

УДК 621.316.731

## ОБНАРУЖЕНИЕ ОДНОСТОРОННЕГО НАМАГНИЧИВАНИЯ В ДВУХТАКТНЫХ ПРЕОБРАЗОВАТЕЛЯХ

А. М. Бобрешов, А. В. Дыбой, А. С. Жабин,  
А. А. Карташов, М. П. Ряполов, И. В. Федотов

*Воронежский государственный университет*

Поступила в редакцию 01.02.2020 г.

**Аннотация.** Одностороннее намагничивание (ОН) является частой причиной отказов двухтактных импульсных преобразователей, а также может приводить к увеличению потерь в магнитопроводе и неконтролируемому росту промышленных помех. В работе предложен способ контроля ОН, основанный на измерении поля рассеяния трансформатора при помощи датчика намагничивания. Этот датчик регистрирует изменение напряженности магнитного поля в трансформаторе, что позволяет обнаруживать ОН на ранних стадиях, когда потери в магнитопроводе незначительны. Предложено схемотехническое решение, позволяющее уменьшить потери, связанные с насыщением трансформатора.

**Ключевые слова:** одностороннее намагничивание, двухтактный повышающий преобразователь, датчик намагничивания, потери в магнитопроводе.

## ONE-SIDED MAGNETIZATION DETECTION IN TWO STAGE UP-CONVERTER

A. M. Bobreshov, A. V. Dyboy, A. S. Zhabin,  
A. A. Kartashov, M. P. Riapolov, I. V. Fedotov

**Abstract.** One-sided magnetization is a common cause of failure of push pull up-converters, and can lead to an increase in losses and industrial interference. The method of one-sided magnetization control is proposed in the article. This method is based on measuring stray field of a transformer by using a magnetization sensor. The sensor detects one-sided magnetization beforehand, when the losses are insignificant, by measuring a change in the magnetic field in the transformer. The circuit solution to reduce losses associated with transformer saturation is proposed.

**Keywords:** one-sided magnetization, two stage up-converter, magnetization sensor, losses in magnetic circuit.

## ВВЕДЕНИЕ

В связи с постоянным ростом потребления энергоресурсов непрерывно растет интерес научно технического сообщества к использованию альтернативных источников энергии. К таким источникам относятся термогенераторы, солнечные батареи, ветряные электростанции [1] и т. д. С точки зрения преобразовательной техники, они представляют собой низковольтные первичные источники питания постоянного напряжения (ПИП). Значения их выходных

---

© Бобрешов А. М., Дыбой А. В., Жабин А. С., Карташов А. А., Ряполов М. П., Федотов И. В., 2020

параметров сильно отличаются от стандартов бытовых электроприборов и промышленной аппаратуры. Поэтому возникает необходимость в разработке преобразователей (инверторов) низкого постоянного напряжения в переменное, соответствующее параметрам бытовой или промышленной сети электропитания [2]. На современном уровне развития техники инверторы зачастую строятся по схеме с двойным преобразованием [3]. То есть, первый каскад преобразует входное напряжение в постоянное напряжение 350–600 В, которое затем с помощью второго каскада трансформируется в переменное напряжение.

Одним из наиболее распространенных схемотехнических решений для преобразователей с низким входным напряжением является двухтактный преобразователь со средней точкой, называемый также в зарубежной литературе push-pull [4]. Однако, важным недостатком такого решения является одностороннее намагничивание (ОН). Под данным эффектом понимается появление постоянной составляющей тока намагничивания и связанного с ним насыщения (замагничивания) магнитопровода трансформатора. При этом имеет место увеличение потерь и снижение надежности преобразователя [5]. Этим проблемам можно избежать, своевременно обнаружив ОН и изменив режим работы вторичного источника питания путем регулирования длительности тактов. К сожалению, среди исследователей и разработчиков современной преобразовательной техники не существует общего мнения относительно универсального, технологичного и надежного способа регистрации ОН. Таким образом, важной задачей для повышения коэффициента полезного действия (КПД) и надежности работы двухтактного преобразователя является заблаговременное обнаружение ОН и организация мер для борьбы с ним.

В данной работе предложен способ обнаружения одностороннего намагничивания, в основе которого лежит измерение скорости нарастания магнитного поля, вытесняемого в окружающее пространство при насыщении трансформатора, датчиком в виде индуктивного контура. Экспериментально показано, что данный подход позволяет обнаруживать одностороннее намагничивание и корректировать режим работы повышающего преобразователя для предотвращения перехода в режим глубокого насыщения магнитопровода.

## **ОДНОСТОРОННЕЕ НАМАГНИЧИВАНИЕ**

Существуют различные причины возникновения одностороннего намагничивания. Любая несимметрия и технологический разброс параметров элементов схемы, некачественная пайка одного из выводов выходного выпрямителя могут привести к появлению постоянной составляющей тока намагничивания. Несимметрия может быть связана с тем, что у транзисторов одной модели несколько отличаются значения таких параметров, как сопротивление в открытом состоянии, время запаздывания и длительность фронтов нарастания и спада тока. Кроме этого, транзисторы преобразователя зачастую находятся в разных температурных условиях. Наконец, несимметричная работа трансформатора наблюдается во время переходных процессов, когда длительность управляющих импульсов увеличивается или уменьшается в течение некоторого времени.

Для устранения одностороннего намагничивания трансформатора можно уменьшить максимальную индукцию в его сердечнике или ввести немагнитный зазор. Однако такие меры далеки от идеальных. Во-первых, они не позволяют учитывать все факторы, вызывающие подмагничивание, а во-вторых, приводят к росту габаритов и стоимости трансформатора или к увеличению потерь на ключевых транзисторах преобразователя, обусловленных необходимостью коммутировать больший по величине намагничивающий ток. Кроме того, для преобразователей с большими входными токами используются транзисторные ключи с крайне низким сопротивлением канала в открытом состоянии. Поскольку сопротивление первичных обмоток также крайне мало, даже небольшая постоянная составляющая напряжения, обусловленная несимметрией, приводит к возникновению значительного тока намагничивания.

Именно поэтому для мощных преобразователей с низким входным напряжением наиболее эффективными окажутся способы автоматической компенсации одностороннего намагничивания. Несмотря на то, что эти способы имеют различную схемотехническую реализацию, все они предусматривают использование датчика намагничивания (ДН). ДН реагирует на появление ОН и формирует сигнал для системы управления преобразователем для организации симметричного режима перемагничивания трансформатора путем изменения длительности импульсов управления ключевыми транзисторами преобразователя.

В качестве простейших ДН можно использовать трансформаторы тока [6] и резистивные шунты, включенные последовательно с ключевыми транзисторами, обмоткой трансформатора или в общие цепи питания преобразователя. В этом случае насыщение сердечника регистрируется по величине или скорости нарастания тока. Так как подобные датчики контролируют полный ток преобразователя, состоящий из тока нагрузки и тока намагничивания трансформатора, то они зачастую не способны обеспечить корректную работу во всех возможных режимах - ток нагрузки маскирует ток намагничивания. Для обнаружения насыщения магнитопровода применяют способ, известный как дифференциальная защита [7]. Также заслуживают внимания методы прямого контроля намагниченности сердечника трансформатора при помощи дополнительных обмоток [8] магнитодиодов, магниторезисторов или датчиков Холла [9]. Существуют способы контроля насыщения при помощи пьезоэлемента, установленного на магнитопроводе трансформатора. При этом датчик регистрирует акустические сигналы, связанные с магнитострикцией сердечника. К сожалению, указанные методы обладают недостатками, такими как недостаточная эффективность, сложность реализации, недостаточно высокое быстродействие (датчик Холла).

Альтернативным подходом для получения достоверной информации о насыщении сердечника является регистрация эффектов, возникающих при его насыщении. К таким эффектам можно отнести неспособность магнитопровода более воспринимать внешнее магнитное поле. При этом оно вытесняется из сердечника, а эффективная магнитная проницаемость падает. Насыщение магнитопровода происходит постепенно, и его переход в намагниченное состояние может быть определен заранее. На ранних стадиях ОН, снижение магнитной проницаемости не приводит к существенному ухудшению параметров преобразователя.

В данной работе для обнаружения одностороннего намагничивания трансформатора было предложено измерять поле рассеяния, вытесняемое в окружающее пространство. В качестве датчика намагничивания предлагается использовать индуктивный контур, на выходе которого за счет явления электромагнитной индукции возникает ЭДС. Её величина пропорциональна скорости изменения магнитного потока поля рассеяния, проходящего через контур согласно формуле:  $\varepsilon = -\frac{d\Phi}{dt}$ . При превышении значения  $\varepsilon$  определённого порога в системе управления повышающего преобразователя формируется сигнал о насыщении трансформатора. Данный подход прост в реализации и позволяет обнаруживать ОН на ранних стадиях его возникновения.

## **ПОСТАНОВКА ЭКСПЕРИМЕНТА**

Для подтверждения работоспособности предлагаемого способа обнаружения одностороннего намагничивания в двухтактном преобразователе, было проведено экспериментальное исследование. В рамках этой работы была собрана экспериментальная установка, блок схема которой изображена на рисунке 1. Основным элементом её являлся двухтактный push-pull преобразователь, который состоит из двух ключевых элементов, в качестве которых использовались мощные полевые n-канальные транзисторы модели STY60NM50, двухобмоточного трансформатора со средней точкой на Ш-образном магнитопроводе, двухфазного двухполупериодного выпрямителя в виде диодной сборки модели SBR60A300CT и сглаживающего емкостного фильтра.

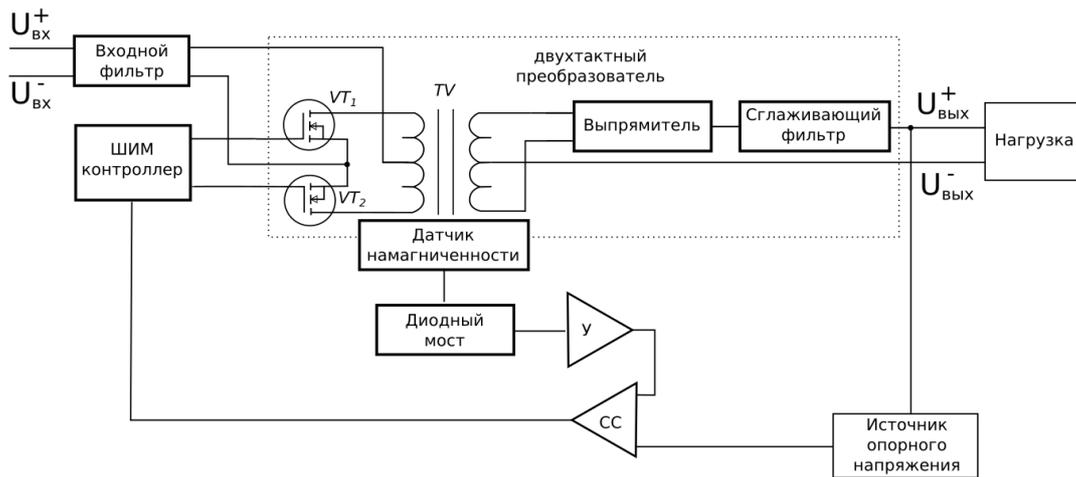


Рис. 1. Блок-схема экспериментальной измерительной установки

Во время первого такта на затвор ключевого транзистора  $VT_1$  подавалось отпирающее напряжение; транзистор  $VT_2$  в это время находился в режиме отсечки. При этом входной ток протекал по цепи  $U_{вх}^+$ , средняя точка первичной обмотки трансформатора  $TV$ , транзистор  $VT_1$ ,  $U_{вх}^-$ . Во вторичной обмотке  $TV$  возникало напряжение, которое после выпрямителя и сглаживающего фильтра подавалось на нагрузку. Второй такт начинался, когда с затвора транзистора  $VT_1$  снималось приложенное напряжение и он переходил в режим отсечки, а транзистор  $VT_2$  наоборот открывался. Входной ток протекал по цепи  $U_{вх}^+$ , средняя точка первичной обмотки  $TV$ , транзистор  $VT_2$ ,  $U_{вх}^-$ . На вторичной обмотке трансформатора  $TV$  появлялось напряжение, которое после выпрямителя и фильтра поступало на нагрузку.

Входное напряжение силового блока двухтактного преобразователя подавалось с выходов лабораторного источника питания и равнялось 5 В. Для управления силовыми ключами была выбрана микросхема MC33025DW, формирующая сигналы широтно-импульсной модуляции (ШИМ). Питание ШИМ-контроллера было организовано от лабораторного источника с выходным напряжением 15 В. Во избежание перегрева транзисторных ключей к их корпусам присоединялись радиаторы решетчатого типа для отвода тепла. Нагрузка выбиралась из тех соображений, чтобы при номинальном напряжении питания рабочий ток трансформатора в несколько раз превышал ток холостого хода.

В каждом такте работы, поток магнитного поля трансформатора проходил сквозь датчик намагничивания, что приводило к появлению в нем ЭДС. В качестве ДН использовалась катушка без сердечника, так как такая катушка практически безынерционна, обладает малой индуктивностью и не влияет на свойства магнитопровода. Измерение индуцированного ЭДС на выходе ДН выполнялось цифровым осциллографом. На рисунке 2 пунктирной линией и линией точка-тире показаны осциллограммы управляющих импульсов на затворах транзисторов, линией точка-точка ток трансформатора, сплошной линией — сигнал с датчика намагничивания. Из рисунка видно, что в конце каждого такта скорость нарастания тока увеличивалась из-за уменьшения магнитной проницаемости магнитопровода. При этом, наблюдалось увеличение напряжения на выходе ДН, связанное с ростом вытесняемого в окружающее пространство поля рассеивания из-за насыщения магнитопровода. Сигнал с датчика в дальнейшем усиливался усилителем  $У$  и поступал на вход схемы сравнения  $СС$ . Второй вход  $СС$  был подключен к источнику опорного напряжения (ИОН). Превышение усиленного сигнала с ДН, некоторого порогового значения (0.4 В) интерпретировалось системой управления как возникновение ОН. Порог срабатывания определялся экспериментально по форме сигнала с датчика намагничивания. Его значение может изменяться в зависимости от требований,

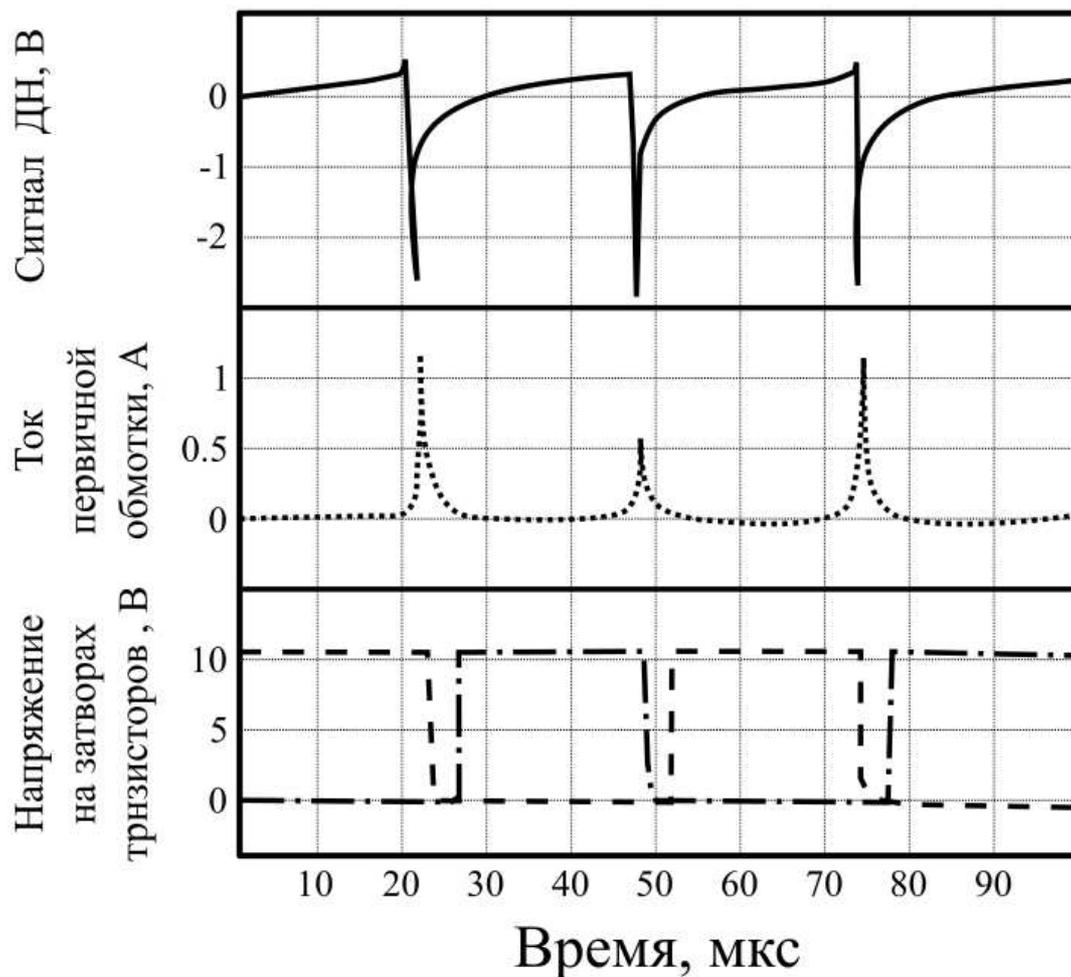


Рис. 2. Осциллограммы сигналов в измерительной установке

предъявляемых к проектируемому преобразователю. При этом на управляющий вход ШИМ контроллера поступал сигнал для коррекции режима работы преобразователя, после чего длительность тактов рабочего цикла преобразователя изменялась для обеспечения симметричного режима работы перемагничивания трансформатора.

### РАЗМЕЩЕНИЕ ДАТЧИКА НАМАГНИЧИВАНИЯ

Для обеспечения надежности работы повышающего преобразователя и уменьшения потерь, связанных с перемагничиванием трансформатора важно, чтобы ДН формировал сигнал об обнаружении одностороннего намагничивания на ранних стадиях его возникновения. В силу своей формы и расположения обмоток рассматриваемый в работе магнитопровод является неоднородным. Из-за этого при насыщении поле рассеивания вытесняется из трансформатора в окружающее пространство не равномерно. Для обнаружения одностороннего намагничивания на ранних стадиях его появления необходимо разместить датчик поля на поверхности трансформатора где указанный эффект проявляется в наибольшей степени. Кроме того, необходимо, чтобы вектор нормали поверхности ДН был коллинеарен вектору напряженности магнитного поля. При этом будет обеспечиваться наибольшая чувствительность датчика намагничивания.

Для определения области на поверхности трансформатора, через которую в первую очередь начинает вытесняться поле при насыщении магнитопровода, было проведено моделирование распределения вектора напряжённости магнитного поля в пространстве. Для этого в среде автоматизированного проектирования была построена двумерная модель Шобразного трансформатора. В качестве материала для магнитопровода использовался феррит марки N87 (EPCOS). При увеличении тока в первичной обмотке от 0,05 А до 1 А наблюдалось насыщение вектора магнитной индукции в сердечнике. На рисунке 2 представлены распределения напряженности магнитного поля для двух моментов времени: а) намагничивание еще не началось и б) начальная стадия насыщения магнитопровода. Из рисунка видно, что поле вытесняется во внешнее пространство в точках, где происходит нарушение плавности хода силовых линий вектора напряжённости магнитного поля,  $\mathbf{H}$  (сгибы магнитопровода). Так же стоит отметить, что величина  $\mathbf{H}$  максимальна в центральном керне, иными словами, насыщение начинается в нем. Увеличение входного тока приводит к росту напряженности магнитного поля в трансформаторе. При этом, расширяется область поверхности, через которую поле рассеивается из магнитопровода.

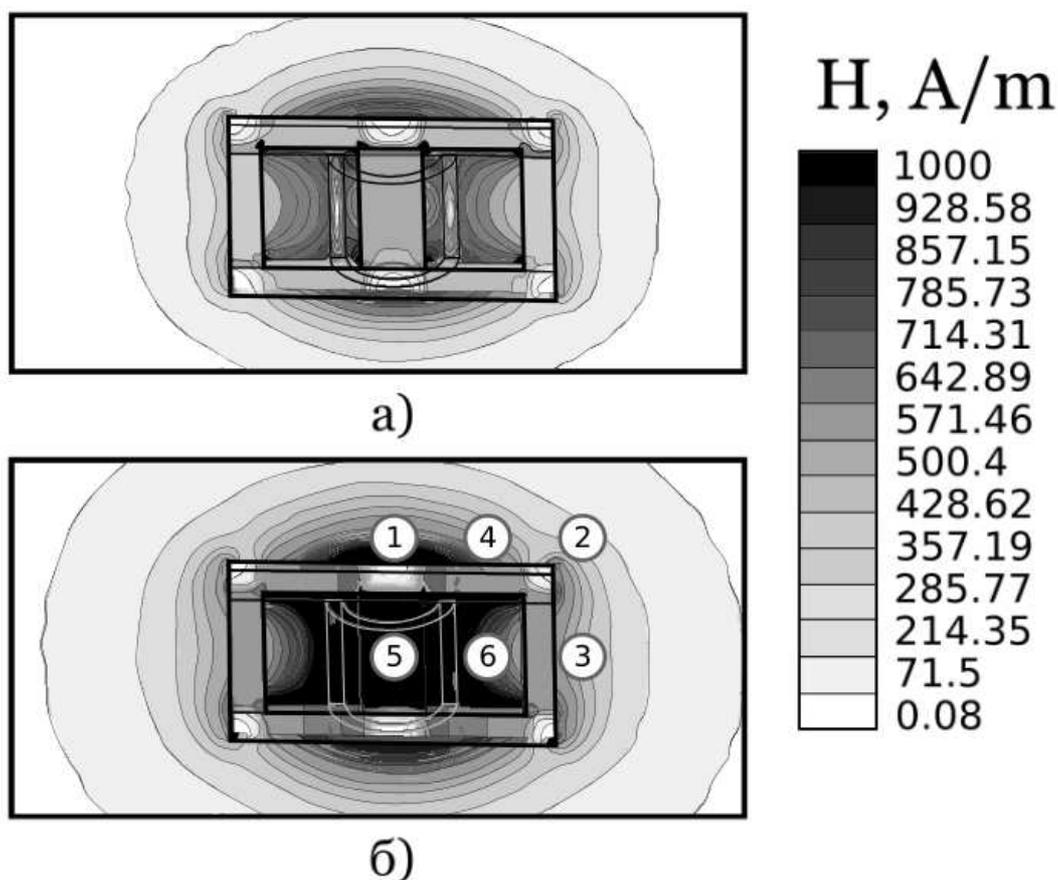


Рис. 3. Рисунок 3. Распределение напряжённости магнитного трансформатора; а) — намагничивание еще не началось, б) начальная стадия насыщения магнитопровода.

Было проведено экспериментальное исследование, в рамках которого датчик намагничивания регистрировал поле в разных точках поверхности трансформатора. Эти точки выбирались исходя из симметрии формы магнитопровода, их расположение схематично отображено на рисунке 3 цифрами от 1 до 6. В таблице 1 приведены пиковые значения напряжения ( $U_{\text{макс}}$ ) на выходе ДН, измеренные с помощью осциллографа. Эти данные могут быть ис-

пользованы проектировщиками для выбора расположения ДН, которое обеспечит наибольшую чувствительность. В данной работе, это расположение соответствует точке 5 — середине центрального керна.

Таблица 1. Пиковое значение величины напряжения на выходе датчика намагниченности

Расположение датчика намагниченности	Пиковое значение величины напряжения, В			
	V=7; I=0.08A	V=10; I=0.13A	V=15; I=0.24A	V=20; I=0.42A
1	-	0.22	1.32	5.68
2	-	0.224	1.42	1.8
3	-	0.376	0.8	2.2
4	-	0.2	0.88	4.36
5	0.452	2.18	4.56	5.36
6	0.292	1.72	5.76	5.64

## ВЫВОДЫ

Для обнаружения одностороннего намагничивания можно использовать датчик в виде индуктивного контура, регистрирующий изменения напряжённости магнитного поля, вытесняемого в окружающее пространство при насыщении трансформатора. В результате моделирования показано, что напряженность этого поля принимает наибольшие значения в окрестности центрального керна. Также показано, что при насыщении трансформатора поле вытесняется в местах, где нарушается плавность хода его силовых линий - сгибы магнитопровода. Экспериментально получены сигналы с выхода датчика намагничивания для различных случаев его расположения на трансформаторе. Показано, что наибольшая чувствительность при обнаружении одностороннего намагничивания на ранних стадиях обеспечивается при расположении датчика намагничивания на центральном керне. Предложено схемотехническое решение для организации симметричного режима перемагничивания трансформатора путем изменения длительности импульсов управления преобразователя. Предложенное решение прошло экспериментальную проверку с получением подтверждения возможности его использования для уменьшения потерь, связанных с односторонним намагничиванием.

## СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. Доброхотов, В. И. Нетрадиционные возобновляемые источники энергии. Проблемы и перспективы / В. И. Доброхотов, Э. Э. Шпильрайн. — Теплоэнергетика. — 1996. — № 5. — С. 2–9.
2. ГОСТ 32144. Нормы качества электрической энергии в системах электроснабжения общего назначения. — М. : Изд-во стандартов, 2014. — 15 с.
3. Мэк, Р. Импульсные источники питания. Теоретические основы проектирования и руководство по практическому применению / Р. Мэк. — М. : “Додэка-ХХГ”, 2010. — 272 с.
4. Мелешин, В. И. Транзисторная преобразовательная техника / В. И. Мелешин. — М. : Техносфера, 2006. — 632 с.
5. Бейков, М. В. Преобразователь корабельной системы электроснабжения с компенсационным контролем одностороннего намагничивания трансформатора / М. В. Бейков, Ю. М. Казанцев // Практическая силовая электроника. — 2013. — Т. 51, № 3. — С. 16–19.
6. Волович, Г. И. Влияние внутренних шумов на погрешность электронного трансформатора тока / Г. И. Волович // Измерительная техника. — 2016. — № 2. — С. 42–45.

7. Пат. 0002522174 Российская Федерация. Устройство ограничения тока намагничивания трансформатора двухтактного преобразователя напряжения / Казанцев Ю. М., Бейков М. В., патентообладатель: ОАО "Научно-производственный центр "Полюс", опубл. 10.07.2014.

8. Пат. 2 343 623 Российская Федерация, МПК H02M 1/40(2009.01) Мостовой инвертор напряжения с защитой трансформатора от одностороннего насыщения / Чудесников М. А., Иванов Ю. Е., Грунин С. Ф., патентообладатель: ООО "АТС-КОНВЕРС", заявл. 11.12.2007; опубл. 10.01.2009. — 17 с.

9. Пат. RU 2 523 698 Российская Федерация. МПК H02M 7/5387, Преобразователь постоянного тока в переменный ток / Клименко Ю. И., Кузнецов Н. А., Перфильев К. С., Чушин Я. В., Хрусталеv П. И., Патентообладатели: ОАО "Российские железные дороги", заявл. 14.02.2013; опубл. 20.07.2014. — 6 с.

## REFERENCES

1. Dobroxotov V.I., Shpil'rayjn E.E. Unconventional Renewable Sources energy. Challenges and Prospects. [Dobroxotov V.I., Shpil'rayjn E.E. Netradicionnye vozobnovlyaemye istochniki energii. Problemy i perspektivy]. *Teploenergetika — Heat power engineering*, 1996, no. 5, pp. 2–9.

2. GOST 32144. Quality standards for electrical energy in systems general power supply. - Moscow: Publishing house of standards, 2014. — 15 p. [GOST 32144. Normy kachestva elektricheskoyj energii v sistemax elektrosnabzheniya obshhego naznacheniya. — Moskva: Izd-vo standartov, 2014. — 15 s].

3. Mack R. Switching Power Supplies. Theoretical design basics and practical guidance. [Mek R. Impul'snye istochniki pitaniya. Teoreticheskie osnovy proektirovaniya i rukovodstvo po prakticheskomu primeneniyu]. Moscow, 2010, 272 p.

4. Meleshin V.I. Transistor Converter Technology. [Meleshin V.I. Tranzistornaya preobrazovatel'naya texnika]. Moscow, 2006, 632 p.

5. Beikov M.V., Kazantsev Yu.M. Converter power supply system with compensation control of one-sided magnetization of the transformer. [Beyjkov M.V., Kazancev Yu.M. Preobrazovatel' korabel'noyj sistemy elektrosnabzheniya s kompensacionnym kontrolem odnostoronnego namagnichivaniya transformatora]. *Prakticheskaya silovaya elektronika — Practical Power Electronics*, 2013, vol. 51, no. 3, pp. 16–19.

6. Volovich G.I. The influence of internal noise on the error of the electronic current transformer. [Volovich G.I. Vliyaniye vnutrennix shumov na pogreshnost' elektronnoy transformatora toka]. *Izmeritel'naya tekhnika — Measuring technique*, 2016, no. 2, pp. 42–45.

7. Pat. 0002522174 Russian Federation. Device for limiting the magnetization current of the transformer push-pull voltage converter / Kazantsev Yu.M., Beikov MV, patentee: OJSC Polyus Scientific and Production Center, publ. 07/10/2014. [Pat. 0002522174 Rossijskaya Federaciya. Ustroystvo ogranicheniya toka namagnichivaniya transformatora dvuxtaktynogo preobrazovatelya napryazheniya / Kazancev Yu.M., Beyjkov M.V., patentoobladatel': ОАО "Nauchno-proizvodstvennyy centr "Polyus", opubl. 10.07.2014].

8. Pat. 2 343 623 Russian Federation, IPC H02M 1/40 (2009.01) Bridge voltage inverter with transformer protection against one-sided saturation / Chudesnikov M.A., Ivanov Yu. E., Grunin S.F., patentee: ATS-CONVERS LLC, decl. 12/11/2007; publ. 10.01.2009, — 17 p. [Pat. 2 343 623 Rossijskaya Federaciya, MPK H02M 1/40(2009.01) Mostovoyj invertor napryazheniya s zashhitoyj transformatora ot odnostoronnego nasyshheniya / Chudesnikov M.A., Ivanov Yu.E., Grunin S.F., patentoobladatel': ООО "АТС-КОНВЕРС", заявл. 11.12.2007; opubl. 10.01.2009, — 17 s].

9. Pat. RU 2 523 698 Russian Federation. IPC H02M 7/5387, DC / AC Converter / Klimenko Yu.I., Kuznetsov N.A., Perfilev K.S., Chupin Ya.V., Khrustalev P.I. Patent owners: Russian Railways OJSC, decl. 02/14/2013; publ. 07/20/2014, - 6 s. [Pat. RU 2 523 698 Rossijskaya Federaciya. MPK H02M 7/5387, Preobrazovatel' postoyannogo toka v peremennyj tok /

Klimenko Yu.I., Kuznecov N.A., Perfil'ev K.S., Chupin Ya.V., Xrustalev P.I., Patentoobladateli: ОАО "Rossiyskie zheleznye dorogi", заявл. 14.02.2013; опубли. 20.07.2014, – 6 с].

*Бобрешов А. М., д.ф.-м.н., профессор, заведующий кафедры электроники Воронежского государственного университета, Воронеж, Россия*  
Тел.: bobreshov@phys.vsu.ru

*Bobreshov A.M., Doctor of physical and mathematical science, Professor, Department of Electronics, Voronezh State University, Voronezh, Russia*  
Tel.: bobreshov@phys.vsu.ru

*Дыбой А. В., к. ф.-м. н., доцент, доцент кафедры электроники Воронежского государственного университета, Воронеж, Россия*  
Тел.: dyboy\_a@mail.ru

*Dyboy A. V., Candidate of physical and mathematical science, Associate Professor, Department of Electronics, Voronezh State University, Voronezh, Russia*  
Tel.: dyboy\_a@mail.ru

*Жабин А. С., к. т. н., доцент кафедры электроники Воронежского государственного университета, Воронеж, Россия*  
Тел.: zhabin@phys.vsu.ru

*Zhabin A. S., Candidate of technical science, Associate Professor, Department of Electronics, Voronezh State University, Voronezh, Russia*  
Tel.: zhabin@phys.vsu.ru

*Ряполов М. П., к. ф.-м. н., доцент кафедры электроники Воронежского государственного университета, Воронеж, Россия*  
Тел.: riapolov@vsu.ru

*Riapolov M. P., Candidate of physical and mathematical sciences, Associate Professor, Department of Electronics, Voronezh State University, Voronezh, Russia*  
Tel.: riapolov@vsu.ru

*Карташов А. А., студент Воронежского государственного университета, Воронеж, Россия*  
Тел.: sani14470@gmail.com

*Kartashov A. A., student, Voronezh State University, Voronezh, Russia*  
Tel.: sani14470@gmail.com

*Федотов И. В., студент Воронежского государственного университета, Воронеж, Россия*  
Тел.: ilya\_fedotov@mail.ru

*Fedotov I. V., student, Voronezh State University, Voronezh, Russia*  
Tel.: ilya\_fedotov@mail.ru