

ЕЛЕКТРИЧНИЙ ТРАНСПОРТ

УДК 621.314.222.6:629.423

Д. А. ЗАБАРИЛО^{1*}

^{1*}Каф. «Электроподвижной состав железных дорог», Днепропетровский национальный университет железнодорожного транспорта имени академика В. Лазаряна, ул. Лазаряна, 2, 49010, Днепропетровск, Украина, тел.+38 (063) 446 77 38, эл. почта lazbl@yandex.ru

ОСОБЕННОСТИ РАСЧЕТА СИЛОВОГО ТРАНСФОРМАТОРА ПОВЫШЕННОЙ ЧАСТОТЫ

Цель. Обмотки мощных трансформаторов имеют малое значение активного сопротивления и значительную индуктивность, что приводит к снижению скорости нарастания тока в обмотках. Поэтому, задавая расчетной величиной тока, необходимо убедиться в возможности ее достижения. Так как индуктивность характеризуется напряжением короткого замыкания, то необходимо разработать методику для определения максимальной величины тока в обмотках трансформатора в зависимости от величины напряжения короткого замыкания и рабочей частоты. **Методика.** Для достижения поставленной цели в работе использован классический метод расчета переходных процессов для определения значения переходного тока в обмотках трансформатора. **Результаты.** Исследован и проанализирован характер переходного тока в обмотках высокочастотного трансформатора, который питается от инвертора напряжения. **Научная новизна.** Предложен метод для определения максимальной величины тока в зависимости от величины напряжения короткого замыкания и частоты приложенного напряжения при прочих заданных параметрах. **Практическая значимость.** Предложенная методика позволит определить максимальное значение тока в обмотках высокочастотного трансформатора с учетом его RL-параметров. Это позволит сравнить величину заданного тока с возможным в зависимости от напряжения короткого замыкания и частоты приложенного напряжения. Материал исследований возможно применять при проектировании силовых трансформаторов.

Ключевые слова: однофазный мостовой инвертор напряжения; высоковольтный трансформатор; напряжение короткого замыкания; переходной процесс; постоянная времени

Введение

Трансформатор является наиболее громоздким элементом в преобразовательных цепях источников питания. К тому же рост цен на цветные металлы делает трансформатор одним из наиболее дорогостоящих элементов в преобразовательной технике. При этом быстрыми темпами идет усовершенствование элементов силовой электроники, что позволяет снизить их стоимость и достичь высокой степени интеграции, т. е. уменьшить габариты. Поэтому для повышения компактности и снижения стоимости преобразователя в целом проводятся иссле-

дования, направленные на снижение массогабаритных показателей трансформатора.

Существует три основных способа повышения компактности трансформатора:

- 1) применение сверхпроводящих обмоток;
- 2) применение для магнитопровода новых материалов с большей индукцией насыщения;
- 3) повышение рабочей частоты напряжения.

На практике наибольшее применение получил последний способ. Он предполагает использование безтрансформаторного входа со стороны источника переменного напряжения. Вместо трансформатора на входе преобразователя используется выпрямитель. Далее вы-

ЕЛЕКТРИЧНИЙ ТРАНСПОРТ

прямленное напряжение сглаживается и инвертируется в переменное напряжение, которое питает обмотки трансформатора. При этом частота переменного напряжения превышает промышленную частоту (т. е. частоту напряжения

на входе выпрямителя). Такой способ нашел широкое применение в импульсных источниках питания [5, 10, 13]. В упрощенном виде схема с промежуточным трансформатором приведена на рис. 1.

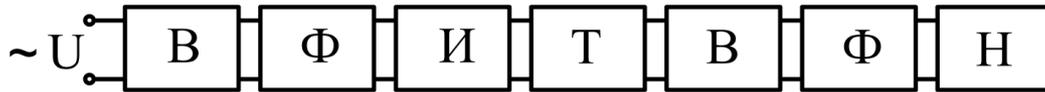


Рис. 1 Функциональная схема источника питания с использованием трансформатора повышенной частоты: В – выпрямитель; Ф – фильтр; И – инвертор; Т – трансформатор; Н – нагрузка

Большинство сердечников трансформаторов выполняются из электротехнической стали или ферритов. Маломощные трансформаторы, магнитопровод которых выполнен из электротехнической стали, могут работать на частотах до десятков кГц. Мощные (силовые, тяговые) трансформаторы излучают сильные магнитные поля, а сердечники их работают почти с максимальной индукцией насыщения (1,7...1,9 Тл) электротехнической стали. Поэтому диапазон рабочих частот мощных трансформаторов значительно меньше, чем у маломощных, что обусловлено значительным ростом потерь в стали с повышением частоты при постоянном значении индукции:

$$p_{ст} \sim f^{\beta} \beta^2, \quad (1)$$

где β – коэффициент, зависящий от материала, $\beta = 1, 2, \dots, 6$.

В последнее время для изготовления магнитопроводов трансформаторов применяются аморфные сплавы, которые позволяют снизить потери холостого хода и повысить рабочую частоту [1, 7, 12].

Цель

Обмотки мощного трансформатора обладают значительной индуктивностью и малым активным сопротивлением, что приводит к задержке нарастания тока в обмотках, и выражается постоянной времени. Поэтому на высоких частотах при больших значениях τ_n ток может возрасти лишь до определенного значения. А это значит, что реальный ток может не достичь заданного тока. Поэтому необходимо разработать методику для определения максимальной

величины тока в обмотках трансформатора в зависимости от величины напряжения короткого замыкания и рабочей частоты.

Методика

Для достижения поставленной цели необходимо проанализировать принцип повышения частоты напряжения на обмотках трансформатора автономным инвертором. После чего необходимо найти начальные условия для составления выражения, с помощью которого можно определить максимальный ток нагрузки в обмотках трансформатора в переходной период.

Принцип повышения частоты напряжения трансформатора

Принцип работы звена высокой частоты поясняет схема, приведенная на рис. 2. Это схема однофазного полностью управляемого автономного инвертора напряжения на транзисторах IGBT [6, 9]. Нагрузкой инвертора является первичная обмотка высокочастотного трансформатора. Вторичная обмотка его связана и выпрямителем, который подключен к фильтру (см. рис. 1). Подобная схема нашла применение в разработках силовой схеме тягового преобразователя электроподвижного состава [2, 3, 13, 15].

Формирование переменного напряжения на первичной обмотке трансформатора происходит следующим образом (см. рис. 2). Предположим, что в момент времени $t = t_0$ открыты транзисторы VT_1, VT_4 (рис. 3) и напряжение источника питания $U_{вх}$ скачком поступает на первичную обмотку W_1 трансформатора TV_1 . (Параметры первичной обмотки включают в себя активное сопротивление R_1 , индуктив-

ЕЛЕКТРИЧНИЙ ТРАНСПОРТ

ность L_1 первичной обмотки (рис. 4) и R_2', L_2' вторичной обмотки W_2 , приведенные к первичной). В цепи первичной обмотки трансформатора TV_1 нарастает ток нагрузки i_n . Скорость нарастания его определяется постоянной времени

$$\tau_n = \frac{L_{\text{общ}}}{R_{\text{общ}}}, \text{ с} \quad (2)$$

где $L_{\text{общ}} = L_1 + L_2'$ – общая индуктивность обмоток трансформатора, Гн;

$R_{\text{общ}} = R_1 + R_2'$ – общее активное сопротивление обмоток, Ом.

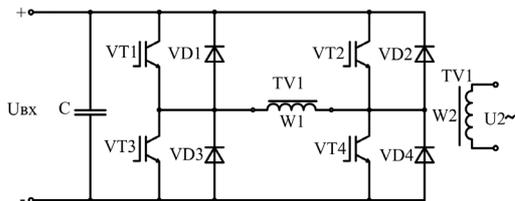


Рис. 2. Схема однофазного мостового инвертора напряжения

За время полупериода $\frac{T}{2}$ ток нагрузки возрастает от значения $-I_{n(\text{max})}$ до $+I_{n(\text{max})}$ (см. рис. 3).

При этом в первичной обмотке трансформатора происходит накопление электромагнитной энергии $W = \frac{i_n^2 \cdot L_{\text{общ}}}{2}$.

В момент времени $t = t_2$ происходит запаривание транзисторов VT_1, VT_4 и подача управляющих импульсов на затворы транзисторов VT_2, VT_3 . Но они не могут включиться, так как ток в индуктивности не может мгновенно изменить направление. Поэтому после выключения VT_1, VT_4 ток проходит по цепи: $TV_1 - VD_2 - C - VD_3$. Транзисторы VT_2, VT_3 , зашунтированные диодами VD_2, VD_3 , закрыты, несмотря на подачу на их затворы отпирающих импульсов. В момент времени $t = t_3$, ток нагрузки $i_n(t_3) = 0$, а при $t > t_3$ начнет протекать в противоположном направлении. В момент вре-

мени $t = t_4$ закроются транзисторы VT_2, VT_3 и получат отпирающие импульсы транзисторы VT_1, VT_4 , однако ток пойдет по цепи $TV_1 - VD_1 - C - VD_4$. Далее процессы будут повторяться аналогично.

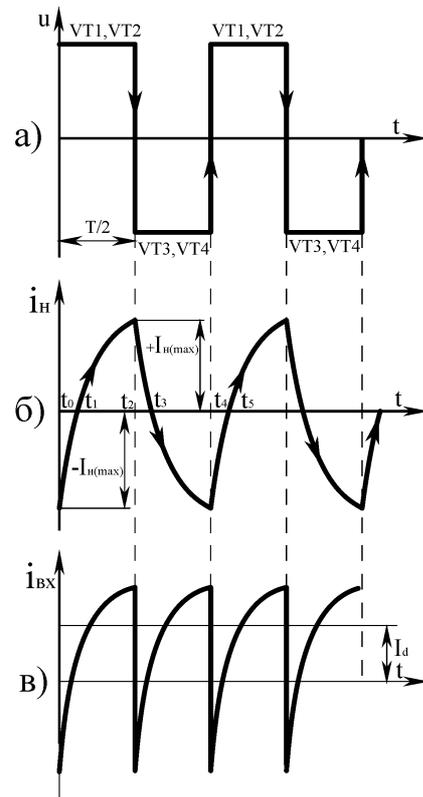


Рис. 3. График процессов в однофазном мостовом инверторе: а) напряжение на выходе инвертора; б) ток нагрузки; в) ток на входе инвертора

Расчет тока нагрузки в переходной период

Для составления уравнений электромагнитного состояния трансформатора необходимо привести его схему замещения (рис. 4) [4,8].

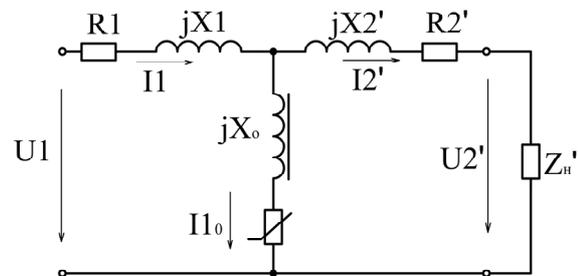


Рис. 4. Схема замещения трансформатора

ЕЛЕКТРИЧНИЙ ТРАНСПОРТ

Выполнив приведение сопротивления вторичной обмотки к первичной, получим:

$$z_{\text{общ}} = (R_1 + R_2') + j(X_1 + X_2') = R_{\text{общ}} + jX_{\text{общ}} \quad (3)$$

Пренебрегая током I_0 , получим схему замещения, изображенную на рис. 5.

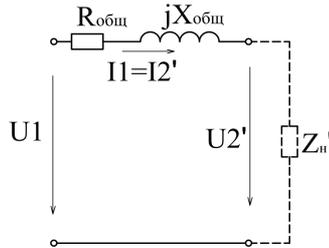


Рис. 5. Упрощенная схема замещения трансформатора

Составим баланс напряжений по полученной схеме (см. рис. 5):

$$U = R_{\text{общ}} \cdot i_n - e_p = L_{\text{общ}} \frac{di}{dt} = U_1 - U_2. \quad (4)$$

Ток нагрузки состоит из свободной и принужденной составляющей [11]:

$$i_n = i_{n(\text{св})} + i_{n(\text{пр})} = I_0 + A \cdot e^{-\frac{t}{\tau_n}}, \quad (5)$$

где I_0 – установившаяся составляющая тока переходного процесса, A :

$$I_0 = \frac{U_1 - U_2'}{R_{\text{общ}}}. \quad (6)$$

Так как напряжение на первичной обмотке трансформатора повторяется периодически, то постоянная A определяется из следующего соотношения:

$$-i_n(0) = i_n\left(\frac{T}{2}\right), \quad (7)$$

$$i_n(0) = -(I_0 + A \cdot e^0) = -(I_0 + A), \quad (8)$$

$$i_n\left(\frac{T}{2}\right) = \left(I_0 + A \cdot e^{-\frac{T}{2\tau_n}}\right). \quad (9)$$

Подставляя (8) и (9) в уравнение (7), получим:

$$-(I_0 + A) = \left(I_0 + A \cdot e^{-\frac{T}{2\tau_n}}\right). \quad (10)$$

Откуда находим постоянную A :

$$A = -\frac{2I_0}{\left(1 + e^{-\frac{T}{2\tau_n}}\right)} \quad (11)$$

Подставляя выражение (11) в (5), получим зависимость $i_n(t)$ в переходной период:

$$i_n(t) = I_0 + \left(-\frac{2I_0}{1 + e^{-\frac{T}{2\tau_n}}}\right) e^{-\frac{t}{\tau_n}} \quad (12)$$

или

$$i_n(t) = I_0 \left(1 - \frac{2e^{-\frac{t}{\tau_n}}}{1 + e^{-\frac{T}{2\tau_n}}}\right). \quad (13)$$

Максимальное значение тока в цепи первичной обмотки трансформатора находим при $t = \frac{T}{2}$:

$$i_{n(\text{max})}(t) = I_0 \frac{1 - e^{-\frac{T}{2\tau_n}}}{1 + e^{-\frac{T}{2\tau_n}}}. \quad (14)$$

Для регулирования выходного напряжения инвертора изменяют либо напряжение питающего источника $U_{\text{вх}}(t)$, либо посредством сдвига управляющих импульсов, подаваемых на транзисторы VT_1, VT_4 относительно управляющих импульсов VT_2, VT_3 на угол управления β .

Для примера, на рис. 6 приведена зависимость максимальной величины переходного тока $i_{n(\text{max})}$ от напряжения короткого замыкания $u_{\text{кз}}$ при заданном значении напряжения $U_1 = 3\,250$ В и частоте $f = 1000$ Гц.

ЕЛЕКТРИЧНИЙ ТРАНСПОРТ

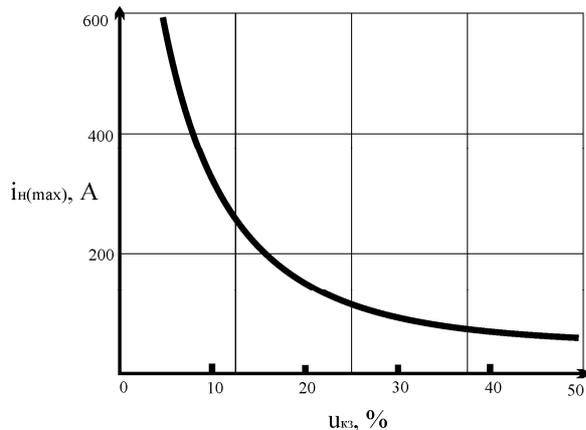


Рис. 6. Графік залежності максимальної величини переходного тока от напруги короткого замикання

Результаты

Получено выражение, которое позволяет определить максимальное значение тока в обмотках трансформатора в зависимости от частоты и напруги короткого замыкания при прочих заданных условиях.

Научная новизна и практическая значимость

Впервые предложена методика, позволяющая учитывать влияние величины активно-индуктивных параметров и частоты питающего напряжения на значение максимального тока нагрузки в обмотках трансформатора.

Полученные результаты работы можно использовать при проектировании силовых трансформаторов повышенной частоты.

Выводы

При проектировании силовых высокочастотных трансформаторов в расчетах номинального тока необходимо учитывать RL-параметры обмотки, которые в основном определяются напряжением короткого замыкания. Поэтому, задаваясь частотой приложенного напряжения и напряжением короткого замыкания, необходимо убедиться, что заданное значение тока при прочих параметрах будет достигнуто. Такую проверку позволит выполнить приведенная методика.

СПИСОК ИСПОЛЬЗОВАННЫХ ИСТОЧНИКОВ

1. Аморфные сплавы и экономия [Электронный ресурс]. – Режим доступа: <http://forca.ru/stati/podstancii/amorfnye-splavy-i-ekonomiya.html>. – Загл. с экрана.
2. Вісін, М. Г. Шестивісний магістральний вантажний електровоз подвійного живлення із застосуванням проміжного трансформатора з високочастотною розв'язкою і з асинхронними тяговими двигунами / М. Г. Вісін, Д. О. Забаріло // Вісник Дніпропетр. нац. ун-ту залізн. трансп. ім. акад. В. Лазаряна. – Д., 2011. – Вип. 36. – С. 132–136.
3. Вісін, М. Г. Підвищення електромагнітної су-місності рейкових кіл з електрорухомим складом подвійного живлення з асинхронними тяговими двигунами та тяговою мережею / М. Г. Вісін, Д. О. Забаріло // Вісник Дніпропетр. нац. ун-ту залізн. трансп. ім. акад. В. Лазаряна. – Д., 2012. – Вип. 40. – С. 75–82.
4. Вольдек, А. И. Электрические машины : учеб. для студ. высш. техн. учебн. заведений / А. И. Вольдек. – 3-е изд., перераб. – Л. : Энергия, 1978. – 832 с.
5. Готтлиб, И. М. Источники питания. Инверторы, конверторы, линейные и импульсные стабилизаторы / И. М. Готтлиб. – М. : Постмаркет, 2002. – 544 с.
6. Забродин, Ю. С. Промышленная электроника : учебник для вузов / Ю. С. Забродин. – М. : Высш. шк., 1982. – 496 с.
7. Золотухин, И. В. Физические свойства аморфных металлических сплавов / И. В. Золотухин. – М. : Metallurgia, 1986. – 175 с.
8. Копылов, И. П. Электрические машины : учебник для вузов / И. П. Копылов. – М. : Энергоатомиздат, 1986 – 256 с.
9. Кулик, В. Д. Силовая электроника. Автономные инверторы, активные преобразователи : учебное пособие / В. Д. Кулик. – СПб. : ГОУВПО СПбГТУРП, 2010. – 90 с.
10. Мэк, Р. Импульсные источники питания. Теоретические основы проектирования и руководство по практическому применению / Р. Мэк. – М. : Издательский дом «Додэка-XXI», 2008. – 272 с.
11. Основы теории цепей : учебник для вузов / Г. В. Зевеке, П. А. Ионкин, А. В. Нетушил, С. В. Страхов. – 5-е изд., перераб. – М. : Энергоатомиздат, 1989. – 528 с.
12. Стародубцев, Ю. Н. Магнитные свойства аморфных и нанокристаллических сплавов / Ю. Н. Стародубцев, В. Я. Белозеров. – Екатеринбург : Изд-во Уральского ун-та, 2002. – 186 с.

ЕЛЕКТРИЧНИЙ ТРАНСПОРТ

13. Kunz, M. Th. Entwicklung einer massearmen Energieversorgung für elektrische Triebfahrzeuge / M. Kunz, F. Hörl, Th. Klockw // ZEV, DET Glassers Annalen, Die Eisenbahntechnik. – 1999. – Vol. 123, № 11, 12. – P. 423–426.
14. Liu, Y., Developments in Switching Mode Supply Technologies / Y. Liu, W. Eberle // IEEE Canadian Review. Switching Mode Power Supplies. – 2009. – № 61. – P. 9–14.
15. Victor, M. Energieumwandlung aut AC-Triebfahrzeugen mit Mittle frequen ztransformator / M. Victor // EB: Elekrtsche Bahnen. – 2005. – Vol., 103, № 11. – P. 505–510.

Д. О. ЗАБАРИЛО^{1*}

^{1*}Каф. «Електрорухомий склад залізниць», Дніпропетровський національний університет залізничного транспорту імені академіка В. Лазаряна, вул. Лазаряна, 2, 49010, Дніпропетровськ, Україна, тел.+38 (063) 446 77 38, ел. пошта lazbl@yandex.ru

ОСОБЛИВОСТІ РОЗРАХУНКУ СИЛОВОГО ТРАНСФОРМАТОРА ПІДВИЩЕНОЇ ЧАСТОТИ

Мета. Обмотки потужних трансформаторів мають мале значення активного опору та значну індуктивність, що призводить до зниження швидкості наростання струму в обмотках. Тому, задаючись розрахунковим струмом, необхідно переконатися в можливості його досягнення. Оскільки індуктивність характеризується напругою короткого замикання, то необхідно розробити методику для визначення максимальної величини струму в обмотках трансформатора в залежності від напруги короткого замикання та робочої частоти. **Методика.** Для досягнення поставленої мети в роботі використано класичний метод розрахунку перехідних процесів для визначення величини перехідного струму в обмотках трансформатора. **Результати.** Досліджено та проаналізовано характер перехідного струму в обмотках високочастотного трансформатора, який живиться від інвертора напруги. **Наукова новизна.** Запропоновано метод для визначення максимальної величини струму в залежності від величини напруги короткого замикання та частоти прикладеної напруги при інших заданих параметрах. **Практична значимість.** Запропонована методика дозволить визначити максимальне значення струму в обмотках високочастотного трансформатора з урахуванням його RL-параметрів. Це дозволить порівняти величину заданого струму з можливим в залежності від напруги короткого замикання та частоти прикладеної напруги. Матеріал досліджень можливо застосовувати при проектуванні силових трансформаторів.

Ключові слова: однофазний мостовий інвертор напруги; високовольний трансформатор; напруга короткого замикання; перехідний процес; постійна часу

D. A. ZABARILO^{1*}

^{1*}Dep. «Electric rolling stock of railways», Dnipropetrovsk National University of Railway Transport named after Academician V. Lazaryan, Lazaryan Str. 2, 49010, Dnipropetrovsk, Ukraine, tel.+38 (056) 373 15 04, e-mail lazbl@yandex.ru

FEATURES OF THE HIGH FREQUENCY POWER TRANSFORMER CALCULATION

Purpose. The windings of power transformers have low resistance value and a most inductance, which reduces the rate of rise of current in the windings. Therefore, when the estimated amount of current is set one should make sure of the possibility of achieving it. As inductance is characterized by a short-circuit voltage, it is necessary to develop a technique for determining the maximum magnitude of the current in the windings of the transformer according to the short-circuit voltage and operating frequency. **Methodology.** The classical method of calculation of transient processes to determine the value of the transient current of the transformer windings to achieve purpose is used. **Findings.** The nature of the transient current in the windings of high-frequency transformer, which is powered by a voltage inverter is investigated and analyzed. **Originality.** The method for determining the maximum amount of current depending on the short-circuit voltage and frequency of the applied voltage with other set-up parameters was proposed. **Practical value.** The proposed method allows determining the maximum value of the current in the

ЕЛЕКТРИЧНИЙ ТРАНСПОРТ

windings of the high-frequency transformer including its RL-parameters. This will let compare the value of a given current with possible depending on short-circuit voltage and frequency of the applied voltage. Research material may be applied for power transformers design.

Keywords: single-phase bridge voltage inverter; high voltage transformer; short-circuit voltage; transient process; time constant

REFERENCES

1. *Amorfnyye splavy i ekonomiya* (Amorphous alloys and economy). Available at: <http://forca.ru/stati/podstancii/amorfnye-splavy-i-ekonomiya.html> (Accessed 03 June 2013).
2. Visin M.H., Zabarylo D.O. Shestyvisnyi mahistralnyi vantazhnyi elektrovoz podviinoho zhyvlennia iz zastosuvanniam promizhnoho transformatora z vysokochastotnoiu rozviazkoiu i z asynkhronnymy tiahovymy dvyhunamy [Six axel mainline freight double feed electric locomotive using the transformer with high-frequency junction and asynchronous tractive motors]. *Visnyk Dnipropetrovskoho natsionalnoho universytetu zaliznychnoho transportu imeni akademika V. Lazariana* [Bulletin of Dnipropetrovsk National University of Railway Transport named after Academician V. Lazaryan], 2011, issue 36, pp. 132-136.
3. Visin M.H., Zabarylo D.O. Pidvyschennia elektromahnitnoi sumisnosti reikovykh kil z elektrorukhomym skladom podviinoho zhyvlennia z asynkhronnymy tiahovymy dvyhunamy ta tiahovoiu merezheiu [Improving of electromagnetic compatibility of rail circuits with double feed electric rolling stock with asynchronous tractive motors and with power supply system]. *Visnyk Dnipropetrovskoho natsionalnoho universytetu zaliznychnoho transportu imeni akademika V. Lazariana* [Bulletin of Dnipropetrovsk National University of Railway Transport named after Academician V. Lazaryan], 2012, issue 40, pp. 75-82.
4. Voldek A.I. *Elektricheskiye mashyny* [Electrical machines]. Lvov, Energyia Publ., 1978. 832 p.
5. Gottlib I.M. *Istochniki pitaniya. Invertory, konvertory, lineynyye i impulsnyye stabilizatory* [Sources of supply. Inverters, converters, linear and switching regulators]. Moscow, Postmarket Publ., 2002. 544 p.
6. Zabrodin Yu.S. *Promyshlennaya elektronika* [Industrial electronics]. Moscow, Vysshaya shkola Publ., 1982. 496 p.
7. Zolotukhin I.V. *Fizicheskiye svoystva amorfnykh metallicheskiykh splavov* [The physical properties of amorphous metallic alloys]. Moscow, Metallurgiya Publ., 1986. 175 p.
8. Kopylov I.P. *Elektricheskiye mashiny* [Electrical machines]. Moscow, Energoatomizdat Publ., 1986. 256 p.
9. Kulik V.D. *Silovaya elektronika. Avtonomnyye invertory, aktivnyye preobrazovateli* [Power electronics. Autonomous inverters, active transducers]. Saint Petersburg, GOUVPO SPbGTURP Publ., 2010. 90 p.
10. Mek R. *Impulsnyye istochniki pitaniya. Teoreticheskiye osnovy proyektirovaniya i rukovodstvo po prakticheskomu primeneniyu* [Switching power supplies. Design Theory and guidance on the practical application]. Moscow, Izdatelskiy dom «Dodeka-KhKhI» Publ., 2008. 272 p.
11. Starodubtsev Yu.N., Belozarov V.Ya. *Magnitnyye svoystva amorfnykh i nanokristallicheskiykh splavov* [Magnetic properties of amorphous and nanocrystalline alloys]. Yekaterinburg, Uralskiy Universitet Publ., 2002. 186 p.
12. Zeveke G.V., Ionkin P.A., Netushil A.V., Strakhov S.V. *Osnovy teorii tsepey* [Basics of circuit theory]. Moscow, Energoatomizdat Publ., 1989. 528 p.
13. Kunz M., Hörl F., Klockw Th. Entwicklung einer massearmen Energieversorgung für elektrische Triebfahrzeuge. *ZEV, DET Glassers Annalen, Die Eisenbahntechnik*, 1999, vol. 123, no. 11,12. p. 423-426.
14. Liu Y., Eberle W. Developments in Switching Mode Supply Technologies. *IEEE Canadian Review. Switching Mode Power Supplies*, 2009. no. 61, pp. 9-14.
15. Victor M. Energieumwandlung aut AC-Triebfahrzeugen mit Mittle frequen ztransformator. *EB: Elektrische Bahnen*, 2005, vol. 103, no. 11, pp. 505-510.

Статья рекомендована к публикации к.т.н., проф. М. Г. Висиньм (Украина); инженером-технологом I кат. ПКПП МДС, к.т.н. Д. В. Гусевым (Украина)

Поступила в редколлегию 18.04.2013.

Принята к печати 04.06.2013