

Особенности проектирования трансформаторов с вращающимся магнитным полем для полупроводниковых преобразователей

КУЗЬМИН И.Ю., ЧЕРЕВКО А.И., ЛИМОННИКОВА Е.В.

Закладываются основы методики расчета магнитной цепи трансформатора с вращающимся магнитным полем (ТВМП). Расчет проводится с использованием специального программного обеспечения, реализующего метод конечных элементов при моделировании магнитного поля ТВМП. Показано, что опыт проектирования трансформаторов стержневой конструкции и электрических машин малоприменим для расчета и проектирования ТВМП. Установлен порядок действий для получения карты магнитной индукции – важного критерия при определении правильности проектирования ТВМП. Дается определение кривой магнитного поля и объясняется значимость ее анализа для обеспечения первичных и вторичных значений напряжения ТВМП с минимальным набором высших гармоник. Показан порядок построения основной кривой намагничивания ТВМП и даны рекомендации по расположению на данной кривой точки холостого хода. Результат применения предлагаемой методики показан на примере проектирования ТВМП для управляемого выпрямителя мощностью 4 кВт.

Ключевые слова: полупроводниковый преобразователь, трансформатор с вращающимся магнитным полем, метод конечных элементов, специализированное программное обеспечение, кривая магнитного поля, магнитная индукция, характеристика холостого хода

В отечественных и зарубежных полупроводниковых преобразователях в качестве согласующих устройств применяются трехфазные трансформаторы стержневой конструкции с пульсирующими магнитными полями (ТПМП) [1, 2]. Методика их проектирования многократно проверена и дает хорошие результаты на практике. Иная ситуация возникает при использовании в качестве согласующих устройств трансформаторов с вращающимся магнитным полем (ТВМП) [2–6]. Они имеют цилиндрические магнитопроводы, что позволяет повышать качество питающего и выходного напряжения преобразователей не только за счет увеличения фазности полупроводниковых преобразователей, но и за счет конструктивных мероприятий, применяемых при проектировании электрических машин: выбора оптимального числа пазов на полюс и фазу, сокращения шага обмотки по пазам цилиндрического магнитопровода, скоса пазов.

На этапе проектирования цилиндрических магнитопроводов ТВМП, как и при проектировании магнитопроводов электрических машин, основное внимание следует уделять электромагнитному расчету, в процессе которого должны быть определены линейная токовая нагрузка A (А/м) и магнитная индукция в воздушном зазоре B_d (Тл) [7–10]. Необходимость точного определения этих величин объясняется тем, что именно от них зависят энергетические характеристики как ТВМП (КПД η и обобщенный коэффициент мощности c), так и всего преобразователя в целом [2, 10].

Расчет магнитной цепи выполняется в соответствии с законом полного тока и проводится в предположении, что магнитная система разбита на конечное число участков, в пределах которых магнитный поток считается неизменным [7, 8]. Такими участками являются элементы конструкции: ярмо и зубец наружного магнитопровода, главный полюс, воздушный зазор и зубец внутреннего магнитопровода. В этом случае можно говорить о задаче синтеза магнитной цепи цилиндрического магнитопровода ТВМП, при этом по заданному значению ЭДС определяются необходимые значения потокосцепления и магнитного потока, а затем – магнитодвижущей силы (МДС) контура с электрическим током, способной провести магнитный поток через магнитопровод ТВМП [9, 10]. При расчете магнитных цепей вышеописанным методом принимаются некоторые снижающие достоверность результата упрощения [7, 8], а именно, пренебрегается:

магнитным сопротивлением стали (полагается $\mu \neq \infty$);

эффектом выпучивания магнитного поля в воздушном зазоре;

наличием зубчатой структуры магнитопровода (полагается $k_d = 1$);

уплощением кривой магнитного поля вследствие насыщения стали (полагается $k_m = 1$);

наличием высших гармоник в составе кривой магнитного поля.

В том случае, если при расчете во внимание принимаются коэффициенты $k_d > 1$, $k_m > 1$, то определяются они эмпирически для каждого типового случая с использованием экспериментальных данных. При проектировании электрических машин эти коэффициенты выбираются по результатам испытаний предшествующих серий [9, 10], а в случае проектирования ТВМП такие данные отсутствуют.

Из указанного выше следует, что накопленный опыт расчета магнитных цепей, полученный при проектировании трансформаторов стержневой конструкции и электрических машин [9], оказывается малоприменимым для проектирования ТВМП, типовая конструкция которого приведена на рис. 1.

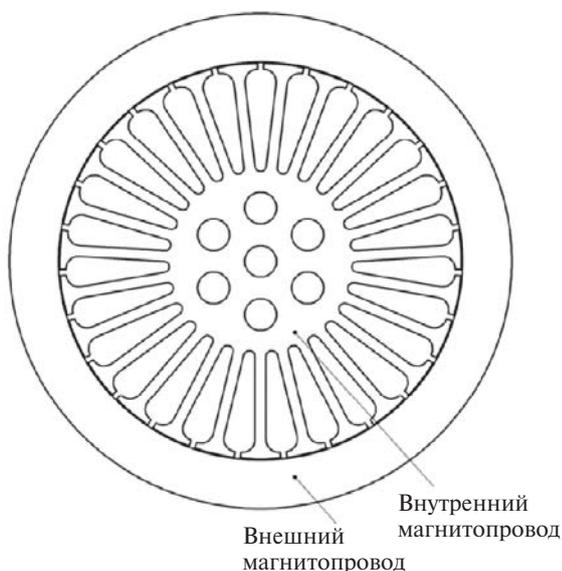


Рис. 1. Геометрия магнитной цепи ТВМП

Конструктивно ТВМП представляет собой два шихтованных концентрических магнитопровода. Внешний магнитопровод выполняется в виде кольца и служит для замыкания магнитной цепи, наличие пазов на нем при мощности ТВМП до 100 кВт не предусматривается. Внутренний магнитопровод выполнен в виде звездочки с радиально расположенными симметричными полузакрытыми пазами, которая предназначена для проведения магнитного поля внутри активной зоны и размещения трехфазной и круговой обмоток ТВМП. Между магнитопроводами для частичной линеаризации магнитной системы предполагается равномерный воздушный зазор, который может составлять от 0,5 до 5 мм в зависимости от мощности ТВМП и оптимального соотношения между его массогабаритными и энергетическими характеристиками.

Для моделирования магнитного поля ТВМП был использован отечественный программный продукт ELCUT. Магнитное поле в этой программе было рассчитано на основании закона Ампера

[7] с допущением, что плотность тока смещения в расчетной области задачи равна нулю:

$$\tilde{N} \cdot \overset{r}{H} = \overset{r}{j}, \quad (1)$$

где $\overset{r}{H}$ – напряженность магнитного поля, А/м; $\overset{r}{j}$ – плотность тока проводимости, А/м².

Плоскопараллельная геометрическая модель рассчитываемого устройства строится с помощью программы, работающей с векторной графикой, например AutoCAD, затем сохраняется в формате .dxf. Модель импортируется в расчетную среду ELCUT с помощью команды «Импорт .dxf».

В программе ELCUT сетка строится автоматически и имеет большую плотность вблизи воздушного зазора и зубцовой зоны, т.е. там, где ожидается сильная неоднородность поля. Имеется возможность адаптивного улучшения сетки по результатам ориентировочного расчета для проведения более длительного и основательного прецизионного расчета.

Характерной особенностью расчета магнитного поля и основной кривой намагничивания ТВМП в программе ELCUT является обратный порядок действий по сравнению с расчетом магнитной цепи методом, описанным, например, в [9]. В рассматриваемом случае МДС трех фазных обмоток F задаются в качестве независимых переменных, затем программа вычисляет значение основной гармоники магнитной индукции B_d в воздушном зазоре, создаваемой заданной симметричной трехфазной системой МДС, с учетом конкретной геометрии магнитопровода и основной кривой намагничивания электротехнической стали. С учетом B_d , а также принимая во внимание цилиндрическую конструкцию ТВМП с распределенными барабанными обмотками, имеющими в общем случае укороченный шаг [9], определяем магнитный поток F_d одной фазы трехфазной обмотки (ТО), а затем и ее потокосцепление Υ_d . Значение ЭДС E одной фазы ТО, наводимой потокосцеплением Υ_d и уравновешивающей приложенное извне фазное напряжение U_f , вычисляется согласно закону электромагнитной индукции:

$$E = p\sqrt{2}f\Upsilon_d, \quad (2)$$

где E – действующее значение фазной ЭДС (как правило, 220 В при соединении ТО в звезду и 380 В – в треугольник); f – частота изменения магнитного потока (если ТО выполняется на одну пару полюсов $2p=2$, то эта частота равна 50 Гц); Υ_d – среднее по модулю значение потокосцепления фазной обмотки, Вб.

Пример численного задания МДС одной из фаз в программе ELCUT показан на рис. 2, где в стро-

ке «Источники поля» значение 135 означает число реальных (не эффективных, т.е. без учета обмоточного коэффициента) витков в фазной обмотке, 2,35 – действующее значение фазного тока, протекающего по ТО. После задания симметричной трехфазной системы МДС, одинаковых по модулю и смещенных на 120° относительно друг друга, магнитные свойства стали задаются основной кривой намагничивания. При расчете магнитопровода ТВМП использованы магнитные свойства холоднокатаной изотропной электротехнической стали марки 20860 согласно [11].

После того как заданы источники магнитного поля и свойства сред, проводящих магнитное поле, программа ELCUT осуществляет процесс моделирования. Результат приведен на рис. 3 в виде карты, иллюстрирующей распределение магнитной индукции в ТВМП, рассчитанном для работы в составе преобразователя мощностью 4 кВт.

Анализ рис. 3 показывает, что энергия магнитного поля сосредоточена в двух полюсах, что подтверждает корректность моделирования, поскольку трехфазная обмотка ТВМП выполняется на одну пару полюсов [1, 2]. Магнитное поле вращается с частотой 3000 об/мин в направлении чередования фаз $A \otimes B \otimes C \otimes A$.

По рис. 3 можно оценить степень использования электротехнической стали и подтвердить правильность выбора размеров трансформатора, а также ширины зубца, толщины кольца, высоты шлица. В результате расчета можно сделать заключение

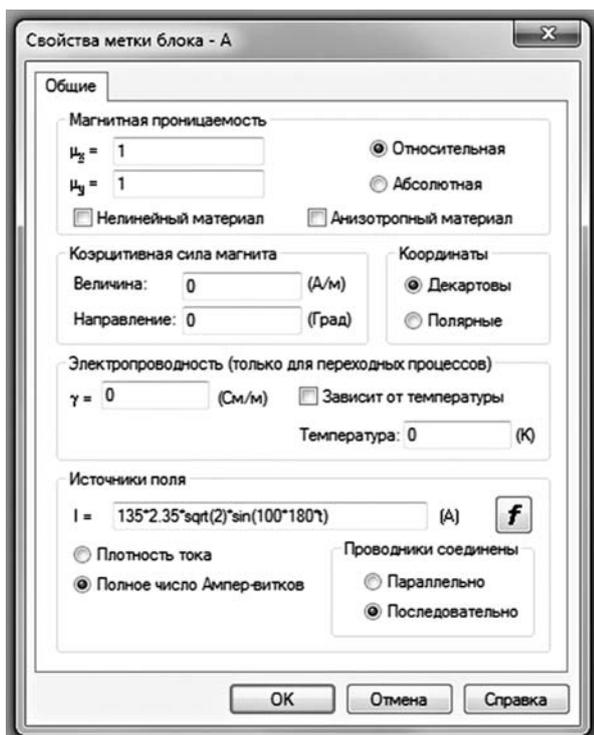


Рис. 2. Определение источников магнитного поля в ELCUT

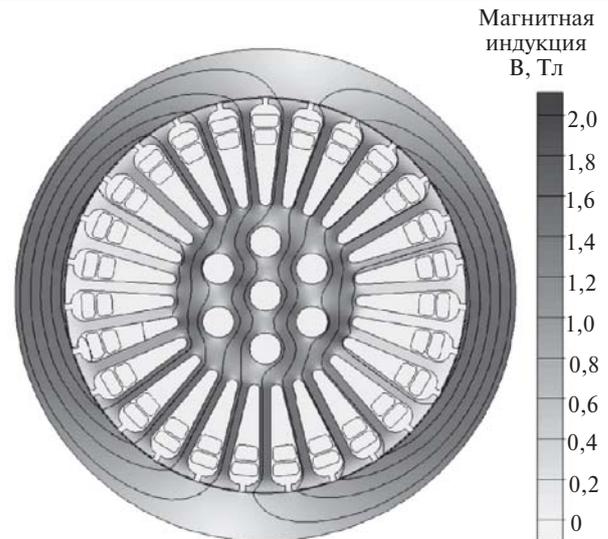


Рис. 3. Карта магнитной индукции в ТВМП мощностью 4 кВт

о правильно выбранной геометрии ТВМП, поскольку амплитудное значение магнитной индукции в стали B_{\max} находится в оптимальных пределах [9, 10], не более 2Тл. При превышении этого значения существенно увеличиваются магнитные потери на гистерезис и, соответственно, снижается КПД ТВМП и преобразователя в целом. В то же время значение B_{\max} не должно быть ниже 1 Тл во избежание недоиспользования активных материалов ТВМП и роста массогабаритных характеристик преобразователя.

На этапе расчета и проектирования ТВМП его важной характеристикой является кривая магнитного поля, которая представляет собой зависимость радиальной составляющей магнитной индукции B_d в воздушном зазоре от криволинейной координаты на протяжении двойного полюсного деления $2t$. Необходимость анализа кривой магнитного поля объясняется тем, что пространственное распределение магнитной индукции в воздушном зазоре определяет законы изменения ЭДС во времени [7, 8].

Кривая магнитного поля для ТВМП мощностью 4 кВт, полученная с помощью ELCUT, показана на рис. 4.

На этапе проектирования ТВМП геометрия магнитной цепи и электромагнитные нагрузки выбраны такими, при которых форма кривой магнитного поля наиболее приближена к синусоидальной. Особое внимание уделяется высшим гармоникам, обусловленным зубчатостью магнитопровода (так называемые гармоники зубцовых порядков, отмеченные на рис. 4), которые не вызывают дополнительного насыщения магнитной цепи. На рис. 4 это выражается в приблизительном равенстве амплитудных значений несинусоидальной кривой магнитного поля и ее основной гармоники. В

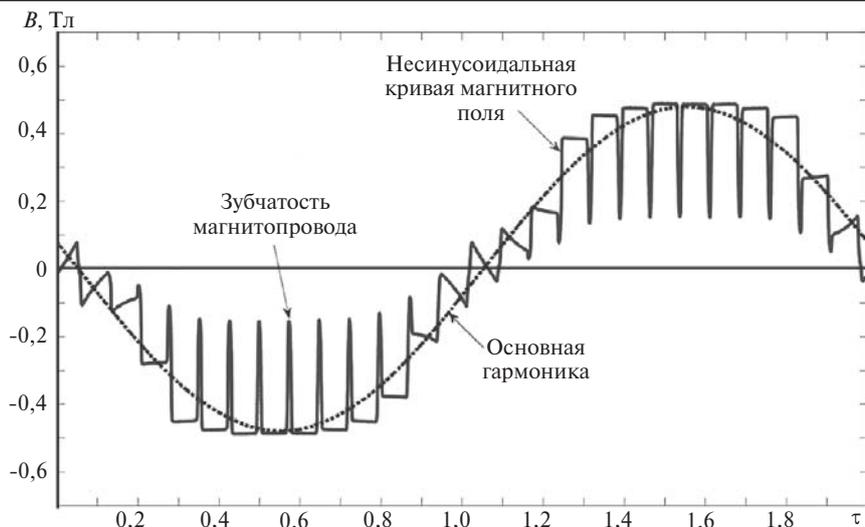


Рис. 4. Кривая магнитного поля ТВМП мощностью 4 кВт

противном случае дополнительное насыщение стали привело бы не только к увеличению магнитных потерь на гистерезис, но и к большему потреблению мощности искажений и, следовательно, к уменьшению обобщенного коэффициента мощности с преобразователя, содержащего ТВМП. Относительное значение зубцовых гармоник определяется преимущественно размером воздушного зазора и геометрией паза.

Кривая магнитного поля наряду с основной содержит высшие нечетные гармоники, которые обусловлены насыщением стали и конструкцией магнитной системы. Как и в электрических машинах, распределенные трехфазная и круговая обмотки (ТО и КО) ТВМП проектируются так, чтобы максимально скомпенсировать негативное влияние высших гармоник магнитного поля на спектральный состав ЭДС [7–10]. В случае применения ТВМП его первичные ЭДС ТО «отвечают» за качество питающего напряжения преобразователя, а вторичные ЭДС КО – за качество выходного напряжения.

Основная кривая намагничивания ТВМП или его характеристика холостого хода – еще один важный критерий для оценки правильности проектирования. Основная кривая намагничивания представляет собой зависимость действующего значения фазного напряжения ТВМП U_f от действующего значения фазного тока I_f при условии, что трансформатор не нагружен и питается симметричной m -фазной (трехфазной) системой напряжений.

На этапе расчета ТВМП основная кривая намагничивания получена путем вычисления амплитуды основной гармоники магнитной индукции в воздушном зазоре $B_{dl \max}$, графически показанной на рис. 4, при различном значении фазной МДС F , ввод которой в ELCUT проиллюстрирован на

рис. 2 и которая определяется в соответствии с выражением

$$F = I_f w, \quad (3)$$

где w – число реальных витков в одной фазе трехфазной обмотки.

Действующее значение фазного напряжения ТВМП

$$U_f = \rho \sqrt{2} f w k_1^{06} D l_d B_{dl \max}, \quad (4)$$

где f – частота питающей сети (50 Гц); $k_1^{06} < 1$ – обмоточный коэффициент ТО по основной гармонике магнитного поля, зависящий от конструктивного исполнения обмотки [8, 9]; D – внутренний диаметр внешнего магнитопровода трансформатора, м; l_d – активная длина магнитопровода трансформатора в аксиальном направлении, м.

Спроектирован ТВМП так, что точка холостого хода находится на линейном участке основной кривой намагничивания чуть ниже ее «колена».

При этом выполняется требование, чтобы ток холостого хода трансформатора I_m составлял 25–30% номинального фазного тока I_1 ТО. В этом случае в трансформаторе и преобразователе будет достигнуто оптимальное соотношение между массогабаритными и энергетическими характеристиками.

Теоретические положения по расчету и моделированию ТВМП прошли экспериментальную проверку. На предприятии АО «СПО «Арктика» (АО «ОСК») в 2012 г. проведена опытно-конструкторская работа, в результате которой был создан опытный образец управляемого выпрямителя на базе ТВМП мощностью 4 кВт с высоким качеством выходного напряжения в широком диапазоне регулирования без применения сглаживающих фильтров. Ток холостого хода преобразователя $I_m = 2,35$ А, номинальный ток $I_1 = 8,2$ А ($I_m / I_1 = 28,7\%$), КПД $\eta = 87\%$, обобщенный коэффициент мощности $s = 0,85$, удельная масса $G / P_d = 22,5$ кг/кВт.

Опытно-конструкторская работа была выполнена по заказу Минпромторга РФ по федеральной целевой программе «Развитие гражданской морской техники на 2009–2016 гг.».

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. Черевко А.И. Полупроводниковые преобразователи автономных электроустановок с трансформаторами вращающегося магнитного поля, обладающие высоким качеством выходного напряжения. – Архангельск: Изд-во Архангельского государственного университета, 2005, 115 с.
2. Дмитриев Б.Ф., Рябенский В.М., Черевко А.И., Музыка М.М., Солянов П.В. Судовые полупроводниковые преобра-

зователи: – СПб: Изд-во Санкт-Петербургского государственного морского технического университета, 2011, 526 с.

3. Черевко А.И., Музыка М.М., Платоненков С.В., Сакович И.А., Кузьмин И.Ю. Качество выходного напряжения выпрямителя, построенного на базе ТВМП, при четном и нечетном числе секций КО ТВМП. – Электротехника, 2012, № 6, с. 44–50.

4. Черевко А.И., Кузьмин И.Ю., Музыка М.М., Платоненков С.В., Сакович И.А. Зависимость качества выходного напряжения автономного инвертора с трансформатором с вращающимся магнитным полем от способов формирования напряжения и числа секций его круговой обмотки. – Изв. вузов. Электромеханика, 2012, № 4, с. 13–18.

5. Черевко А.И., Кузьмин И.Ю., Музыка М.М., Душкин Ю.В., Коптяев Е.Н. Анализ качества выходного тока автономного инвертора с трансформатором с пульсирующим магнитным полем. – Электротехника, 2012, № 6, с. 44–50.

6. Черевко А.И., Кузьмин И.Ю., Музыка М.М. Анализ качества выходного тока автономных инверторов на базе трансформаторов с вращающимися магнитными полями. – Электричество, 2012, № 11, с. 39–46.

7. Вольдек А.И., Попов В.В. Электрические машины. Введение в электромеханику. Машины постоянного тока и трансформаторы. – СПб: Питер, 2008, 320 с.

8. Вольдек А.И., Попов В.В. Электрические машины. Машины переменного тока. – СПб: Питер, 2008, 350 с.

9. Копылов И.П., Горяинов Ф.А., Клоков Б.К., Морозкин Б.К., Токарев Б.Ф. Проектирование электрических машин:

Elektrichestvo (Electricity), 2016, No. 2, pp. 39–44.

Учебное пос. для вузов/Под ред. И. П. Копылова. – М.: Энергия, 1980, 496 с.

10. Бертинов А.И., Бут Д.А., Мизюрин С.Р., Алиевский Б.Л., Синева Н.В. Специальные электрические машины. Источники и преобразователи энергии: Учебное пос. для вузов/Под ред. А.И. Бертинова. – М.: Энергоиздат, 1982, 552 с.

11. ГОСТ 3836–83. Сталь электротехническая нелегированная тонколистовая и ленты. Технические условия. – Москва: Госстандарт СССР, 1983, 9 с.

[21.09.15]

А в т о р ы : Кузьмин Илья Юрьевич окончил Севмашвуз (филиал Санкт-Петербургского государственного морского технического университета – СПбГМТУ), Северодвинск, в 2011 г. Инженер-конструктор проектно-конструкторского отдела АО «СПА «Арктика».

Черевко Александр Иванович окончил Ленинградский кораблестроительный институт в 1971 г. В 2006 г. защитил докторскую диссертацию. Профессор, заведующий кафедрой Севмашвуза, филиала Северного (арктического) федерального университета (СФУ) в Северодвинске.

Лимонникова Елена Владимировна окончила Севмашвуз, филиал СПбГМТУ, Северодвинск в 2000 г. В 2007 г. защитила кандидатскую диссертацию. Доцент кафедры Севмашвуза, филиала СФУ.

Specific Features Pertinent to Designing Transformers with Rotating Magnetic Field for Semiconductor Converters

KUZ'MIN Il'ya Yur'yevich (*Department of the Toint-Stock Company «SPO «Arktika», Severodvinsk, Russia*) – Engineer-designer

CHEREVKO Aleksandr Ivanovich (*Branch of the North (Arctic) Federal University (NFU), Severodvinsk, Russia*) – Professor, Dr. Sci. (Eng.)

LIMONNIKOVA Elena Vladimirovna (*Branch of the NFU, Severodvinsk, Russia*) – Professor, Dr. Sci. (Eng.) – Associate Professor, Cand. Sci. (Eng.)

The principles of a procedure for calculating the magnetic circuit of a transformer with rotating magnetic field (RMFT) are elaborated. The calculation is carried out using dedicated software implementing the finite element method in modeling the RMFT magnetic field. It is shown that the experience gained from designing core-type transformers and electrical machines is of little use for calculating and designing RMFTs. A sequence of steps to be done for obtaining the magnetic induction map—an important criterion in determining the correctness of RMFT designing—has been established. The definition of a magnetic field curve is given, and the significance of its analysis for obtaining the RMFT primary and secondary voltages with the minimal set of higher harmonic components is explained. The sequence of steps for plotting the RMFT fundamental magnetization curve is presented, and recommendations for placing the no-load point on this curve are given. The result of applying the proposed procedure is illustrated on the example of designing the RMFT for a 4-kW controlled rectifier.

Key words: semiconductor rectifier, transformer with rotating magnetic field, finite element method, dedicated software, magnetic field curve, no-load characteristic

REFERENCES

1. Cherevko A.I. *Poluprovodnikovye preobrazovateli avtonomnykh elektroustanovok s transformatorami vrashchayushchegosya magnitnogo polya, obladayushchiye vysokim kachestvom vykhodnogo napryazheniya* (Semiconductor Converters of Self-Contained Electric Installations Equipped with Rotating Magnetic Field Transformers Featuring a

High-Quality Output Voltage). Arkhangel'sk, Publ. Arkhangel'sk State Technical University, 2005, 115 p.

2. Dmitriyev B.F., Ryaben'kii V.M., Cherevko A.I., Muzyka M.M., Soluyanov P.V. *Sudovye poluprovodnikovye preobrazovateli* (Ship Semiconductor Converters). St. Petersburg, Publ. St. Petersburg Sea Technical University, 2011, 526 p.

3. Cherevko A.I., Muzyka M.M., Platonenkov S.V., Sakovich I.A., Kuz'min I.Yu. *Elektrotehnika – in Russ. (Power Engineering)*, 2012, No. 6, pp. 44–50.
4. Cherevko A.I., Kuz'min I.Yu., Muzyka M.M., Platonenkov S.V., Sakovich I.A. *Izv. vuzov. Elektromekhanika – in Russ. (News of Higher Education Institutions. Electromechanics)*, 2012, No. 4, pp. 13–18.
5. Cherevko A.I., Kuz'min I. Yu., Muzyka M.M., Dushkin Yu.V., Koptayev E.N. *Elektrotehnika – in Russ. (Power Engineering)*, 2012, No. 6, pp. 44–50.
6. Cherevko A.I., Kuz'min I.Yu., Muzyka M.M. *Elektrichestvo – in Russ. (Electricity)*, 2012, No. 11, pp. 39–46.
7. Vol'dek A.I., Popov V.V. *Elektricheskiye mashiny. Vvedeniye v elektromekhaniki. Mashiny postoyannogo toka i transformatory* (Electrical machines. Introduction to electromechanics. DC machines and transformers). St. Petersburg; Publ. «Piter», 2008, 320 p.
8. Vol'dek A.I., Popov V.V. *Elektricheskiye mashiny. Mashiny peremennogo tpa* (Electrical machines. AC machines). St. Petersburg. Publ. «Piter», 2008, 350 p.
9. Kopylov I.P., Goryainov F.A., Klovov B.K., Morozkin V.P., Tokarev B.F. *Proyektirovaniye elektricheskikh mashin: Uchebnoye pos. dlya vuzov/Pod red. I.P. Kopylova* (Electrical machines designing/Edit. by I.P. Kopylov). Moscow, Publ. «Energiya», 1980, 496 p.
10. Bertinov A.I., Dut D.A., Mizyurin S.R. Aliyevskii B.L., Sineva N.V. *Spetsial'nye elektricheskiye mashiny. Istochniki i preobrazovateli energii: Uchebnoye pos. dlya vuzov/Pod red A.I. Bertinova* (Special electrical machines. Sources and energy convertors/Edit. by A.I. Bertinov). Moscow, Publ. Energoizdat, 1982, 552 p.
11. GOST 3836-83. *Stal' elektrotekhnicheskaya nelegirovannaya tokolistovaya i lenty. Tekhnicheskiye usloviya* (GOST (State Standard) 3836-83: Electrotechnical Unalloyed Steel Thin Sheets and Bands. Specifications). Moscow, Publ. Gosstandart, 1983, 9 p.