DOI: 10.24411/2076-6785-2020-10120 УДК 621.311.001.57 | Научная статья

К вопросу об эффективности применения аморфной стали в магнитопроводах инновационных силовых трансформаторов

Проничев А.В.[1], **Казанцев А.А.**[2], **Ветлугин М.Н.**[2]
[1]ООО «СамараНИПИнефть», Самара, Россия, [2]ФГБОУ ВО «СамГТУ», Самара, Россия
pronichevAV@samnipi.rosneft.ru

Аннотация

Потери электроэнергии в электроустановках электрических сетей и систем электроснабжения — это с точки зрения закона сохранения энергии неизбежные энергетические затраты на обеспечение физической сущности процессов передачи и распределения электроэнергии. В современных условиях потери электроэнергии и мощности можно снизить применением в конструкциях силовых трансформаторов следующих инновационных решений: использование эффекта сверхпроводимости низко- и высокотемпературной, внедрение новых эффективных способов формирования основного магнитного потока с помощью аморфных ферромагнитных материалов и применение комбинированных конструкций силовых трансформаторов, сочетающих в себе перечисленные выше решения. В работе произведено моделирование традиционного силового трансформатора и трансформатора с аморфным магнитопроводом в пакете программ Ansys Maxwell. Получены значения потерь активной мощности на вихревые токи, а также картины распределения напряженности магнитного поля и магнитной индукции. Проведены экспериментальные расчеты зависимости характеристик трансформатора с сердечником из аморфной стали от температуры окружающей среды, с учетом нахождения магнитопровода в криогенной среде. Применение аморфной стали в конструкции магнитопровода позволяет снизить потери на вихревые токи. Доказан положительный эффект при работе аморфного магнитопровода в условиях низких температур.

Материалы и методы

В пакете программ Ansys Maxwell методом конечных элементов произведены расчеты потерь активной мощности на вихревые токи в сердечнике традиционного силового трансформатора (ТСТ) и трансформатора с аморфным магнитопроводом (АМТ). Проведен экспериментальный анализ зависимости токовых характеристик аморфного магнитопровода от температуры, в том числе с учетом нахождения магнитопровода в криогенной среде. В качестве входного сигнала использовался меандр, снятие характеристик производилось цифровым осциллографом.

Ключевые слова

трансформатор, энергосбережение, потери, энергоэффективность, аморфные магнитные материалы, высокотемпературные сверхпроводниковые материалы

Для цитирования

Проничев А.В., Казанцев А.А., Ветлугин М.Н. К вопросу об эффективности применения аморфной стали в магнитопроводах инновационных силовых трансформаторов // Экспозиция Нефть Газ. 2020. № 6. С. 103–107 . DOI: 10.24411/2076-6785-2020-10120

Поступила в редакцию: 10.11.2020

UDC 621.311.001.57 | Original Paper

On the question of the amorphous steel use effectiveness in the magnetic core of an innovation power transformers

Pronichev A.V.[1], **Kazantzev A.A.**[2], **Vetlugin M.N.**[2]
[1]"SamaraNIPIneft" LLC, Samara, Russia, [2]Samara State Technical University, Samara, Russia
pronichevAV@samnipi.rosneft.ru

Abstract

The loss of electricity in electric installations of electrical networks and power supply systems is, from the point of view of energy conservation law, the inevitable energy and economic costs of ensuring the physical essence of the above technological processes. In modern conditions, the loss of electricity and power can be reduced by using the following innovative solutions in power transformer designs: the use of the superconductivity effect of low- and high-temperature, the introduction of new efficient methods for the formation of the main magnetic flux by means of amorphous ferromagnetic materials and the use of combined structures of power transformers combining the above the solution. In the article, the simulation of a traditional power transformer (TPT) and a transformer with an amorphous magnetic core (ACT) in the Ansys Maxwell software package is carried out. The values of active power losses due to eddy currents, as well as the distribution patterns of the magnetic field strength and magnetic induction are obtained. Experimental calculations of the dependence of the characteristics of a transformer with an amorphous steel core on the ambient temperature, taking into account the location of the magnetic circuit in a cryogenic medium, have been carried out. The use of amorphous steel in the design of the magnetic circuit will reduce the no-load losses. A positive effect has been proven when an amorphous magnetic core operates at low temperatures.

Materials and methods
In the Ansys Maxwell software package, the finite element method was used to calculate the active power losses due to eddy currents in the core of a traditional power transformer (TPT) and a transformer with an amorphous magnetic circuit (ACT).
An experimental analysis of the amorphous magnetic circuit current characteristics dependence on temperature is carried out, including taking into account the location of the magnetic circuit in a cryogenic medium. A meander was used as an input signal; the characteristics were taken with a digital oscilloscope.

Keywords
transformer, power saving, slips, energy efficiency, amorphous magnetic materials, high-temperature superconductor materials

For citation
Pronichev A.V., Kazantzev A.A., Vetlugin M.N. On the question of the amorphous steel use effectiveness in the magnetic core of an innovation power transformers. Exposition Oil Gas, 2020, issue 6, P. 103–107. (In Russ). DOI: 10.24411/2076-6785-2020-10120

Received: 10.11.2020

В последние годы во всех отраслях экономики отмечается значительный рост объема и плотности электропотребления в системах электроснабжения. При этом существует острая проблема высокого уровня нормируемых технологических потерь электрической энергии. С учетом жестких требований по его качеству и надежности наиболее эффективным и кардинальным техническим решением этой проблемы является применение инновационного электрооборудования. Для подстанций это ТСТ, обмотки которых выполняются с использованием явления высокотемпературной сверхпроводимости, а сердечники — из аморфных ферромагнитных материалов. Такие решения используются в конструкциях силовых трансформаторов (СТ) как по отдельности, так и совместно.

Всё это особенно актуально для напряженных и ответственных систем электроснабжения нефтяных месторождений. Можно констатировать, что перечисленные мероприятия пока не имеют широкого применения в существующих системах электроснабжения. Это связано с тем, что отечественная электротехническая промышленность практически еще не освоила производство названного электрооборудования, а зарубежное электрооборудование по многим причинам еще не получило должного распространения. Кроме того, отсутствует нормативная база по созданию и эксплуатации перспективных систем электроснабжения, включающих в себя инновационное электрооборудование и, прежде всего, то, что связано с построением адекватных математических моделей для анализа их рабочих режимов [1–8].

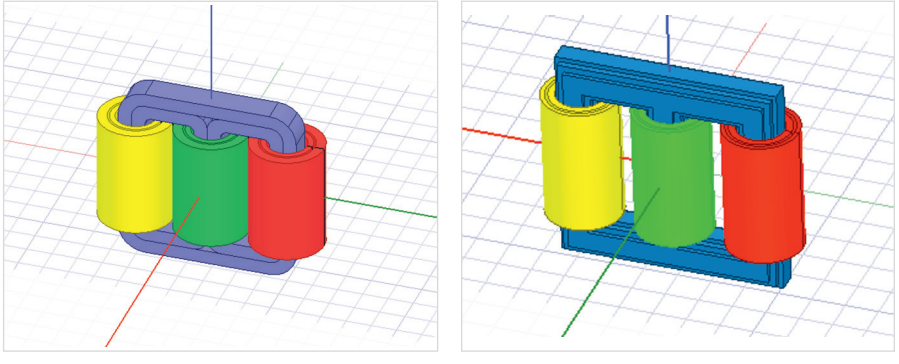
В данной работе рассматривается аморфный сплав марки 1СР АМЕТ. В отличие от традиционной электротехнической стали он обладает следующими свойствами:

- высокая магнитная проницаемость;
- малая коэрцитивная сила;
- высокая индукция насыщения;
- высокое удельное сопротивление.

Первые два свойства обеспечивают низкие потери на гистерезис, а последние — низкие потери на вихревые токи [9]. Высокое удельное сопротивление материала является основным критерием для обеспечения низких потерь на вихревые токи. Магнитное поле, создаваемое обмотками, пронизывает магнитопровод. Под действием

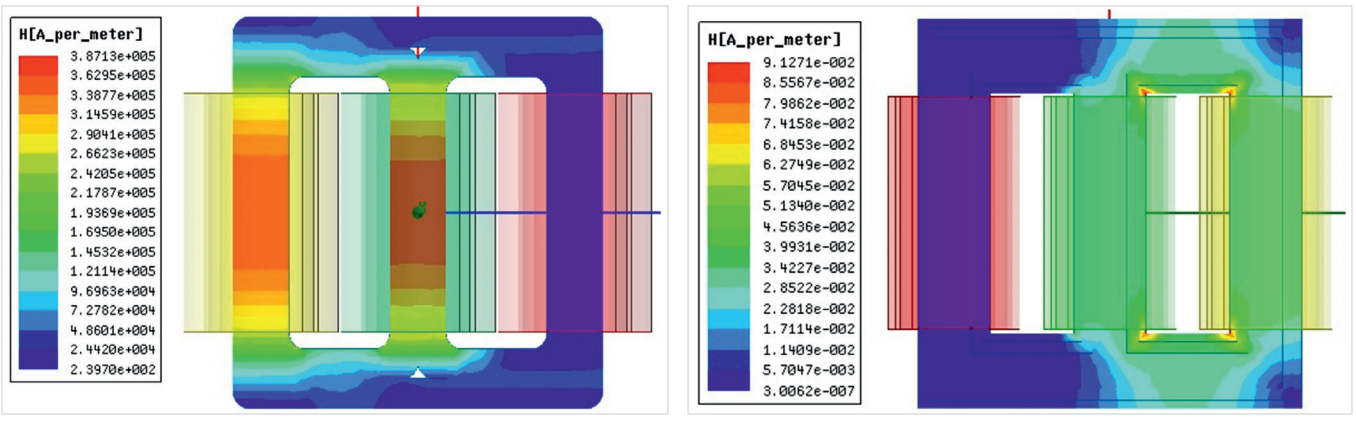
Таб. 1. Магнитные свойства рассматриваемых материалов
Tab. 1. Magnetic properties of the materials under consideration

Материал	Холоднокатаная электротехническая сталь 3404	Аморфный сплав
Магнитная индукция насыщения, Тл	2,04	1,56
Магнитная проницаемость, Гн/м	7500	150000



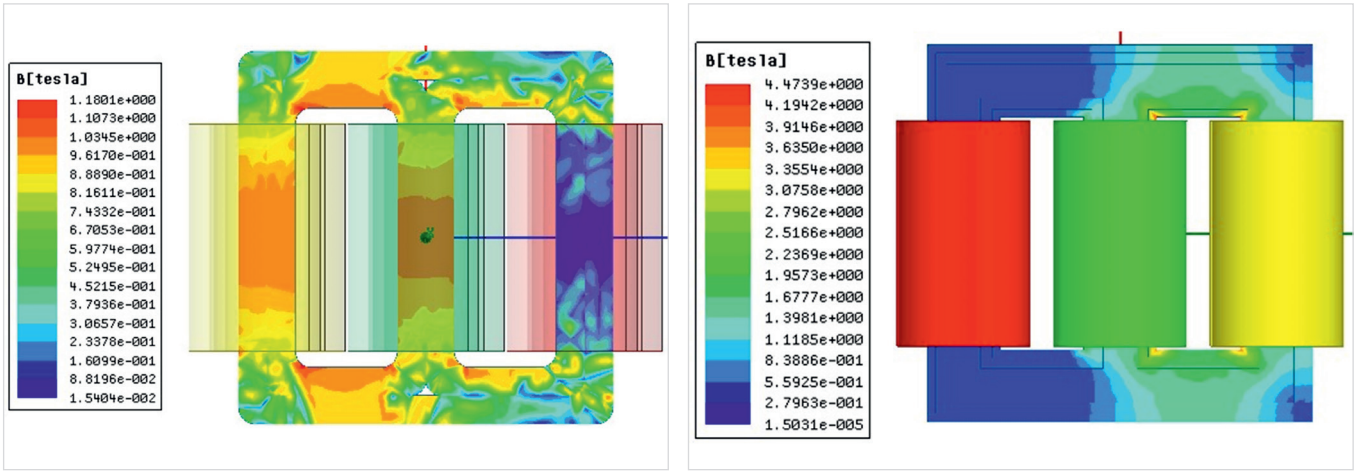
А) *Б)*

Рис. 1. Модели АМТ (А) и ТСТ (Б), выполненные в программном пакете Ansys Maxwell
Fig. 1. Models ACT (A) and TPT (B) made in the Ansys Maxwell software package



А) *Б)*

Рис. 2. Распределение напряженности магнитного поля в АМТ (А) и в ТСТ (Б)
Fig. 2. Distribution of magnetic field strength a ACT (A) and TPT (B)



А) *Б)*

Рис. 3. Распределение магнитной индукции в АМТ (А) и ТСТ (Б)
Fig. 3. Distribution of magnetic induction in ACT (A) and TPT (B)



Рис. 4. Сравнение потерь на вихревые токи в АМТ и ТСТ
Fig. 4. Comparison of eddy current losses in ACT and TPT

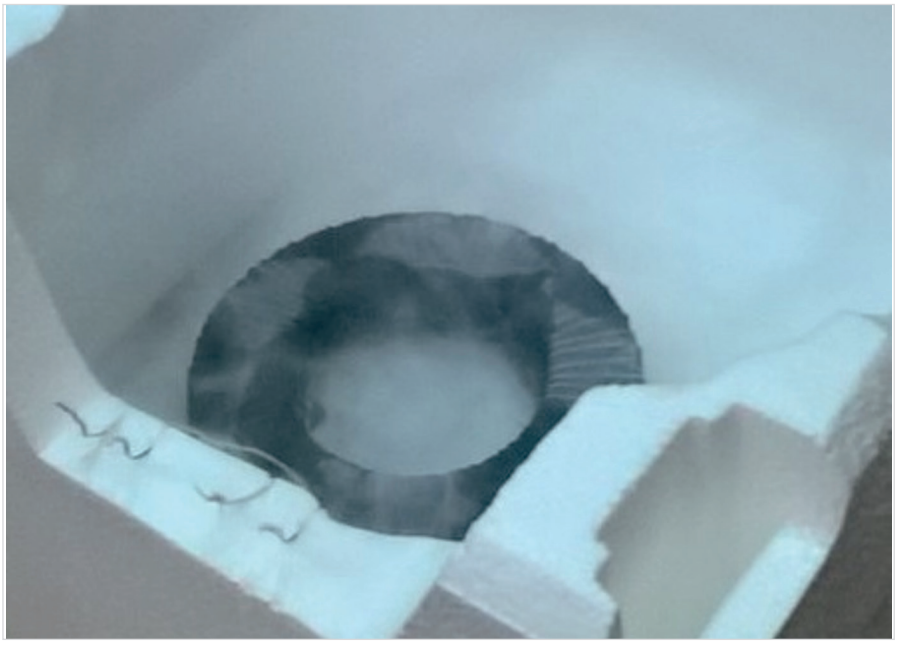


Рис. 5. Испытуемый образец трансформатора в ходе подготовки к замерам в криостате с жидким азотом
Fig. 5. Test sample of the transformer in preparation for measurements in a cryostat with liquid nitrogen

изменяющегося магнитного поля возникают токи Фуко. Так как сопротивление магнитопровода велико, то сила индукционного тока будет мала. Принимая во внимание правило Ленца, токи в магнитопроводе, наведенные обмотками, протекают таким образом, чтобы в наибольшей мере противодействовать причине, вызывающей их протекание. Это говорит о том, что высокое удельное сопротивление будет обеспечивать низкие потери на вихревые токи.

Целью данной работы является определение магнитных характеристик аморфной стали в конструкции магнитопровода силового трансформатора для снижения потерь холостого хода как значительной части технических потерь электрической энергии и мощности в электроэнергетических системах.

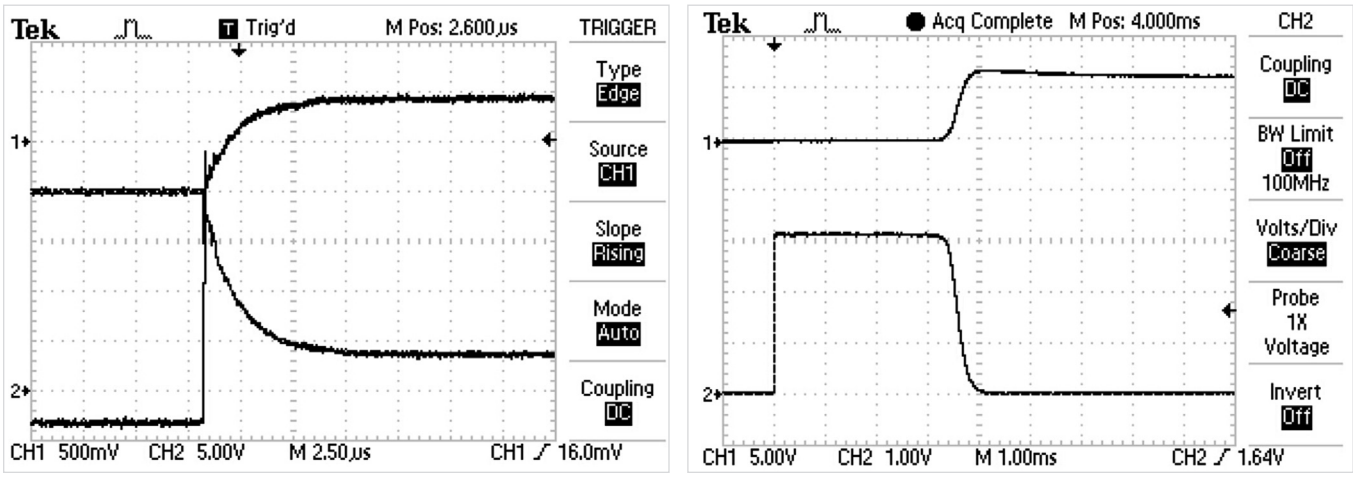
В рамках данной работы в программном пакете Ansys Maxwell были созданы математические модели АМТ и ТСТ (рис. 1). Существенные различия данных конструкций заключаются в магнитопроводе. У АМТ магнитопровод выполнен из листов аморфного сплава толщиной всего 0,035 мм. У ТСТ магнитопровод выполнен из листов холоднокатаной электротехнической стали 3404, толщина которой 0,35 мм.

Для расчетов потерь на вихревые токи были заданы следующие свойства для марки сплава АМТ и марки стали ТСТ:

- зависимость магнитной индукции от напряженности магнитного поля;
- плотность материала;
- проводимость;
- зависимость потерь от магнитной индукции.

Также в модели были учтены магнитные свойства для марки сплава АМТ и марки стали ТСТ, которые представлены в таблице 1.

Расчет потерь активной мощности, распределения напряженности магнитного поля, а также магнитной индукции производился методом конечных элементов. Метод основан на разбиении спроектированных моделей АМТ и ТСТ, состоящих из сплошных тел, на конечные элементы исчислимого количества. Расчет заключается в аппроксимации дискретной модели, которая создается из



А) *Б)*

Рис. 6. Осциллограмма тока в цепи (CH1) и падения напряжения на вторичной обмотке (CH2) при нормальных условиях (А) и в криогенной среде (Б)
Fig. 6. Oscillogram of the current in the circuit (CH1) and the voltage drop across the secondary winding (CH2) under normal conditions (A) and in a cryogenic environment (B)

множества кусочно-непрерывных функций определенных в конечном числе подобластей (элементов).

Результаты моделирования представлены на рисунках 2 и 3. Магнитная индукция и напряженность магнитного поля у АМТ на порядок выше, что говорит о его лучших магнитных характеристиках в сравнении с ТСТ.

По результатам моделирования для АМТ и ТСТ были построены графики зависимости потерь активной мощности на вихревые токи в сердечнике силового трансформатора от времени (рис. 4).

Из графика видно, что потери в трансформаторе с аморфным магнитопроводом значительно ниже, чем в традиционном силовом трансформаторе. Среднее значение потерь на вихревые токи для ТСТ составило 290,5 Вт. Для АМТ — 41,9 Вт. Проведенные расчеты позволяют судить о том, что потери холостого хода в АМТ почти в 7 раз меньше, чем в ТСТ.

При использовании аморфного магнитопровода совместно со сверхпроводниковыми обмотками возможны две разные конструкции, отличающиеся конструкцией криостата. В первом случае в криостат помещаются только обмотки трансформатора, а магнитопровод находится при нормальных условиях (теплое исполнение). Во втором случае в криостат помещаются магнитопровод с обмотками целиком. В связи с этим вопрос изменения магнитных свойств аморфного магнитопровода и влияние этого изменения на передаточную функцию всего трансформатора представляет научный интерес.

Для опытного анализа токовых характеристик аморфного магнитопровода в зависимости от его температуры авторским коллективом был собран экспериментальный тороидальный трансформатор (рис. 5) с габаритами 120:80:20 мм с магнитопроводом из ленточной аморфной стали. Обе обмотки выполнены проводом марки ПЭЛШКО диаметром 1 мм. Эксперимент проводился при температуре кипения жидкого азота (77, 4К).

В качестве входного сигнала использовался меандр с генератора НЧ ГЗ-112. Снятие характеристик производилось цифровым осциллографом Hantek idso1070a. Как видно из рисунка 6, передаточная функция аморфного магнитопровода обладает высоким качеством, о чем свидетельствует малый сдвиг между входным и выходным сигналом напряжений. Данное явление вызвано очень высокой начальной магнитной проницаемостью. Необходимо сравнить начальный участок характеристики на осциллограмме 6А при нормальных условиях с нисходящей частью осциллограммы 6Б, отвечающей криогенному состоянию, — оба графика показывают один переходный процесс, описывающий реакцию вторичной обмотки на установление магнитного потока при проистечении в цепи первичной обмотки входного токового сигнала. Схожие по амплитуде, но разные по величине падения напряжения на активном сопротивлении вторичной обмотки позволяют сказать, что изменение температуры аморфного магнитопровода влияет на его магнитные параметры в лучшую сторону, но не значительно.

Итоги

Из результатов моделирования видно, что энергоэффективность инновационных трансформаторов значительно выше, чем энергоэффективность трансформаторов с традиционным исполнением магнитопровода и обмоток. Применение аморфной стали в конструкции магнитопровода распределительного силового трансформатора позволит снизить потери холостого хода, тем самым благотворно повлиять на экономические показатели эксплуатации месторождений нефти и газа. В ходе работы доказано, что помещение магнитопровода из аморфной стали в криогенную среду не приводит к ухудшению его характеристик. Это позволяет судить о возможности создания комбинированной конструкции силового трансформатора с совмещенным расположением аморфного магнитопровода со сверхпроводниковыми обмотками внутри криостата.

Выводы

Проведенные в рамках данной работы исследования позволяют прийти к заключению о том, что введение в эксплуатацию силовых распределительных трансформаторов с магнитопроводами из аморфных сплавов, высокотемпературных сверхпроводниковых трансформаторов и их комбинированной конструкции является одним из наиболее перспективных путей снижения технических потерь в электрических сетях нефтегазовых месторождений. В компаниях нефтегазового сектора [10], электросетевых компаниях [11, 12] введены рекомендации по применению энергосберегающего оборудования, что создает предпосылки для дальнейшего роста отечественной производственной базы и развития технологий производства трансформаторов с магнитопроводом из аморфной стали.

Литература

1. Савинцев Ю.М. Анализ состояния производства в РФ силовых масляных СТ I-III габаритов // Электрооборудование: эксплуатация и ремонт. 2012. № 1. С. 43–53.
2. Александров Н.В. Исследование влияния сверхпроводниковых трансформаторов на режимы электроэнергетических систем. Новосибирск: НГТУ, 2014. 155 с.
3. Dai S., Ma T., Qiu Q., Zhu Z., Teng Yu., Hu L. Development of a 1250-kVA superconducting transformer and its demonstration at the superconducting substation. IEEE Transactions on applied superconductivity, 2016, Vol. 26, issue 1, P. 1–7.
4. Lapthorn A.C., Wade G.E., Bodger P.S. HTS transformer: Construction details, test results, and noted failure mechanisms. IEEE Transactions on Power Delivery, 2011, Vol. 26, issue 1, P. 394–399.
5. Кузнецов Д.В., Гольдштейн В.Г. Совершенствование концепции и методов организации энергоснабжения мегаполисов // Промышленная энергетика. 2014. № 2. С. 7–12.
6. Манусов В.З., Александров Н.В. Ограничение токов короткого замыкания с помощью

трансформаторов с высокотемпературными сверхпроводящими обмотками // Известия ТПУ. 2013. Т. 323. № 4. С. 100–105.
7. Berger A., Cherevatskiy S., Noe M., Leibfried T. Comparison of the efficiency of superconducting and conventional transformers. Journal of Physics: Conference Series 2010, Vol. 234, Part 3.
8. Инаходова Л.М., Гольдштейн В.Г., Казанцев А.А. О проблемах энергосбережения и повышения энергоэффективности при применении современных силовых трансформаторов // Известия высших учебных заведений. Электромеханика. 2014. № 5. С. 107–111.
9. Гольдштейн В.Г., Инаходова Л.М., Казанцев А.А., Молочников Е.Н. Анализ эксплуатационных свойств трансформаторов с сердечниками из аморфных материалов и защита их с помощью нелинейных ограничителей перенапряжений. Вестник СамГТУ. Технические науки. 2013. № 4. С. 149–157.
10. Справочник ПАО «НК «Роснефть» Наилучшие доступные технологии, технические решения и оборудование в области повышения энергоэффективности и энергосбережения нефтегазодобычи. Версия 1.00. 2016. 507 с.
11. Положение ПАО «Россети» «О единой технической политике в электросетевом комплексе». Утверждено Советом директоров ПАО «Россети» (протокол от 08.11.2019 № 378).
12. Положение «О единой технической политике в электросетевом комплексе» (новая редакция). Утверждено решением Совета директоров ПАО «ФСК ЕЭС» (протокол от 09.04.2020 № 496).

ENGLISH

Results
The simulation results show that the energy efficiency of innovative transformers is significantly higher than the energy efficiency of transformers with a traditional design of the magnetic circuit and windings. The article proves that placing an amorphous steel magnetic circuit in a cryogenic environment does not lead to a deterioration in its characteristics. This makes it possible to judge the possibility of creating a combined design of a power transformer with a combined arrangement of an amorphous magnetic circuit with superconducting windings inside a cryostat.

Conclusions
The studies carried out in the article allow us to conclude that the commissioning of power distribution transformers with magnetic circuits made of amorphous alloys, high-temperature superconducting transformers and their combined design is one of the most promising ways to reduce the technical losses of power systems. In oil and gas companies [10], power grid companies [11, 12], recommendations have been introduced on the use of energy-saving equipment, which creates preconditions for further growth of the domestic production base and development of technologies for the production of transformers with amorphous steel magnetic core.

References
1. Savintsev Yu.M. Analysis of the state of production in the Russian Federation of power oil STs of I-III dimensions. Electrical equipment: operation and repair, 2012, issue 1, P. 43–53. (In Russ).
2. Aleksandrov N.V. Study of the influence of superconducting transformers on the modes of electric power systems. NSTU, Novosibirsk, 2013, 155 p. (In Russ).
3. Dai S., Ma T., Qiu Q., Zhu Z., Teng Yu., Hu L. Development of a 1250-kVA superconducting transformer and its demonstration at the superconducting substation. IEEE Transactions on applied superconductivity, 2016, Vol. 26, issue 1, P. 1–7.
4. Lapthorn A.C., Wade G.E., Bodger P.S. HTS transformer: Construction details, test results, and noted failure mechanisms. IEEE Transactions on Power Delivery, 2011, Vol. 26, issue 1, P. 394–399.
5. Kuznetsov D.V., Goldstein V.G. Improvement of the concept and methods of organizing energy supply to megalopolises. Industrial power engineering, 2014, issue 2, P. 7–12. (In Russ).
6. Manusov V.Z., Alexandrov N.V. Current limitation by transformers with high temperature superconducting windings. Bulletin of the Tomsk Polytechnic University, 2013, issue 4, P. 100–105. (In Russ).
7. Berger A., Cherevatskiy S., Noe M., Leibfried T. Comparison of the efficiency of superconducting and conventional transformers. Journal of Physics: Conference Series, 2010, Vol. 234, Part 3.
8. Inakhodova L.M., Goldstein V.G., Kazantsev A.A. On the problems of energy saving and increasing energy efficiency when using modern power transformers. Izvestiya Vysshikh Uchebnykh Zavedenii. Elektromekhanika (Russian Electromechanics), 2014, issue 5, P. 107–111. (In Russ).
9. Goldstein V.G., Inakhodova L.M., Kazantsev A.A., Molochnikov E.N. Analysis of the performance properties of transformers with amorphous cores and their protection using nonlinear surge arresters. SamSTU Bulletin. Engineering Science, 2013, issue 4, P. 149–157. (In Russ.).
10. Handbook of PJSC NK Rosneft “Best available technologies, technical solutions and equipment in the field of energy efficiency and energy conservation in oil and gas production”. Version 1.00. 2016, 507 p. (In Russ).
11. Regulations of PJSC ROSSETI “On a unified technical policy in the power grid complex”. Approved by the Board of Directors of PJSC ROSSETI (protocol dated 08.11.2019 No. 378). (In Russ).
12. Regulation “On a unified technical policy in the power grid complex” (new edition). Approved by the decision of the Board of Directors of FGC UES, PJSC (protocol dated 09.04.2020 No. 496). (In Russ).

ИНФОРМАЦИЯ ОБ АВТОРАХ | INFORMATION ABOUT THE AUTHORS

Проничев Артем Валерьевич, инженер группы расчетов режимов систем электроснабжения ООО «СамараНИПИнефть», Самара, Россия
Для контактов: PronichevAV@samnipi.rosneft.ru

Казанцев Александр Андреевич, старший преподаватель кафедры «Автоматизированные электроэнергетические системы», ФГБОУ ВО «СамГТУ», Самара, Россия

Ветлугин Михаил Николаевич, магистрант кафедры «Автоматизированные электроэнергетические системы», ФГБОУ ВО «СамГТУ», Самара, Россия

Pronichev Artem Valerevich, engineer of the power supply system’s modes calculations group, “SamaraNIPIneft” LLC, Samara, Russia
Corresponding authors: PronichevAV@samnipi.rosneft.ru

Kazancev Aleksandr Andreevich, senior Lecturer of the Automated Power Systems Department, SamGTU, Samara, Russia

Vetlugin Mihail Nikolaevich, master’s degree student of the Automated Power Systems Department, SamGTU, Samara, Russia