

УДК 621.318.13

## ИССЛЕДОВАНИЕ СВОЙСТВ МАГНИТНО-МЯГКИХ КОМПОЗИЦИОННЫХ МАТЕРИАЛОВ В ЧАСТОТНОМ ДИАПАЗОНЕ ГАРМОНИЧЕСКИХ КОЛЕБАНИЙ ДО 100 кГц

Г. А. ГОВОР<sup>1)</sup>, А. О. ЛАРИН<sup>1)</sup>, В. М. ДОБРЯНСКИЙ<sup>2)</sup>

<sup>1)</sup>Научно-практический центр НАН Беларуси по материаловедению,  
ул. П. Бровки, 19, 220072, г. Минск, Беларусь

<sup>2)</sup>Белорусский государственный аграрный технический университет,  
пр. Независимости, 99, 220023, г. Минск, Беларусь

Исследованы динамические свойства композиционного магнитно-мягкого материала в диапазоне частот до 100 кГц при изменении толщины изоляционного слоя и размеров частиц железа. Показано, что с увеличением толщины изоляционного слоя потери на перемагничивание уменьшаются, но одновременно с этим имеет место снижение магнитной индукции насыщения и магнитной проницаемости. Следовательно, решение уменьшить потери за счет увеличения толщины изоляционного покрытия не всегда является оптимальным. Предпочтительнее достичь снижения потерь на перемагничивание путем повышения удельного сопротивления изоляционного слоя при его минимальной толщине.

**Ключевые слова:** композиционный материал; магнитно-мягкий материал; магнитные свойства; гистерезисные потери.

## INVESTIGATION OF THE PROPERTIES OF SOFT MAGNETIC COMPOSITE MATERIALS IN THE FREQUENCY RANGE OF HARMONIC OSCILLATIONS UP TO 100 kHz

G. A. GOVOR<sup>a</sup>, A. O. LARIN<sup>a</sup>, V. M. DOBRIANSKY<sup>b</sup>

<sup>a</sup>Scientific-Practical Materials Research Center, National Academy of Sciences of Belarus,  
19 P. Broŭki Street, Minsk 220072, Belarus

<sup>b</sup>Belarusian State Agrarian Technical University, 99 Niezalieŭnasci Avenue, Minsk 220023, Belarus  
Corresponding author: V. M. Dobriansky (dobryanval@mail.ru)

The dynamic properties of the soft magnetic composite material in the frequency range up to 100 kHz with a change in the thickness of the insulating layer and the size of iron particles were investigated. It is shown that with an increase in the thickness of the insulating layer, the loss for remagnetization decreases, but at the same time there is a decrease in the

### Образец цитирования:

Говор ГА, Ларин АО, Добрянский ВМ. Исследование свойств магнитно-мягких композиционных материалов в частотном диапазоне гармонических колебаний до 100 кГц. *Журнал Белорусского государственного университета. Физика.* 2020; 1:60–66.  
<https://doi.org/10.33581/2520-2243-2020-1-60-66>

### For citation:

Govor GA, Larin AO, Dobriansky VM. Investigation of the properties of soft magnetic composite materials in the frequency range of harmonic oscillations up to 100 kHz. *Journal of the Belarusian State University. Physics.* 2020;1:60–66. Russian.  
<https://doi.org/10.33581/2520-2243-2020-1-60-66>

### Авторы:

**Геннадий Антонович Говор** – доктор физико-математических наук; главный научный сотрудник лаборатории физики магнитных материалов.

**Артем Олегович Ларин** – аспирант лаборатории физики магнитных материалов. Научный руководитель – доктор физико-математических наук К. И. Янушкевич.

**Валерий Михайлович Добрянский** – доктор технических наук; профессор кафедры физики агроэнергетического факультета.

### Authors:

**Gennady A. Govor**, doctor of science (physics and mathematics); chief researcher at the laboratory of physics of magnetic materials.

[govor@physics.by](mailto:govor@physics.by)

**Artem O. Larin**, postgraduate student at the laboratory of physics of magnetic materials.

[new\\_a-larin@mail.ru](mailto:new_a-larin@mail.ru)

**Valery M. Dobriansky**, doctor of science (engineering); professor at the department of physics, agro-power faculty.

[dobryanval@mail.ru](mailto:dobryanval@mail.ru)

<http://orcid.org/0000-0002-7059-6992>

magnetic value of the saturation induction and magnetic permeability. Therefore, that the decision to reduce losses by increasing the thickness of the insulating coating is not always the best solution. It is preferable to achieve a reduction losses for remagnetization due to an increase in the specific resistance of the insulating layer with its minimum thickness.

**Keywords:** composite material; soft magnetic material; magnetic properties; hysteresis loss.

## Введение

Частотный диапазон гармонических колебаний до 100 кГц является наиболее востребованным и часто используемым в практике магнитных материалов для построения всякого рода источников питания, инверторных преобразователей различного назначения и др. Представляет интерес изучение поведения в этом частотном диапазоне композиционных магнитно-мягких материалов в целях определения возможности их применения наряду с другими магнитными материалами. В [1; 2] были рассмотрены статические свойства композиционных магнитно-мягких материалов в сравнении с характеристиками листовой стали. В [3–5] изучена возможность использования композиционных материалов для построения электромоторов и других изделий на промышленных частотах 50–60 Гц. Продолжением этих работ является изучение динамических характеристик данных материалов в более широком частотном интервале.

Цель настоящей работы – исследование свойств композиционных магнитно-мягких материалов, в первую очередь частотных зависимостей потерь на перемагничивание в диапазоне гармонических колебаний до 100 кГц при различных толщинах изоляционных покрытий железного порошка.

## Методика эксперимента

Технология получения изолированных порошков магнитно-мягких материалов и изготовления из них изделий представляет собой многостадийный процесс, включающий следующие основные операции:

1) предварительную подготовку исходных порошков – очистку поверхности (в том числе высокотемпературную очистку), воздушную сепарацию порошка по размерным фракциям;

2) пассивацию порошков (защита от окисления) – нанесение на поверхность частиц порошка защитных компонентов. На настоящем этапе данная операция в стадии доработки и совершенствования. Для пассивации и защиты используются добавки высокотемпературных силиконовых лаков в количестве 0,25 % от веса порошка [6];

3) реакционное нанесение изоляционных покрытий из газовой фазы в вакууме при температуре 150–200 °С. В работе исследовались композиционные материалы на основе железных порошков ASC100.29, обработанных раствором ортофосфорной кислоты в этаноле для получения изоляционного покрытия. По магнитным параметрам такие материалы несколько лучше тех, которые обрабатываются растворами оксидов кремния, хрома или бора;

4) смазку изолированного порошка с помощью добавления раствора торфяного воска (*peat wax*) в количестве 0,15 % от исходного веса порошка;

5) изготовление изделий путем гидростатического прессования изолированных порошков в специальных пресс-формах под давлением 0,7–0,8 ГПа при нормальных условиях. Далее изделия подвергаются термообработке, их физические параметры нормализуются. Отжиг образцов производится при температуре 400 °С в вакууме или на воздухе в зависимости от требований.

Одним из главных достоинств рассматриваемой технологии (даже с учетом того, что технология в стадии доработки) является возможность равномерного нанесения защитных и изоляционных покрытий различного состава в широком диапазоне (от нанометров до микрометров). Кроме того, изделия из композиционного материала сохраняют размеры после прессования и последующего отжига.

Для исследования магнитных свойств изготавливались образцы композиционного магнитного материала в виде колец размером 24 × 13 × 8 мм методом порошковой металлургии путем прессования изолированного порошка и последующего отжига в вакууме при 400 °С. Также изготовлены образцы с использованием железного порошка ASC100.29 с размерами частиц  $d > 0,1$  мкм и  $d < 0,1$  мкм и со средней толщиной изоляции на основе оксида фосфора ~1 нм, а также образцы на основе ASC100.29 ( $d < 0,05$  мкм) с толщиной изоляционного слоя 10; 20 и 30 нм.

Измерения магнитных свойств выполнялись на экспресс-магнетометре, где по кривым перемагничивания образцов определялись потери и остальные магнитные параметры.

Динамические характеристики композиционных магнитно-мягких материалов в частотном диапазоне до 100 кГц исследовались на установке, где в качестве силового элемента применялся низкочастотный усилитель TDA7293 мощностью 140 Вт (рис. 1). Входной сигнал от генератора ГЗ-112 («Радиоприбор», Россия) усиливался и подавался на вход исследуемого сердечника, вторичная обмотка которого нагружалась активным сопротивлением 6 и 9 Ом. Выходные параметры контролировались двухканальным электронным цифровым осциллографом 2102СЕХ. Температура сердечника на открытом его участке измерялась электронным термометром TP 101.

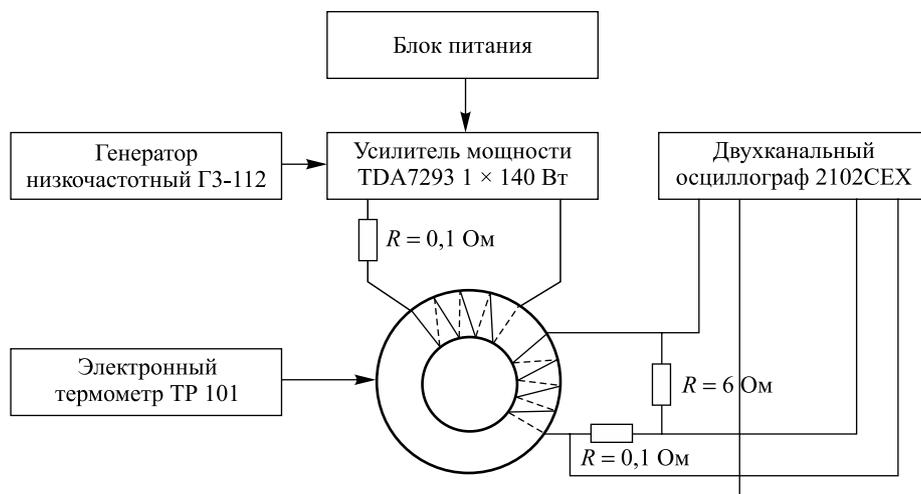


Рис. 1. Схема исследования динамических свойств композиционных магнитно-мягких материалов

Fig. 1. The scheme for research of the dynamic properties of soft magnetic composite materials

Нагрев сердечника контролировался в течение 10 мин на частотах 1; 5; 10; 25; 50 и 100 кГц при сохранении постоянной потребляемой мощности. Мощность  $W$  на нагрузке определялась с учетом угла сдвига  $\varphi$  на кривых напряжения  $U_{ef}$  и тока  $I_{ef}$ :

$$W = U_{ef} I_{ef} \cos \varphi.$$

Расчетный вклад взаимной индукции в общую мощность на частоте 100 кГц не превышает 1 %, экспериментально измеренный несколько больше – порядка 3 %. При меньших частотах вклад взаимной индукции можно не учитывать.

На начальном участке кривой процесс нагрева сердечника можно считать адиабатным, практически без отвода тепла. В этом случае удельные потери  $w$  на перемагничивание сердечника определяются как [7]

$$w = q \frac{\Delta T}{\Delta t},$$

где  $q$  – удельная теплоемкость композиционного материала;  $\frac{\Delta T}{\Delta t}$  – скорость нагрева сердечника.

### Результаты и их обсуждение

Исследованы кривые намагничивания композиционного магнитно-мягкого материала на основе железного порошка (рис. 2). К примеру, композиционный материал, полученный с использованием железного порошка ASC100.29 с  $d > 0,1$  мм (слой изоляции 1 нм), имеет следующий весовой состав, %:

|    |      |    |      |    |       |
|----|------|----|------|----|-------|
| Al | 0,2  | P  | 0,25 | Mn | 0,42  |
| Si | 0,32 | Cr | 0,08 | Fe | 98,73 |

Средние величины толщины изоляции для других составов рассчитывались исходя из процентного содержания фосфора в железных порошках.

Как видно из рис. 2, увеличение толщины изоляции приводит к значительному снижению максимального значения магнитной индукции.

Из данных рис. 3 следует, что увеличение толщины изоляционного слоя приводит, с одной стороны, к понижению максимальной индукции и магнитной проницаемости, а с другой стороны, – к заметному уменьшению потерь на перемагничивание материала.

На рис. 4 показаны кривые нагрева сердечника при активной нагрузке и мощности 50 Вт. Скорость нагрева определялась по усредненным значениям во временном промежутке от 100 до 400 с, для которого нагрев можно считать адиабатным процессом.

Зависимости изменения магнитной индукции и удельных потерь от частоты при гармонических колебаниях приведены на рис. 5.

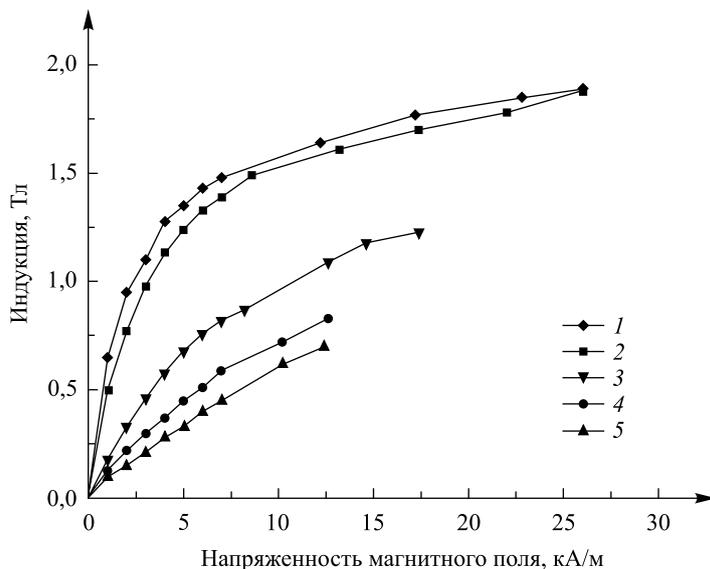


Рис. 2. Кривые намагничивания композиционного материала на основе железного порошка ASC100.29 с размером частиц  $d > 0,1$  мм (1),  $d < 0,1$  мм (2),  $d < 0,05$  мм (3–5) и слоем изоляции 1 нм (1, 2), 10 нм (3), 20 нм (4) и 30 нм (5)

Fig. 2. Magnetization curves of composite material based on ASC100.29 iron powder with a particle size of  $d > 0.1$  mm (1),  $d < 0.1$  mm (2),  $d < 0.05$  mm (3–5) and insulation layer 1 nm (1, 2), 10 nm (3), 20 nm (4) and 30 nm (5)

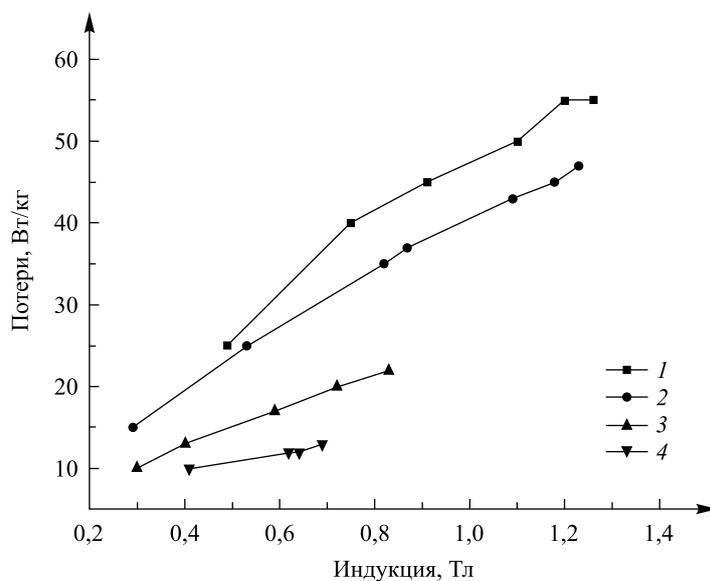


Рис. 3. Потери на перемагничивание на частоте 1 кГц для композиционного материала на основе железного порошка ASC100.29 с  $d < 0,1$  мм (1),  $d < 0,05$  мм (2–4) и толщиной изоляции 1 нм (1), 10 нм (2), 20 нм (3) и 30 нм (4)

Fig. 3. Losses for remagnetization at a frequency of 1 kHz for composite material based on iron powder ASC100.29 with  $d < 0.1$  mm (1),  $d < 0.05$  mm (2–4) and insulation thickness 1 nm (1), 10 nm (2), 20 nm (3) and 30 nm (4)

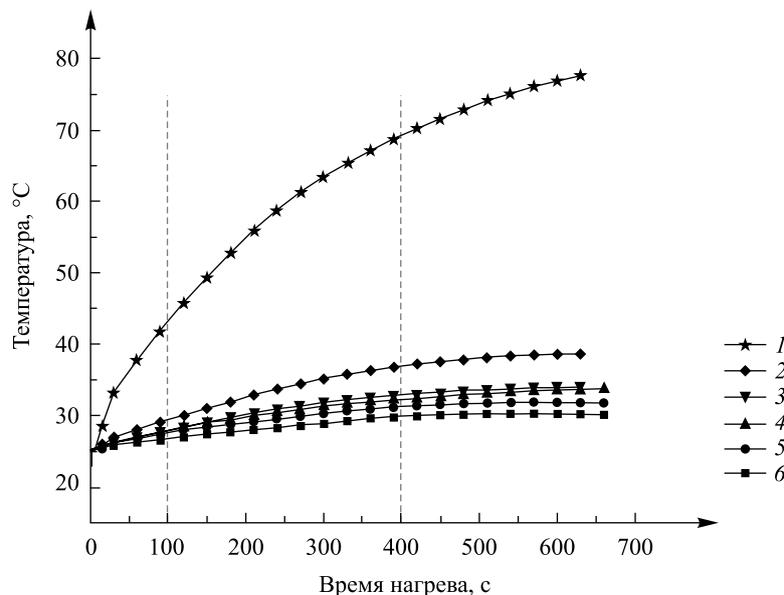


Рис. 4. Кривые нагрева сердечников композиционного магнитно-мягкого материала при постоянной напряженности магнитного поля (3 кА/м) на основе порошка ASC100.29 ( $d < 0,1$  мм) со средней толщиной изоляции 1 нм на частоте 1 кГц (1), 5 кГц (2), 10 кГц (3), 25 кГц (4), 50 кГц (5) и 100 кГц (6)  
 Fig. 4. Heating curves of the cores of a soft magnetic composite material at constant magnetic field strength 3 kA/m based on powder ASC100.29 ( $d < 0.1$  mm) insulation with an average thickness of 1 nm at a frequency of 1 kHz (1), 5 kHz (2), 10 kHz (3), 25 kHz (4), 50 kHz (5) and 100 kHz (6)

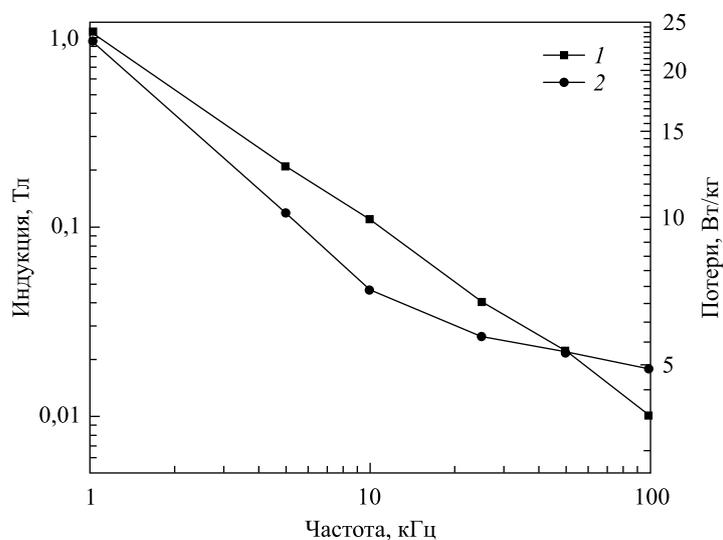


Рис. 5. Изменение индукции (1) и удельных потерь (2) в зависимости от частоты при гармонических колебаниях для композиционного материала на основе порошка ASC100.29 ( $d < 0,1$  мм) при постоянной напряженности магнитного поля (3 кА/м)  
 Fig. 5. The change in induction (1) and the magnitude of specific losses (2) from frequency with harmonic oscillations for a composite material based on powder ASC100.29 ( $d < 0.1$  mm) at constant magnetic field strength (3 kA/m)

На рис. 6 приведены кривые частотных зависимостей потерь при гармонических колебаниях, из которого видно, что для всех значений магнитной индукции (от 0,25 до 1,5 Тл) наблюдается экспоненциальный рост потерь с увеличением частоты.

Из рис. 7 можно сделать вывод, что величина потерь на перемагничивание с увеличением толщины изоляционного слоя уменьшается.

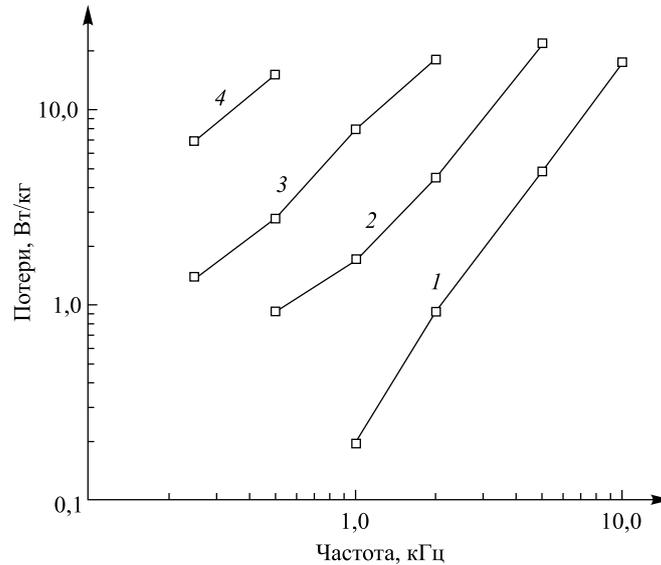


Рис. 6. Зависимость величины потерь от частоты при гармонических колебаниях для композиционного материала на основе порошка ASC100.29 ( $d < 0,05$  мм, толщина изоляции  $\sim 1$  нм) при изменении магнитной индукции 0,25 Тл (1), 0,5 Тл (2), 1,0 Тл (3), 1,5 Тл (4)

Fig. 6. Dependence of frequency losses with harmonic oscillations for a composite material based on ASC100.29 ( $d < 0.05$  mm powder, insulation thickness  $\sim 1$  nm) with a change in magnetic induction of 0.25 T (1), 0.5 T (2), 1.0 T (3), 1.5 T (4)

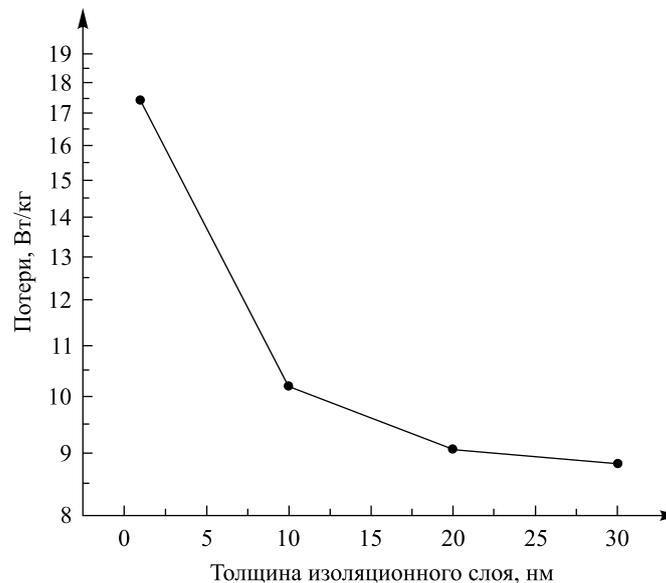


Рис. 7. Зависимость величины удельных потерь от толщины изоляционного покрытия на частоте 10 кГц при изменении индукции, равном 0,25 Тл

Fig. 7. The dependence of specific losses on the thickness of the insulation coating at a frequency of 10 kHz with a change in induction 0.25 T

### Заключение

Из приведенных данных следует, что увеличение толщины изоляционного слоя приводит, с одной стороны, к уменьшению значений максимальной индукции и магнитной проницаемости, а с другой стороны, – к заметному снижению потерь на перемагничивание материала в исследуемом частотном диапазоне до 100 кГц. Указанные потери во многом определяются как величиной удельного сопротивления изоляционного покрытия, так и интегральным сопротивлением изоляционного слоя, связанным с его толщиной. В результате на частоте перемагничивания, к примеру, 10 кГц и при изменении индукции

на 0,25 Тл достичь уменьшения потерь в 2 раза можно при увеличении толщины изоляции в 30 раз – от 1 до 30 нм. При этом величина индукции в магнитном поле 10 кА/м уменьшается в 2,7 раза – от 1,6 до 0,6 Тл.

Таким образом, решение снизить потери за счет повышения толщины изоляционного покрытия не является оптимальным. Предпочтительнее уменьшать потери на перемагничивание за счет увеличения удельного сопротивления изоляционного слоя при его минимальной толщине.

### Библиографические ссылки

1. Говор ГА, Ларин АО. Магнитные свойства низкочастотного композиционного магнитно-мягкого материала. *Перспективные материалы*. 2018;7:43–48. DOI: 10.30791/1028-978X-2018-7-43-48.
2. Говор ГА, Михневич ВВ. Композиционные магнитно-мягкие материалы на основе порошков железа. *Неорганические материалы*. 2007;43(7):805–807.
3. Говор ГА, Вечер АК, Митюк ВИ. Композиционные магнитно-мягкие материалы на основе порошков железа и перспективы их применения в технике. *Металлофизика и новейшие технологии*. 2012;34(4):439–444.
4. Grande MA, Ferraris L, Francisci F, Poskovic E. New SMC material for small electric machine. *IEEE Transaction on Industry Applications*. 2018;54(1):195–203.
5. Xinran Y, Yongjian L, Qingxin Y, Changgeng Z, Yang L, Xuehai G. Research of harmonic effects on core losses in SMC materials. *IEEE Transaction on Magnetic*. 2018;55(2):1–5. DOI: 10.1109/TMAG.2018.2869659.
6. Говор ГА (Беларусь), Митюк ВИ (Беларусь), Тамонов АВ (Россия), правообладатели. Способ изготовления композиционного магнитно-мягкого материала. Российская Федерация, патент 2465669. 27 октября 2012 г.
7. Сычев ВВ. *Сложные термодинамические системы*. Москва: Наука; 1980. 208 с.

### References

1. Govor GA, Larin AO. [The magnetic properties of a magnetically soft composite material for use in the low-frequency range]. *Perspektivnyye materialy*. 2018;7:43–48. DOI: 10.30791/1028-978X-2018-7-43-48. Russian.
2. Govor GA, Mihnevich VV. [Composite soft magnetic materials based on iron powders]. *Neorganicheskie materialy*. 2007;43(7):805–807. Russian.
3. Govor GA, Vecher AK, Mityk VI. [Composite soft magnetic materials based on iron powders and prospects for their use in engineering]. *Metallofizika i noveishie tekhnologii*. 2012;34(4):439–444. Russian.
4. Grande MA, Ferraris L, Francisci F, Poskovic E. New SMC material for small electric machine. *IEEE Transaction on Industry Applications*. 2018;54(1):195–203.
5. Xinran Y, Yongjian L, Qingxin Y, Changgeng Z, Yang L, Xuehai G. Research of harmonic effects on core losses in SMC materials. *IEEE Transaction on Magnetic*. 2018;55(2):1–5. DOI: 10.1109/TMAG.2018.2869659.
6. Govor GA (Belarus), Mityk VI (Belarus), Tamonov AV (Russia), inventors. A method of manufacturing a soft magnetic composite material. Russian Federation patent 2465669. 2012 October 27. Russian.
7. Sychov VV. *Slozhnie termodinamicheskie sistemy* [Complex thermodynamic systems]. Moscow: Nauka; 1980. 208 p. Russian.

Статья поступила в редколлегию 11.11.2019.  
Received by editorial board 11.11.2019.