 0000-0002-7722-4112.

Sergey A. Linkov – PhD (Eng.), Associate Professor, Nosov Magnitogorsk State Technical University, Magnitogorsk, Russia. Email: xx_linkov@rambler.ru. ORCID 0000-0002-0774-3910

Andrey N. Shemetov – PhD (Eng.), Lead Researcher, Nosov Magnitogorsk State Technical University, Magnitogorsk, Russia. Email: shemetow-a-n@yandex.ru. ORCID 0000-0001-7184-2190

Dmitriy A. Kuvshinov – Engineer, Head of Department, JSC SPA Android Technics, Magnitogorsk, Russia. Email: dmitriy.kuvshinov@npo-at.com. ORCID 0009-0007-2313-2400.

Sergey V. Efimov – Master’s Student, Moscow Aviation Institute (National Research University), Moscow, Russia. ORCID 0009-0004-7169-5898