

DOI: 10.47026/1810-1909-2020-3-58-66

УДК 620.424.1

ББК 31.261.8

Л.В. БЫКОВСКАЯ, В.В. БЫКОВСКИЙ

## О ПРИМЕНЕНИИ АМОРФНЫХ СТАЛЕЙ В МАГНИТОПРОВОДАХ ТРАНСФОРМАТОРОВ НАПРЯЖЕНИЯ

***Ключевые слова:** трансформатор напряжения, феррорезонанс в трансформаторах, аморфные сплавы, аппроксимация кривой намагничивания, вольт-амперная характеристика трансформатора.*

*Представлены результаты исследования влияния аморфных сталей на антирезонансные свойства трансформаторов напряжения. Разработана математическая модель трансформатора напряжения с магнитопроводом из аморфных сталей на основе системы нелинейных дифференциальных уравнений с аппроксимацией кривой намагничивания стали гиперболическим выражением. Модель была применена к расчету трансформатора напряжения с различными марками аморфных сплавов. Для проверки полученных результатов использована модель антирезонансного трансформатора напряжения, основанная на методе конечных элементов и созданная с помощью ПК FEMM, которая позволила получить графическое представление о распределении магнитной индукции в магнитопроводе трансформатора напряжения.*

Целью исследования является разработка модели трансформатора напряжения с магнитопроводом из аморфных сталей.

Задачи, решаемые для достижения поставленной цели:

- создание математической модели антирезонансного трансформатора напряжения;
- создание имитационной модели антирезонансного трансформатора напряжения;
- сравнение результатов, полученных от математической и имитационной моделей при моделировании с разными марками аморфных сталей.

Трансформатор напряжения – разновидность трансформатора, предназначенного для гальванической развязки цепей с напряжением, превышающим 6 кВ, от низкого напряжения вторичных обмоток, величина которого не превышает 100 В.

Как следует из [12, 14], трансформатор напряжения является одним из наиболее уязвимых элементов электроэнергетической системы при возникновении устойчивого электромагнитного феррорезонанса [1, 4].

Аморфные сплавы (металлические стёкла) – специальный вид прецизионных сплавов. Структура аморфных сплавов отличается от обычных кристаллических отсутствием периодичности в расположении атомов. Также этот вид материалов отличается технологическим процессом изготовления и физическими свойствами [15]. Аморфные сплавы имеют более высокие антикоррозионные свойства и прочность, чем обычные электротехнические стали с кристаллической решеткой. В аморфных сталях с нанокристаллической структурой кристаллиты с диаметром 10–20 нм распределены по всему объему ленты. Благодаря такой структуре значительно повышается магнитная проницаемость и понижается величина коэрцитивной силы по сравнению с

аналогами в случае применения электротехнических сталей. Малая толщина ленты и высокое удельное сопротивление аморфных сплавов, в пределах от 110 до 120 мкОм/см, позволяют уменьшить потери на вихревые токи и получить хорошие частотные характеристики магнитной проницаемости [9].

Аморфные сплавы из железа и никеля, легированные хромом, имеют очень большое сопротивление коррозии в самых различных коррозионно-агрессивных средах. Возможности широкого применения аморфных сталей в электроэнергетике связывают с экономическим эффектом от внедрения.

Недостатками таких трансформаторов можно назвать только повышенную начальную стоимость и увеличенные массогабаритные показатели по сравнению с аналогами при использовании трансформаторов с магнитопроводом из электротехнических сталей. Перечисленные недостатки обусловлены несовершенством технологического процесса при производстве аморфных сплавов и изготовления сердечников магнитопроводов из них.

В разработанной математической модели трансформатора напряжения с магнитопроводом из аморфных сталей было использовано сочетание эмпирических методов с компьютерным моделированием, которое позволило представить наглядный вывод о целесообразности применения аморфных сплавов в трансформаторах напряжения в целях борьбы с феррорезонансом.

При создании математической модели трансформатора напряжения [2] рассматривался вопрос о предотвращении явления феррорезонанса в магнитопроводе трансформатора. В исследованиях [6–8] сформулированы меры по предотвращению феррорезонанса в сетях 6–35 кВ.

В сетях 110–1150 кВ наиболее надёжным и эффективным способом борьбы с феррорезонансом признано применение антирезонансных трансформаторов напряжения [17]. Но данный способ весьма затратен, кроме того, он сложен для реализации на конкретных действующих подстанциях, поэтому рекомендуется применять его только при реконструкции или строительстве новых энергообъектов [10, 16]. Наиболее экономичным способом признано искусственное увеличение ёмкости шин [5, 13].

Поведение трансформаторов с магнитопроводом из аморфных сталей при ненормальных режимах работы, в частности при коротком замыкании и феррорезонансных перенапряжениях, слабо изучено. Этот факт наталкивает на предположение, что улучшить надёжность работы оборудования, в частности трансформаторов напряжения, и их устойчивость к феррорезонансу могло бы использование аморфных сталей в качестве материала для изготовления магнитопровода. Аморфные стали обладают существенно большим пределом насыщения, что может предотвратить скачкообразное повышение частоты колебания и не дать процессу приобрести периодический характер.

**Моделирование антирезонансного трансформатора.** При создании математической модели двухобмоточного трансформатора напряжения были приняты общепринятые допущения, которые не вносят больших погрешностей в результат.

Кривые намагничивания для аморфных сплавов представлены в табличном виде в ТУ 14-123-149-2009<sup>1</sup>.

<sup>1</sup> ТУ 14-123-149-2009. Лента быстрозакалённая из магнитомягких аморфных сплавов и магнитомягкого композиционного материала (нанокристаллического сплава). Переиздание с изм.

Для моделирования процесса насыщения аппроксимируем кривую намагничивания аналитическим выражением. В [3, 11] приведены различные функции для задания кривой намагничивания. Для аппроксимации было выбрано выражение

$$H = a \cdot \text{sh}(b \cdot B) + c \cdot B, \quad (1)$$

где  $a$ ,  $b$ ,  $c$  – численные коэффициенты аппроксимации, определенные по результатам решения систем нелинейных уравнений в системе Mathcad итерационным методом Левенберга – Маркардта.

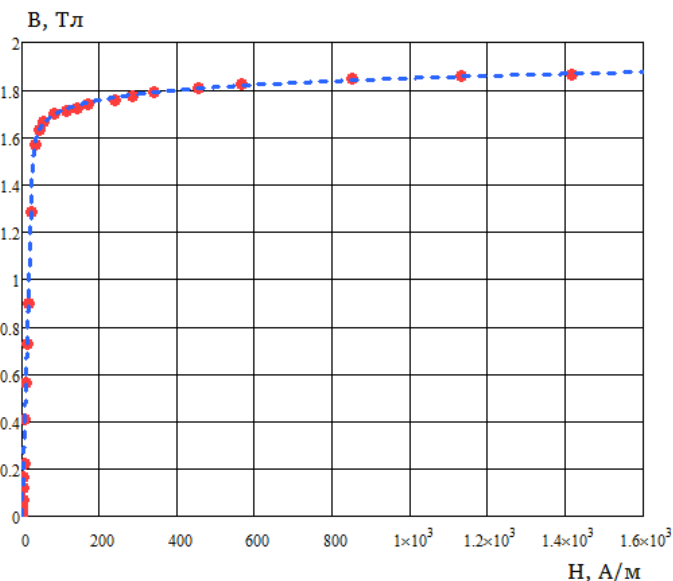


Рис. 1. Аппроксимация кривой намагничивания стали 2013 функцией (2)

На рис. 1 точками представлена кривая намагничивания стали 2013, пунктирными линиями – аппроксимирующая функция с подобранными коэффициентами

$$H = 10^{-12} \cdot \text{sh}(19,04 \cdot B) + 18,1 \cdot B. \quad (2)$$

Выбор функции (2) обусловлен ее простотой и небольшим количеством коэффициентов. Аналитическое выражение (2) обладает достаточной точностью по описанию кривой намагничивания на всем диапазоне значений. Погрешность на начальном линейном участке составляет 11,2%, в зоне насыщения – 3,1%, средняя погрешность по всей кривой составляет 8,9%.

С использованием встроенного языка программирования системы Matlab была написана программа, содержащая следующие блоки:

- ввод исходных данных трансформатора напряжения;
- задание массивов тока первичной обмотки и времени;

- задание начальных условий;
- решение системы дифференциальных уравнений;
- вывод полученных результатов.

В качестве исходных данных использовались следующие величины:  $R_{об}$ ,  $L_{об}$  – активное сопротивление и индуктивность вторичной обмотки;  $R_n$ ,  $L_n$  – активное сопротивление и индуктивность нагрузки;  $s$  – площадь поперечного сечения магнитопровода;  $l$  – длина силовой линии магнитного поля;  $w_1$ ,  $w_2$  – количество витков первичной и вторичной обмоток, соответственно;  $a$ ,  $b$ ,  $c$  – численные коэффициенты аппроксимации кривой намагничивания стали.

Исходные данные и геометрия были определены по паспортным данным каждого конкретного вида трансформатора напряжения.

Математическая модель в среде Matlab была описана с помощью одноименного языка программирования.

**Результаты исследований.** В настоящей работе проведено сравнение применения аморфных сталей путём математического и компьютерного моделирования на основе трансформатора напряжения НОСК-6.

В качестве образцов были взяты шесть типов аморфных сталей (АМЕТ-86КГСП, АМЕТ-84КХСП, АМЕТ-30КСП, АМЕТ-9КСП, АМЕТ-2НСП, АМЕТ-1СП) и один тип традиционной электротехнической стали марки 2013.

Результаты расчетов по математической модели трансформатора напряжения при использовании различных марок сталей в магнитопроводе представлены на рис. 2.

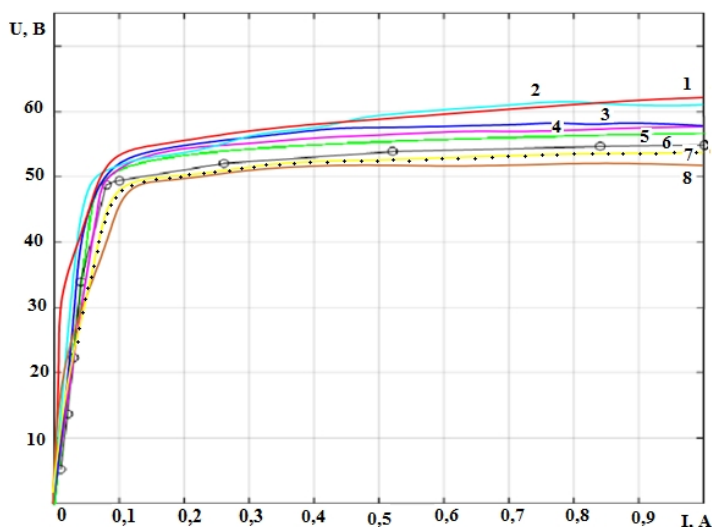


Рис. 2. Вольт-амперные характеристики ТН НОСК-6

при использовании в магнитопроводе различных марок аморфных сплавов:

- 1 – АМЕТ-1СП; 2 – 2НСП; 3 – 84КХСП; 4 – 9КСП; 5 – сталь 2013, полученная на основе (2);  
6 – сталь 2013, предоставленная производителем; 7 – 30КСП; 8 – 86 КГСП

Координаты ВАХ соответствуют координатам характеристики намагничивания стали или сплава, таким образом, вольт-амперная характеристика в определенном масштабе повторяет кривую намагничивания сплава магнитопровода трансформатора.

Для проверки полученных результатов была создана имитационная модель с графическим представлением магнитной индукции. Моделирование производилось в программном комплексе FEMM (Finite Elements Method Magnetics) (рис. 3, 4).

Принцип работы программного комплекса FEMM основан на методе конечных элементов. Основные этапы работы представлены на рис. 3 и 4.

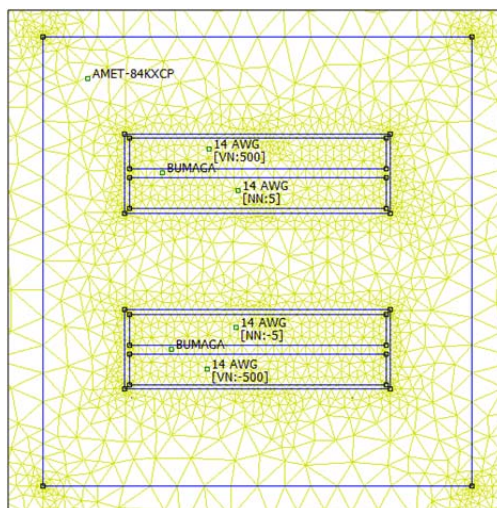


Рис. 3. Создание сетки для модели трансформатора напряжения ПК FEMM

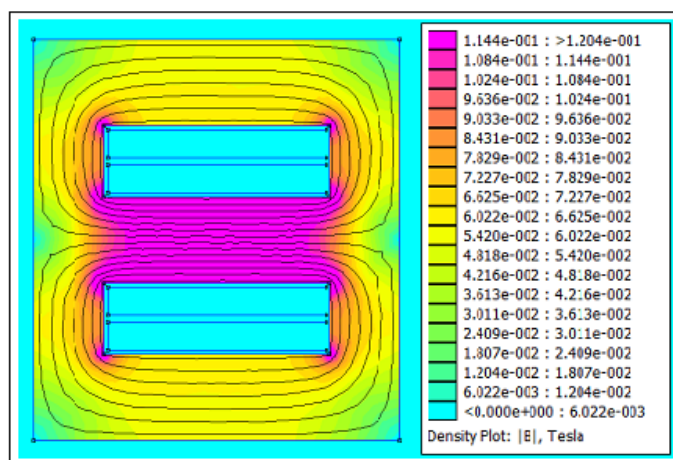


Рис. 4. Цветовая диаграмма распределения магнитной индукции в магнитопроводе трансформатора напряжения НОСК-6

Для сравнения распределения магнитной индукции по поверхности магнитопровода было проведено наложение графиков. Результаты сравнения представлены на рис. 5.

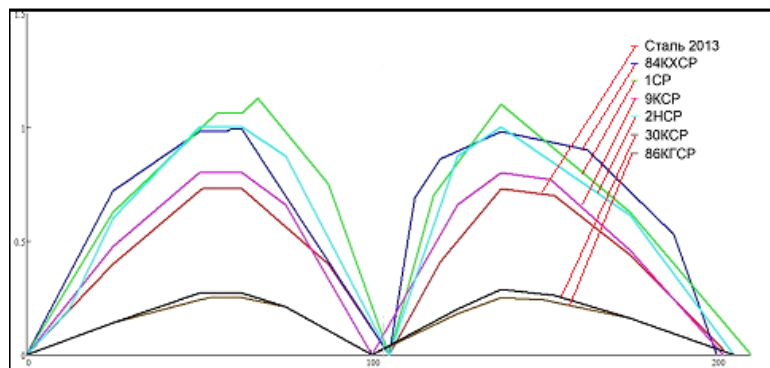


Рис. 5. Графики изменения магнитной индукции, полученные при моделировании магнитопроводов из различных марок сплавов в FEMM

**Заключение.** Была разработана и реализована в Matlab математическая модель трансформатора напряжения на основе системы нелинейных дифференциальных уравнений с включением выражения гиперболической функции аппроксимации кривой намагничивания. С помощью программных средств Matlab были рассчитаны модели трансформаторов напряжения с магнитопроводами, выполненными из различных аморфных сплавов. Результаты позволили предварительно оценить влияние аморфных сталей на антирезонансные свойства оборудования.

Исходя из рис. 2 и 5 можно сделать вывод о незначительном влиянии аморфных материалов на антирезонансные свойства магнитопровода трансформатора. В результате моделирования было выяснено, что в магнитопроводах из сплавов 30КСР и 86КГСР максимальные значения индукции ниже, а в магнитопроводах из сплавов 1СР, 2НСР, 84КХСР, 9КСР — выше, чем максимальное значение в магнитопроводе, выполненном из электротехнической стали 2013.

Следовательно, необходимо избирательно подходить к выбору марки аморфных сплавов при использовании их в магнитопроводах трансформаторов напряжения с целью предотвращения явления феррорезонанса.

#### Литература

1. Базанов В.П., Путова Т.Е. О режимах работы трансформаторов напряжения // Электрические станции. 1987. № 2. С. 56–58.
2. Бравичев С.Н., Быковская Л.В., Трубникова В.Н. Математическая модель трансформатора, основанная на моделировании магнитного поля // Энергетика: состояние, проблемы, перспективы: труды VII Всерос. науч.-техн. конф. Оренбург, ОГУ. 2014. С. 206–210.
3. Быковская Л.В., Быковский В.В. Расчет магнитной цепи асинхронного двигателя малой мощности // Вестник Оренбургского государственного университета. 2002. № 5. С. 204–207.
4. Быковский В.В., Чабан А.В. Феррорезонанс в электрических сетях напряжением 6–35 кВ // Университетский комплекс как региональный центр образования, науки и культуры: материалы Всерос. науч.-метод. конф. Оренбург, 2018. С. 2900–2907.

5. Виштитеев А.В., Гаврилко А.И. Особенности феррорезонансных явлений в электрических сетях // Проблемы энергетики. 2006. № 1-2. С. 32–36.
6. Дмитриев Е.В., Гашимов А.М., Пивчик И.Р., Гасанова С.И. Подавление феррорезонанса в распределительных устройствах с трансформатором напряжения и уменьшение кумулятивных перенапряжений // Энергетика, известия высших учебных заведений и энергетических объединений СНГ. 2003. № 4. С. 9–18.
7. Игнатенко Е.В. Проблемы эксплуатации заземляемых трансформаторов напряжения и пути их решения. Екатеринбург, ОАО "СЗТГ", 2017. С. 1–5.
8. Кадомская К., Лаптев О. Антирезонансные трансформаторы напряжения. Эффективность применения // Новости электротехники. 2006. № 6(42). С. 91–96.
9. Клименко К.А. Применение аморфного железа для улучшения электромагнитных характеристик трансформаторного датчика тока // Инновации в науке: сб. ст. по матер. VI междунар. науч.-практ. конф. Новосибирск: СибАК, 2012. С. 33–38.
10. Кононов Б.Т., Мушаров А.А. Феррорезонанс в электрических цепях с различными схемами соединения активного сопротивления, емкости и катушки с ферромагнитным сердечником // Сборник научных трудов Харьковского университета Воздушных Сил. Вып. 2(31). Харьков, 2012. С. 144–147.
11. Король Е.Г. Анализ методов моделирования магнитных характеристик электромагнитов для компенсации магнитного поля электрооборудования // Электротехника и электромеханика. 2007. № 2. С. 31–34.
12. Лаптев О.И. Исследование эффективности антирезонансных трансформаторов напряжения типа НАМИ в сетях 6–35 кВ с изолированной нейтралью // Труды четвертой Всероссийской научно-технической конференции. Новосибирск, 2006. С. 90–96.
13. Саенко Ю.Л., Нестерович В.В., Попов А.С. Устройство защиты измерительных трансформаторов напряжения от феррорезонансных процессов в сетях с изолированной нейтралью // Научный вестник Национального горного университета. 2014. № 5. С. 69–75.
14. Селиванов В.Н. Исследование феррорезонансных колебаний в воздушных сетях 35 кВ с изолированной нейтралью с электромагнитными трансформаторами напряжения: дис. ... канд. техн. наук. Апатиты, 2003. 179 с.
15. Чабан А.В., Быковский В.В. Применение аморфных сплавов в электроэнергетике // Международная научно-техническая конференция молодых учёных. Белгород, 2018. С. 657–661.
16. Чабан А.В., Быковский В.В. Причины повреждаемости и меры повышения надёжности электромагнитных трансформаторов напряжения // Автоматизированные системы управления и информационные технологии: сб. докл. Всерос. науч.-техн. конф.; Пермь. гос. ун-т. электрон. дан. Пермь: ПНИПУ, 2019. С. 29–36.
17. Novak V., Kercel B. Modeling of the phenomenon of ferroresonance in power systems high voltage. *College Publishing house Scientific and Didactic AGH, electrical Engineering and electronics*, vol. 26, pp. 54–59.

---

**БЫКОВСКАЯ ЛЮДМИЛА ВЛАДИМИРОВНА** – кандидат технических наук, доцент кафедры автоматизированного электропривода, электромеханики и электротехники, Оренбургский государственный университет, Россия, Оренбург (biklud@yandex.ru).

**БЫКОВСКИЙ ВИКТОР ВЛАДИМИРОВИЧ** – кандидат технических наук, доцент кафедры автоматизированного электропривода, электромеханики и электротехники, Оренбургский государственный университет, Россия, Оренбург (bykovskiyvictor@yandex.ru).

---

Lyudmila V. BYKOVSKAYA, Viktor V. BYKOVSKIYI

**ON APPLICATION OF AMORPHOUS STEELS IN THE MAGNETIC CIRCUITS OF VOLTAGE TRANSFORMERS**

*Key words:* voltage transformer, ferroresonance in transformers, amorphous alloys, magnetization curve approximation, volt-ampere characteristic of a transformer.

The article presents the results of studying the influence of amorphous steels on the antiresonance properties of voltage transformers. The authors developed a mathematical model of a voltage transformer with a magnetic circuit using amorphous steels based on the system of nonlinear differential equations with approximation of the magnetization curve of steel by a hyperbolic expression. The model was applied to the calculation of a voltage transformer with different brands of amorphous alloys. The model of the antiresonance voltage transformer based on the finite element method and created with the help of the FEMM PC was used to verify the obtained results which made it possible to obtain a graphical representation of magnetic induction distribution in the voltage transformer magnetic circuit.

### References

1. Bazanov V.P., Putova T.E. *O rezhimakh raboty transformatorov napryazheniya* [On operating modes of voltage transformers]. *Elektricheskie stantsii*, 1987, no. 2, pp. 56–58.
2. Bravichev S.N., Bykovskaya L.V., Trubnikova V.N. *Matematicheskaya model' transformatora, osnovannaya na modelirovanii magnitnogo polya* [Mathematical model of a transformer based on magnetic field modeling]. *Energetika: sostoyanie, problemy, perspektivy: trudy VII Vseross. nauch.-tekhn. konf.* [Proc. of VII Russ. Conf. "Energetika: state, problems, prospects"]. Orenburg, Orenburg State University Publ, 2014, pp. 206–210.
3. Bykovskaya L.V., Bykovskiy V.V. *Raschet magnitnoi tsepi asinkhronnogo dvigatelya maloi moshchnosti* [Calculation of the magnetic circuit of a low-power asynchronous motor]. *Vestnik Orenburgskogo gosudarstvennogo universiteta*, 2002, no. 5, pp. 204–207.
4. Bykovskiy V.V., Chaban A.V. *Ferrorezonans v elektricheskikh setyakh napryazheniem 6–35 kV* [Ferroresonance in electric networks with a voltage of 6–35 kV]. *Universitetskii kompleks kak regional'nyi tsentr obrazovaniya, nauki i kul'tury: materialy Vseros. nauch.-metod. konf.* [Proc. of Russ. Conf. "University complex as a regional center of education, science and culture"]. Orenburg, Orenburg State University Publ, 2018, pp. 2900–2907.
5. Vishtibeov A.V., Gavrilko A.I. *Osobennosti ferrozonansnykh yavlenii v elektricheskikh setyakh* [Features of ferroresonance phenomena in electric networks]. *Problemy energetiki*, 2006, no. 1–2, pp. 32–36.
6. Dmitriev E.V., Gashimov A.M., Pivchik I.R., Gasanova S.I. *Podavlenie ferrozonansa v raspredelitel'nykh ustroystvakh s transformatorom napryazheniya i umen'shenie kumulyativnykh perynapryazhenii* [Suppression of ferroresonance in switchgear with voltage transformer and decrease the cumulative surge]. *Energetika, izvestiya vysshikh uchebnykh zavedenii i energeticheskikh ob"edinenii SNG*, 2003, no. 4, pp. 9–18.
7. Ignatenko E.V. *Problemy ekspluatatsii zazemlyaemykh transformatorov napryazheniya i puti ikh resheniya* [Problems of operation of grounded voltage transformers and ways to solve them]. Ekaterinburg, 2017, pp. 1–5.
8. Kadomskaya K., Laptev O. *Antirezonansnye transformatory napryazheniya. Effektivnost' primeneniya* [Antiresonance voltage transformers. Efficiency of application]. *Novosti elektrotekhniki*, 2006, no. 6(42), pp. 91–96.
9. Klimenko K.A. *Primenenie amorfnogo zheleza dlya uluchsheniya elektromagnitnykh kharakteristik transformatornogo datchika toka* [The use of amorphous iron to improve the electromagnetic characteristics of a transformer current sensor]. *Innovatsii v nauke: sb. st. po mater. VI Mezhdunar. nauch.-prakt. konf.* [Proc. of 6<sup>th</sup> Int. Sci. Conf. "Innovations in science"]. Novosibirsk, SibAS Publ, 2012, pp. 33–38.
10. Kononov B.T., Musharov A.A. *Ferrorezonans v elektricheskikh tsepyakh s razlichnymi skhemami soedineniya aktivnogo soprotivleniya, emkosti i katushki s ferromagnitnym serdechnikom* [Ferroresonance in electric circuits with various schemes for connecting active resistance, capacitance, and coils with a ferromagnetic core. Collected papers, issue 2(31)]. Kharkov, Kharkov Air Force University, 2012, pp. 144–147.
11. Korol' E.G. *Analiz metodov modelirovaniya magnitnykh kharakteristik elektromagnitov dlya kompensatsii magnitnogo polya elektrooborudovaniya* [Analysis of methods for modeling the magnetic characteristics of electromagnets to compensate for the magnetic field of electrical equipment]. *Elektrotekhnika i elektromekhanika*, 2007, no. 2, pp. 31–34.



12. Laptev O.I. *Issledovanie effektivnosti antirezonsnykh transformatorov napryazheniya tipa NAMI v setyakh 6–35 kV s izolirovannoi neutral'yu* [Investigation of the effectiveness of antiresonance voltage transformers of the NAMI type in 6–35 kV networks with isolated neutral] *Trudy chetvertoi Vserossiiskoi nauchno-tekhnicheskoi konferentsii* [Proc. of the 4<sup>th</sup> Russ. Sci. and Tech. Conf.]. Novosibirsk, 2006, pp. 90–96.

13. Saenko Yu.L., Nesterovich V.V., Popov A.S. *Ustroistvo zashchity izmeritel'nykh transformatorov napryazheniya ot ferrozonansnykh protsessov v setyakh s izolirovannoi neutral'yu* [Device for protection of voltage measuring transformers from ferroresonance processes in networks with isolated neutral]. *Nauchnyi vestnik Natsional'nogo gornogo universiteta*, 2014, no. 5, pp. 69–75.

14. Selivanov V. N. *Issledovanie ferrozonansnykh kolebaniy v vozdushnykh setyakh 35 kV s izolirovannoi neutral'yu s elektromagnitnymi transformatorami napryazheniya* [Investigation of ferroresonance oscillations in 35 kV air networks with isolated neutral with electromagnetic voltage transformers]. *Apatity*, 2003, 179 p.

15. Chaban A.V., Bykovskiy V.V. *Primenenie amorfnykh splavov v elektroenergetike* [Application of amorphous alloys in electric power industry]. *Mezhdunarodnaya nauchno-tekhnicheskaya konferentsiya molodykh uchenykh* [Int. Sci. and Tech. Conf. of Young Scientists]. Belgorod, 2018, pp. 657–661.

16. Chaban A.V., Bykovskiy V.V. *Prichiny povrezhdaemosti i mery povysheniya nadezhnosti elektromagnitnykh transformatorov napryazheniya* [Causes of damage and measures to improve the reliability of electromagnetic voltage transformers]. *Avtomatizirovannye sistemy upravleniya i informatsionnye tekhnologii: sb. dokl. Vseros. nauch.-tekhn. konf.* [Proc. of the Russian Sci. and Tech. Conf. “Automated control systems and information technologies”]. Perm, Perm State University Publ, 2019, pp. 29–36.

17. Novak V., Kerzel B. Modeling of the phenomenon of ferroresonance in power systems high voltage. *College Publishing house Scientific and Didactic AGH, electrical Engineering and electronics*, vol. 26. pp. 54–59.

---

**LYUDMILA V. BYKOVSKAYA** – Candidate of Technical Sciences, Associate Professor, Department of Automated Electric Drive, Electromechanics and Electrical Engineering, Orenburg State University, Russia, Orenburg (biklud@yandex.ru).

**VIKTOR V. BYKOVSKIY** – Candidate of Technical Sciences, Associate Professor, Department of Automated Electric Drive, Electromechanics and Electrical Engineering, Orenburg State University, Russia, Orenburg (bykovskiyvictor@yandex.ru).

---

**Формат цитирования:** Быковская Л.В., Быковский В.В. О применении аморфных сталей в магнитопроводах трансформаторов напряжения // Вестник Чувашского университета. – 2020. – № 3. – С. 58–66. DOI: 10.47026/1810-1909-2020-3-58-66.