

Математическая модель автономного инвертора, построенного на базе трансформатора с вращающимся магнитным полем

КУЗЬМИН И.Ю., ЧЕРЕВКО А.И.

Предлагаются пути решения широко известной проблемы электромагнитной совместимости, особенно важной для автономных электроэнергетических систем. Применение нового класса полупроводниковых преобразователей, построенных на базе трансформатора с вращающимся магнитным полем (ТВМП), является одним из таких путей, по мнению авторов, наиболее перспективным. Описывается разработанная в среде MATLAB Simulink математическая модель автономного инвертора (АИ) с ТВМП, работающая в составе электротехнического комплекса на активную, активно-индуктивную нагрузки, а также на асинхронный двигатель с короткозамкнутым ротором. Раскрыто назначение основных элементов модели. Приведены уравнения, положенные в основу математической модели ТВМП, – силового ядра АИ. Показаны осциллограммы фазных напряжений и их спектры при работе АИ мощностью 12 кВА на нагрузку различного характера соизмеримой мощности. Для каждого случая рассчитаны значения полной, активной и реактивной мощности, коэффициент гармоник выходного напряжения. Отмечены достоинства предложенной модели АИ с ТВМП, а также обоснованы упрощения, принятые при её разработке.

Ключевые слова: трёхфазный автономный инвертор, трансформатор с вращающимся магнитным полем, математическое моделирование, качество электроэнергии, взаимная индуктивность, дифференциальное уравнение

Полупроводниковые преобразователи электрической энергии, построенные на базе трансформаторов с вращающимися магнитными полями (ТВМП), представляют собой новый тип преобразователей [1]. При их разработке и создании решаются проблемы электромагнитной совместимости (ЭМС) и снижения виброшумовых характеристик (ВШХ) электрооборудования, которые особенно остро проявляются в автономных судовых электро- и энергоустановках [2, 3]. Требуемый уровень ЭМС в автономных электроустановках обеспечивается за счёт использования, например, пассивных реактивных фильтров, компенсаторов реактивной мощности и фильтрокомпенсирующих устройств [4], а также за счёт применения новых схемотехнических решений при формировании силовых схем полупроводниковых преобразователей [5–7].

Особо стоит отметить, что при увеличении мощности реактивных фильтров и фильтрокомпенсирующих устройств их массогабаритные и стоимостные показатели возрастают до уровня, сопоставимого с таковыми показателями самих преобразовательных агрегатов, поэтому применение их для обеспечения требуемого уровня ЭМС в автономной электроэнергетической системе оказывается малоэффективным [1, 8].

В [1] показано, что на базе ТВМП возможно реализовать не только выпрямители, но и автономные инверторы, преобразователи частоты, обратимые

преобразователи. Особый интерес представляет исследование работы автономного инвертора с ТВМП, поскольку его можно использовать как самостоятельно, так и в качестве выходного звена преобразователя частоты со звеном постоянного тока, а также в качестве составной части обратимого преобразователя.

На начальном этапе проектирования инвертора с ТВМП, как и любого другого полупроводникового преобразователя, и подготовки технического предложения в соответствии с [9] необходимо гарантировать возможность преобразования электрической энергии в предлагаемом устройстве, а также получить ориентировочные соотношения, указывающие на количественные энергетические характеристики в проектируемом преобразователе.

Решение поставленной задачи возможно посредством применения математического моделирования, которое для сложных нелинейных электрических и электромеханических систем наиболее полно может быть реализовано в программном продукте MATLAB Simulink [10, 11]. С применением данного программного продукта численно решаются системы интегрально-дифференциальных уравнений различными явными и неявными методами, каждый из которых по-разному эффективен для описания жёстких и нежёстких электрических систем [12].

Кроме того, для определения потенциальной области применения проектируемого преобразователя важно, используя полученную математическую модель, правильно рассчитать его энергетические характеристики не только при номинальной мощности, но и в режимах ее частичных значений.

Принципиальная схема автономного инвертора (АИ), построенного на базе ТВМП и используемого для создания математической модели, приведена на рис. 1. В рассматриваемом случае АИ выполнен на девять пар ($N=9$) силовых ключей (СКЛ), поскольку ТВМП содержит девять секций первичной круговой обмотки (КО), следовательно, пространственный угол между магнитными осями смежных секций КО составляет 40° .

В соответствии с рис. 1 в АИ с ТВМП энергия постоянного тока напряжением U_d поступает на сборные шины, а переключение СКЛ $VT1.1-VT9.2$ коммутатора по определённому алгоритму позволяет создавать с помощью неподвижной КО вращающееся магнитное поле, которое индуцирует в неподвижной трёхфазной обмотке (ТО) симметричную трёхфазную систему ЭДС. Таким образом в АИ с ТВМП первичной обмоткой становится замкнутая на себя КО, выводы которой переключаются транзисторным коммутатором (ТК), а трёхфазная

обмотка становится вторичной (выходной) обмоткой. Максимальное число секций КО ТВМП определяется требуемым качеством выходного напряжения [13], особенностями магнитной системы ТВМП [14], массогабаритными и стоимостными показателями ТК.

При разработке модели АИ с ТВМП, работающего в составе электротехнического комплекса, были приняты допущения:

пренебрегается физически существующей нелинейностью элементов электрической цепи вследствие насыщения магнитопровода ТВМП, поэтому собственные и взаимные индуктивности представлены здесь постоянными величинами. Как показано в [15], магнитная система ТВМП проектируется так, чтобы рабочая точка находилась на линейном участке основной кривой намагничивания, поэтому принятое допущение практически не влияет на результаты моделирования;

пренебрегается физическим явлением магнитного гистерезиса, математическое описание которого представляет собой сложную задачу теории поля [16]. Данное допущение основывается на том, что магнитная система ТВМП не насыщается [17];

модель не учитывает наличия высших гармоник магнитного поля, а также их влияния на качество

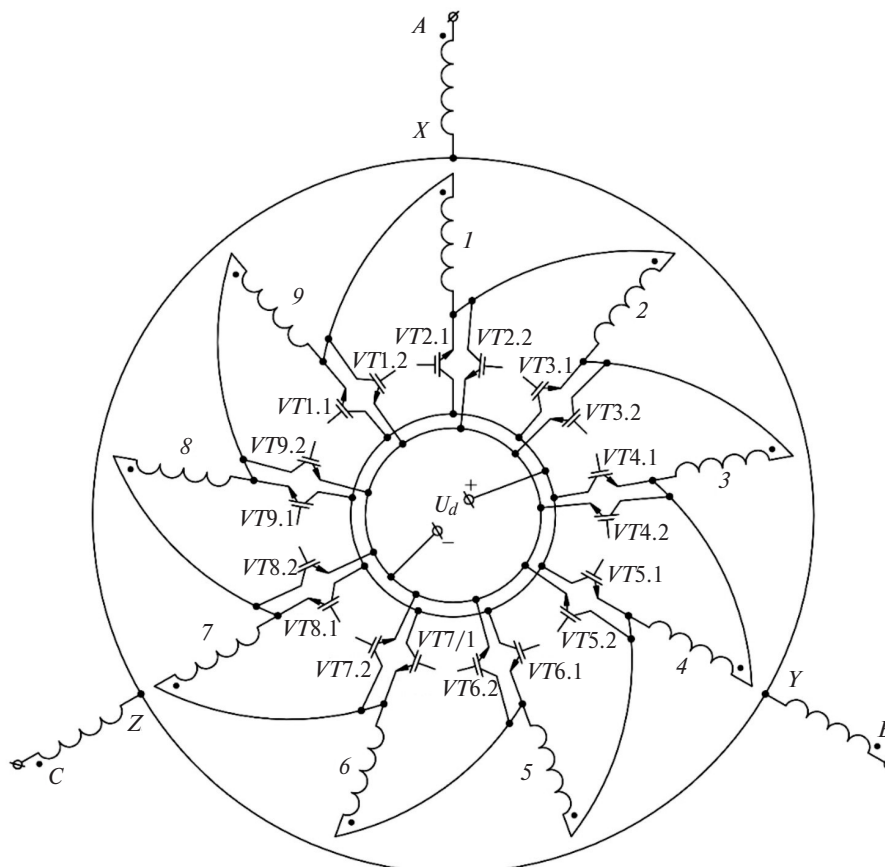


Рис. 1. Принципиальная схема АИ с ТВМП, выполненного на девять пар силовых ключей

питающего и выходного напряжения и тока – данный вопрос рассмотрен в [15]; модель не предусматривает расчёта активных сопротивлений и собственных индуктивностей обмоток ТВМП, так как эти параметры должны быть определены на этапе полевого расчёта, методология которого приведена в [15].

Разработанная математическая модель показана на рис. 2 и включает основные элементы: ТВМП, имеющий ТО и девятисекционную КО;

анодная группа СКЛ, выполненная на девяти IGBT-транзисторах;

катодная группа СКЛ, также выполненная на девяти IGBT-транзисторах;

блок антипараллельных диодов, необходимых для надёжного закрывания IGBT-транзисторов и обеспечения безопасности их работы (антипараллельные диоды снабжены токоограничивающими резисторами);

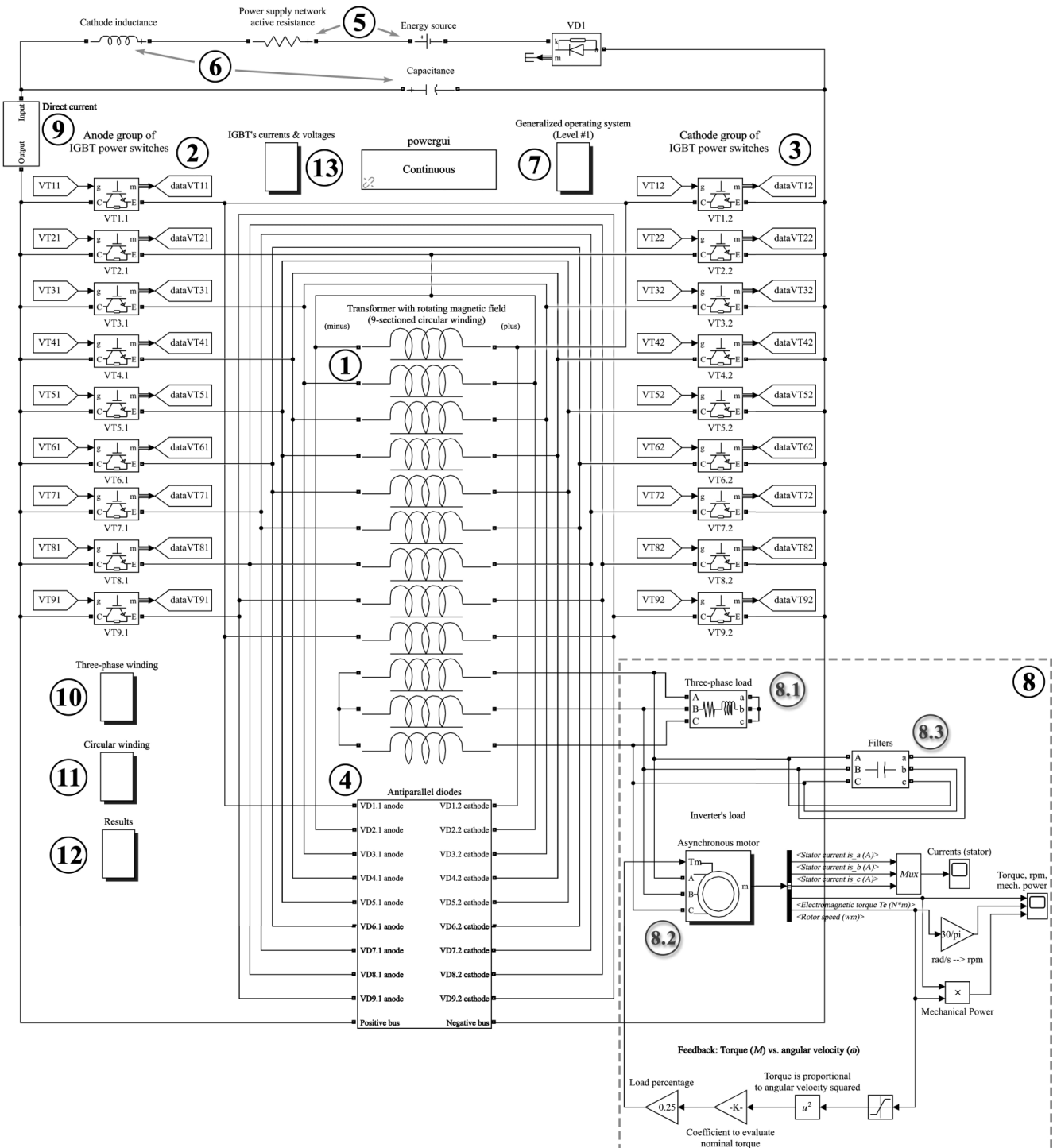


Рис. 2. Математическая модель электротехнического комплекса с АИ с ТВМП в среде MATLAB Simulink

источник электрической энергии постоянного тока с активным внутренним сопротивлением (для имитации электрической сети конечной мощности);

электрический фильтр низких частот на стороне постоянного тока;

система управления IGBT-транзисторами, представляющая собой отдельную вложенную модель, реализующая определённый алгоритм управления [1];

нагрузка АИ с ТВМП различного характера, позволяющая исследовать работу преобразователя в следующих условиях:

работа на активную или активно-индуктивную нагрузку;

работа на асинхронный электропривод (активно-индуктивная нагрузка с противоЭДС) с различными законами обратной связи по вращающему моменту [17];

работа при введении фильтра на стороне переменного тока для уменьшения коэффициента гармоник выходного напряжения, а также для компенсации реактивной мощности в целях повышения КПД электротехнического комплекса [18].

IGBT-транзисторы в анодной и катодной группах снабжены бесконденсаторными снаберными (шунтирующими) цепочками сопротивлением 500 кОм.

В целях оценки качества и энергетической эффективности работы электротехнического комплекса с АИ с ТВМП разработанная модель снабжена встроенными подсистемами, реализующими измерение различных параметров:

система, измеряющая токи, напряжения и мощности на стороне постоянного тока (на входе АИ с ТВМП);

система измерения токов, напряжений, мощностей, а также параметров КЭ для обмоток, входящих во вторичную ТО (на стороне переменного тока, т.е. на выходе АИ с ТВМП);

система измерения токов, напряжений, мощностей, а также параметров КЭ для обмоток, входящих в первичную КО;

система измерения энергетических характеристик электротехнического комплекса (полная, активная, реактивная мощности, мощность искажений и несимметрии, КПД ТВМП, АИ, комплекса в целом, коэффициент несимметрии по обратной последовательности и др.);

система, измеряющая мгновенные значения токов и напряжений на каждом из 18 СКЛ.

Разработанная математическая модель АИ с ТВМП обладает определёнными особенностями, которые были заложены при её создании с целью

обоснованного сокращения числа элементов и уменьшения времени расчёта:

отсутствие индуктивностей рассеяния обмоток ТВМП;

пренебрежение магнитными потерями в магнитопроводе ТВМП.

Отмеченные особенности, однако, не сказываются на качественном описании электромагнитных процессов в рассматриваемом комплексе и могут быть легко устранены, если при проектировании потребуется более точный расчёт количественных значений физических величин, характеризующих работу АИ с ТВМП.

Ключевым элементом модели комплекса, представленного на рис. 2, является модель ТВМП (поз. 1), разработанная на основе $N+3=12$ уравнений, составленных по второму закону Кирхгофа для каждой из 12 обмоток ТВМП. Уравнение для каждой обмотки имеет вид:

$$R_m i_m(t) + L_m \frac{di_m(t)}{dt} + \sum_{\substack{k=1 \\ k \neq m}}^{N+3} M_{m,k} \frac{di_k(t)}{dt} = u_m(t), \quad (1)$$

где индекс обмотки $m=1, \overline{N+3}$, при этом секциям КО 1– N сопоставляются индексы $m=\overline{1, N}$, а фазным обмоткам A, B, C – индексы $m=\overline{N+1, N+3}$; $i_m(t)$, $u_m(t)$ – мгновенные значения тока и напряжения соответствующей m -й обмотки; R_m , L_m – её активное сопротивление и собственная индуктивность. Взаимные индуктивности m -й обмотки ТВМП с каждой другой из обмоток определяются в (1) коэффициентами $M_{m,k}$, которые учитывают пространственное расположение обмоток на цилиндрическом магнитопроводе ТВМП и могут быть разделены на следующие три группы.

1. Взаимные индуктивности секций КО друг с другом, которые рассчитываются по формуле:

$$M_{m,k} = \gamma \sqrt{L_m L_k} \cos\left((m-k) \frac{2\pi}{N}\right), \quad (2)$$

где $m, k=\overline{1, N}$, $m \neq k$, коэффициент магнитной связи γ может быть принят равным примерно 0,98 [1, 18]; L_m , L_k – собственные индуктивности m -й и k -й секций КО. При разработке математической модели ТВМП авторами было решено принять во внимание, что на практике возможны небольшие различия между значениями индуктивностей секций КО из-за несовершенства технологии выполнения обмоток и наличия несимметрии, однако теоретически всегда должно иметь место равенство $L_m = L_k$. Более того, допущение о возможности иметь в общем случае $L_m \neq L_k$ позволит моделировать аварийные процессы в АИ с ТВМП при меж-

витковом замыкании, когда часть обмотки выходит из работы.

Значение $M_{m,k} < 0$, полученное по (2), означает, что секции КО включены встречно и компенсируют собственные магнитные поля.

2. Взаимные индуктивности фаз трехфазной обмотки (ТО) друг с другом, которые рассчитываются по формуле:

$$M_{m,k} = -\frac{\gamma}{2} \sqrt{L_m L_k}, \quad (3)$$

где $m, k = \overline{N+1, N+3}$, $m \neq k$, L_m, L_k – собственные индуктивности m -й и k -й фазных обмоток ТО. В (3) учтено, что пространственный угол между магнитными осями фазных обмоток, входящих в ТО, составляет 120° .

3. Взаимные индуктивности секций КО с фазами A, B, C трехфазной обмотки, которые рассчитываются по формулам:

$$M_{m, N+1} = M_{N+1, m} = \gamma \sqrt{L_m L_A} \cos\left((m-1) \frac{2\pi}{N}\right); \quad (4)$$

$$M_{m, N+2} = M_{N+2, m} = \gamma \sqrt{L_m L_B} \cos\left((m-1) \frac{2\pi}{N} - \frac{2\pi}{3}\right); \quad (5)$$

$$M_{m, N+3} = M_{N+3, m} = \gamma \sqrt{L_m L_C} \cos\left((m-1) \frac{2\pi}{N} + \frac{2\pi}{3}\right), \quad (6)$$

где $m = \overline{1, N}$; при расчёте учтено также, что вследствие несимметрии и особенностей выполнения обмоток может иметь место различие в значениях собственных индуктивностей фазных обмоток ТО ТВМП $L_A \neq L_B \neq L_C$.

На основании вышеизложенного установлено, что суммарное число всех магнитных связей в ТВМП Q_M в функции числа секций его КО N может быть описано формулой:

$$Q_M = 0,5N^2 + 2,5N + 3. \quad (7)$$

Результаты вычислений по (7) приведены ниже для числа пар секций КО ТВМП от 3 до 15:

N	3	4	5	6	7	8	9	10	11	12	13	14	15
Q_M	15	21	28	36	45	55	66	78	91	105	120	136	153

Видим, что с увеличением числа пар СКЛ (или числа секций КО N) число магнитных связей Q_M внутри силовой схемы АИ, которое необходимо учитывать в математической модели при анализе его электромагнитных процессов, возрастает в квадратичной зависимости от числа секций КО N . В рассматриваемом случае (см. рис. 1, 2) число магнитных связей довольно велико и равно 66, что,

однако, компенсируется унификацией их расчёта по (2)–(6) и может быть выполнено с помощью встроенных средств MATLAB.

С помощью представленной модели было проведено исследование работы АИ с ТВМП на электрическую нагрузку различного характера (см. поз. 8 на рис. 2). При моделировании использованы параметры обмоток экспериментального образца ТВМП (изготовлен на АО «СПО «Арктика», г. Северодвинск), спроектированного для работы в составе ПП мощностью 12 кВА. Параметры обмоток ТВМП (12 кВА): секция первичной круговой обмотки – $R=67,7$ мОм, $L=12,6$ мГн; фаза вторичной трехфазной обмотки – $R=272$ мОм, $L=110$ мГн.

Рассмотрим работу АИ с ТВМП на активную нагрузку мощностью 12 кВт. Кривая фазного выходного напряжения (a), полученная при моделировании, а также её спектр (b) показаны на рис. 3.

В [13] было аналитически установлено число секций КО ТВМП $N=9$, необходимое для обеспечения качества выходного напряжения АИ, удовлетворяющего требованиям [19, 20] без применения дополнительных мероприятий. Из анализа рис. 3 следует, что разработанная модель позволяет рассчитать более точное значение коэффициента гармоник по напряжению, которое получается меньше (6,8% на рис. 3, a против 10%, определённого аналитически в [13]) вследствие учёта в модели индуктивностей фазных обмоток ТО.

При оценке работы АИ с ТВМП на активно-индуктивную нагрузку с полной мощностью 12 кВА примем добротность нагрузки равной 0,5, что соответствует коэффициенту мощности около 0,89. Кривая фазного выходного напряжения, полученная в процессе моделирования при таких параметрах, а также её спектр показаны на рис. 4.

Из анализа кривой выходного фазного напряжения АИ на рис. 4, a , следует, что при активно-индуктивном характере нагрузки форма кривой выходного напряжения АИ с ТВМП дополнительно искажается, что требует применения фильтров на выходе АИ для уменьшения коэффициента гармоник по напряжению.

На рис. 5 показаны результаты моделирования АИ с ТВМП при фильтрации выходного напряжения. В качестве фильтрующих элементов были использованы конденсаторы, включённые по схеме треугольника (см. поз. 8.3 на рис. 2). Установлено, что для заданных параметров электротехнического комплекса достаточно иметь электроёмкость около 7 мкФ, чтобы обеспечить значение коэффициента гармоник выходного напряжения АИ не более 10%, как это регламентируется морским регистром [19].

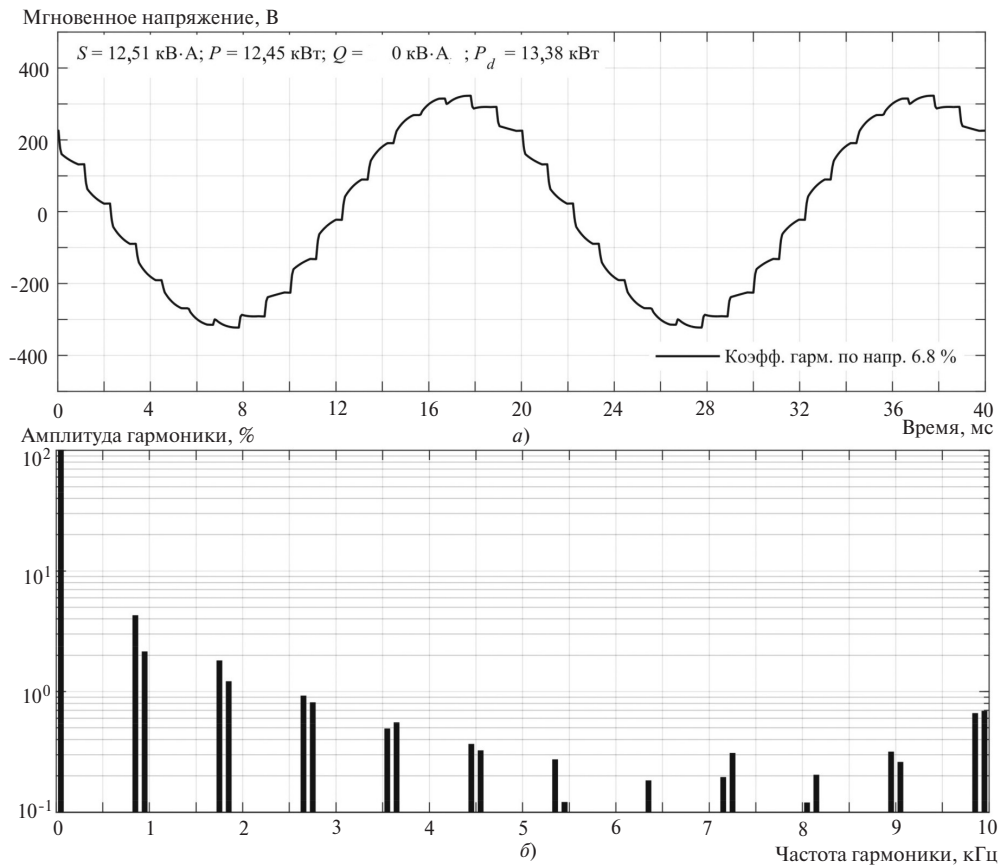


Рис. 3. Кривая напряжения фазы (а) и спектр (б) АИ с ТМП при работе на активную нагрузку; на рис. 3 и далее S , P , Q — полная, активная и реактивная мощности, развиваемые АИ с ТМП; P_d — мощность, потребляемая инвертором от источника постоянного тока (см. поз. 5 на рис. 2)

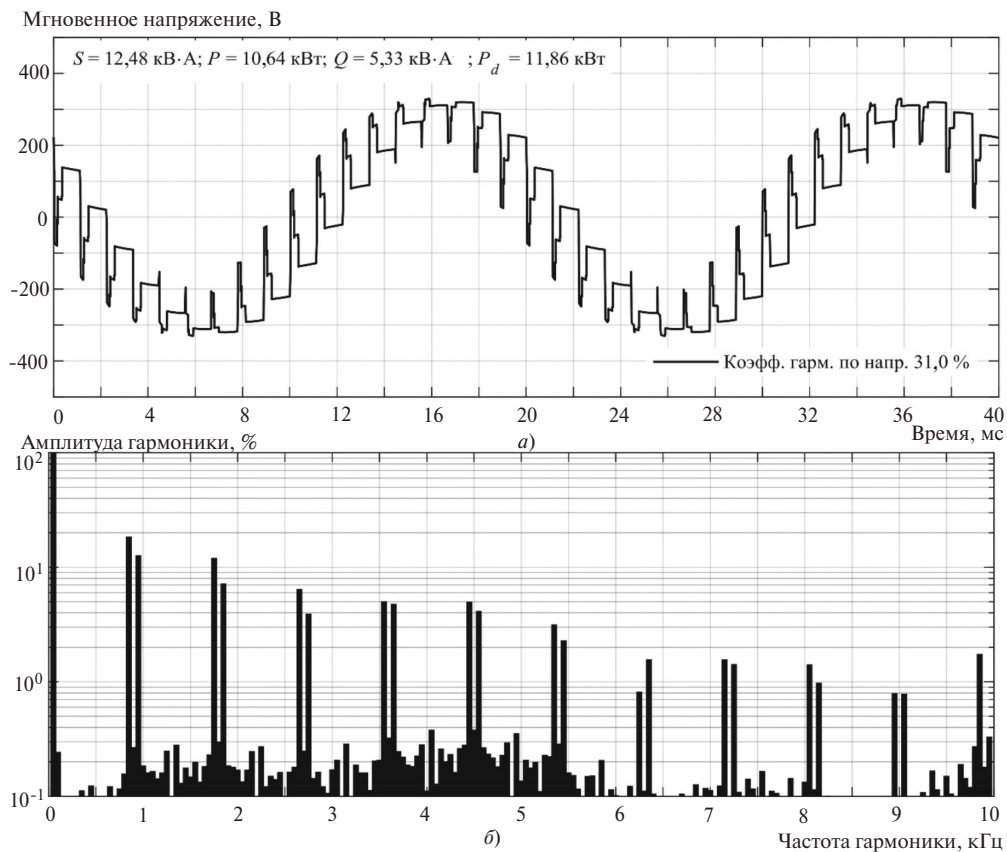


Рис. 4. Кривая напряжения фазы (а) и спектр (б) АИ с ТМП при работе на активно-индуктивную нагрузку с добротностью 0,5 без фильтрации

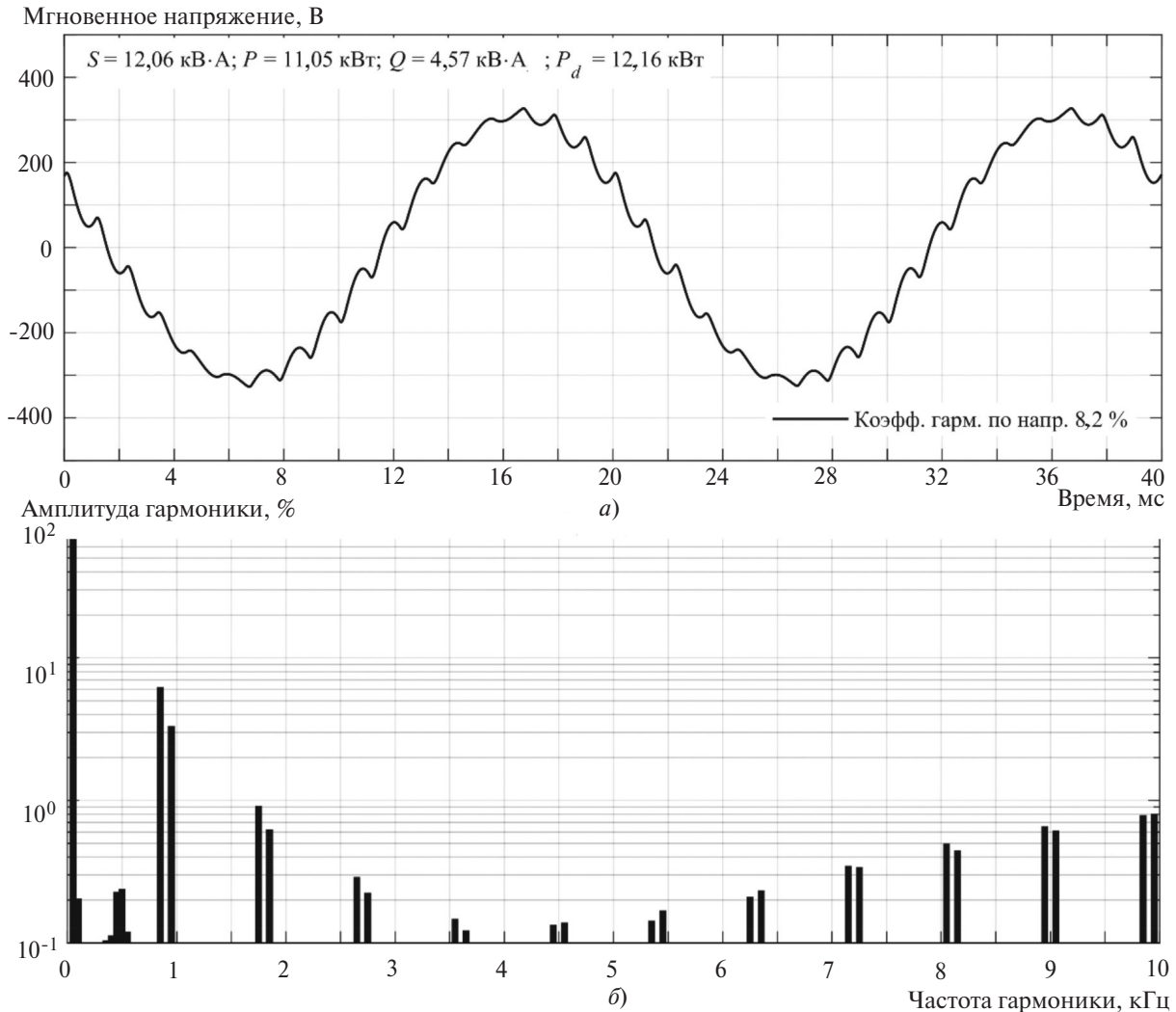


Рис. 5. Кривая напряжения фазы (а) и спектр (б) АИ с ТВМП при работе на активно-индуктивную нагрузку с добротностью 0,5 при наличии фильтрации

Математическое моделирование показывает, что при электроёмкости конденсаторов 7 мкФ коэффициент гармоник выходного напряжения АИ составит 8,2%, как показано на рис. 5,а.

Из сопоставления численных значений мощностей на рис. 4,а и 5,а следует, что КПД АИ при наличии фильтрации увеличился на 1,2 процентных пункта до 90,9% вследствие частичной компенсации реактивной мощности Q , при этом решена задача обеспечения требуемого качества выходного напряжения АИ. Разработанная модель также может быть использована для расчёта максимально возможного КПД электротехнического комплекса, который будет достигнут в случае полной компенсации реактивной мощности на стороне переменного тока [2].

Разработанная математическая модель АИ с ТВМП позволяет проводить исследования работы АИ в том числе и на активно-индуктивную нагрузку с противоЭДС, в частности на асинхронный электродвигатель. В качестве примера в модели был использован морской двигатель с коротко-

замкнутым ротором типа ДМ160L6 (ЖАЕИ.520220.003ТУ) номинальной мощности 7,5 кВт, при этом его нагрузка с вентиляторной механической характеристикой $M \approx n^2$ (см. поз. 8.2 на рис. 2) была равна номинальной, что соответствует механическому моменту сопротивления 74 Нм при частоте вращения 965 об/мин. В данном режиме активная мощность, потребляемая двигателем, составляет 8,9 кВт (КПД 84%), а полная — 12,4 кВА ($\cos\varphi=0,72$), что соответствует номинальной мощности АИ с ТВМП. Кривые напряжения фазы A и тока двигателя, полученные при моделировании, а также спектр кривой напряжения показаны на рис. 6.

Из рис. 6 следует, что коэффициент гармоник по напряжению в рассматриваемом случае также не превышает нормируемого значения в 10%. Расчёт с помощью модели показывает, что в целях обеспечения требуемого качества выходного напряжения АИ, электроёмкость конденсаторов (см. поз. 8.3 на рис. 2), включённых между фазами, должна быть равна 8 мкФ.

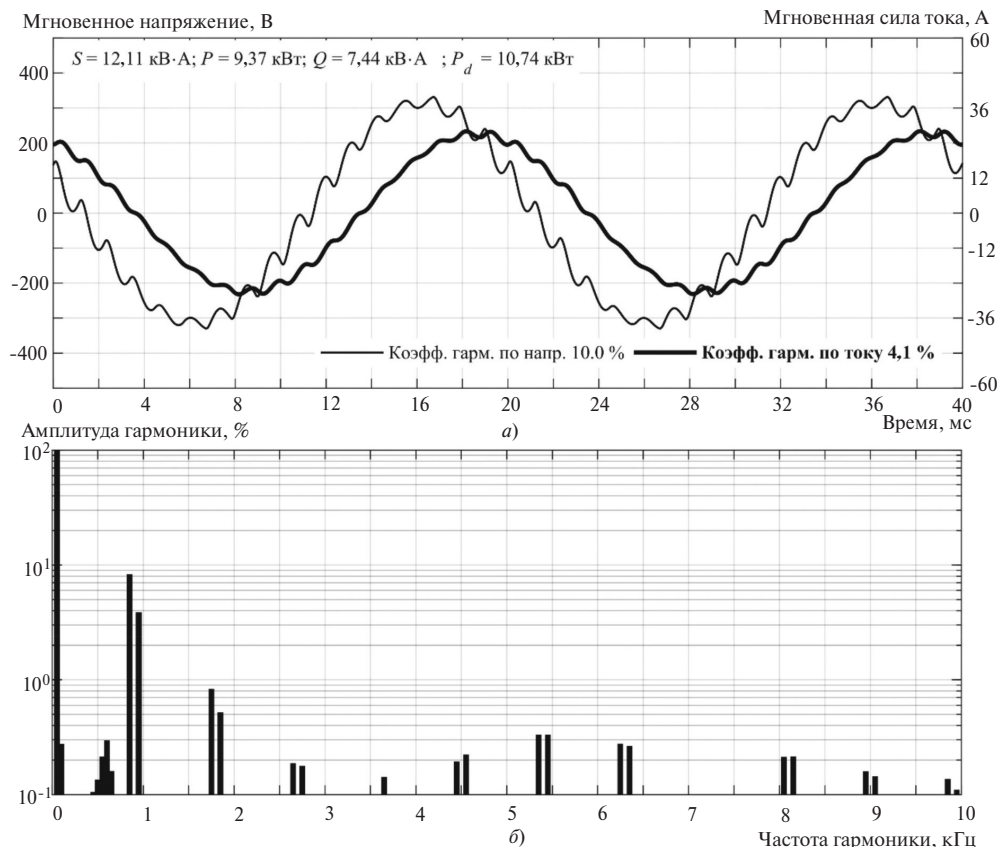


Рис. 6. Кривые напряжения и тока фазы А (а), а также спектр кривой напряжения (б) АИ с ТВМП при работе с номинальной мощностью на асинхронный электродвигатель ДМ160L6

Заключение. Разработанная модель АИ с ТВМП может быть применена для исследования работы преобразователей в широком диапазоне значений выходной мощности, соответствующих как длительным и кратковременным перегрузкам, так и работе в режимах частичных значений мощности.

Модель отличается следующими достоинствами: основана на численном решении (интегрировании) системы дифференциальных уравнений Парка–Горева [18], составленных для ТВМП с учётом всех имеющихся магнитных связей между его обмотками (7), вследствие чего гарантирует корректность моделирования с математической точки зрения при любых начальных условиях и параметрах электротехнического комплекса;

позволяет учитывать следующие виды несимметрии: различие между активными сопротивлениями и индуктивностями обмоток ТВМП, несимметрию параметров IGBT-транзисторов, антипараллельных диодов, токоограничивающих резисторов, несимметрию импульсов управления силовыми вентилями [3];

позволяет учитывать процессы, происходящие при коммутации тока с одного силового вентиля на другой (т.е. физические абстракции мгновенного изменения направления тока в обмотке на противоположное и мгновенного броска тока с одного

силового вентиля на другой не используются), а также влияние параметров снабберных цепочек СКЛ на коммутационные процессы;

позволяет определить формы кривых токов, протекающих через СКЛ и антипараллельные диоды, а также формы кривых напряжений, приложенных к ним, с целью выбора полупроводниковых элементов по току, напряжению, мощности;

позволяет проводить исследование работы АИ с ТВМП в аварийных режимах при неисправности любого числа СКЛ с имитацией обрыва или короткого замыкания;

позволяет включить в свой состав фильтр(ы) со стороны постоянного и/или переменного тока с различной схмотехнической реализацией;

при изменении алгоритма управления СКЛ позволяет исследовать процессы, происходящие при регулировании выходного напряжения и/или частоты АИ по различным законам;

при изменении силовой части и ТК позволяет осуществлять моделирование других типов преобразователей с ТВМП.

Предлагаемый авторами подход к математическому моделированию АИ с ТВМП может быть успешно применён как к преобразователям частоты, так и обратимым преобразователям с целью исследования физической возможности преобразования

электрической энергии с использованием вращающихся магнитных полей при сохранении высоких энергетических характеристик и обеспечении высокого качества электроэнергии.

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. **Дмитриев Б.Ф., Рябенский В.М., Черевко А.И., Музыка М.М.** Судовые полупроводниковые преобразователи: Учебник по курсу «Полупроводниковые преобразователи», 2-е изд., перераб. и доп. — Архангельск: Северный (Арктический) федеральный университет (САФУ), 2015, 556 с.
2. **Анисимов Я.Ф., Васильев Е.П.** Электромагнитная совместимость полупроводниковых преобразователей и судовых электроустановок. Л.: Судостроение, 1990.
3. **Розанов Ю.К., Рябчицкий М.В., Кваснюк А.А.** Силовая электроника. М.: Изд. дом МЭИ, 2007, 632 с.
4. **Яценко А.С.** Комбинированные силовые резонансные фильтры. — Изв. вузов. Энергетика, 1985, № 9, с. 22–27.
5. **Иванов В.А., Иванова Н.А., Шукалов В.Ф.** Многофазные выпрямители на базе трансформаторов с вращающимся магнитным полем. Электромашинные элементы автоматики: Межвузовский сб./Под ред. В.В. Хрущева. Ленинградский электротехнический институт, 1980, 128 с.
6. **А. с. 524234 (СССР).** Статический регулируемый трансформатор с вращающимся магнитным полем/ В.Ф. Шукалов, Н.А. Иванова. — БИ, 1976, № 29.
7. **Воршевский А.А., Гальперин В.Е.** Электромагнитная совместимость судовых технических средств. Санкт-Петербургский государственный морской технический университет, 2006, 317 с.
8. **Зиновьев Г.С.** Итоги решения некоторых проблем электромагнитной совместимости вентиляльных преобразователей. — Электротехника, 2000, № 11, с. 12–16.
9. **ГОСТ 2.103-2013** (Взамен ГОСТ 2.103-68), введен 2015-07-01. Единая система конструкторской документации (ЕСКД). Москва: Стандартинформ, 2015.
10. **Герман-Галкин С.Г.** Компьютерное моделирование полупроводниковых систем. MatLab 6.0. Санкт-Петербург: Корона принт, 2001, 320 с.
11. **Черных И.В.** SIMULINK: среда создания инженерных приложений/Под общ. ред. В.Г. Потемкина. М.: Диалог-МИФИ, 2003, 496 с.
12. **Кетков Ю.Л., Кетков А.Ю., Шульц М.М.** MATLAB 6.x.: программирование численных методов. СПб.: БХВ-Петербург, 2004, 672 с.

13. **Черевко А.И., Кузьмин И.Ю., Музыка М.М., Платонов 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, № 3, с. 13–18.

14. **Кузьмин И.Ю., Черевко А.И., Лимонникова Е.В.** Влияние конструктивных особенностей трансформатора с вращающимся магнитным полем на качество выходного напряжения автономного инвертора. — Электротехника, 2015, № 8, с. 11–16.

15. **Кузьмин И.Ю., Черевко А.И., Лимонникова Е.В.** Особенности проектирования трансформаторов с вращающимся магнитным полем для полупроводниковых преобразователей. — Электричество, 2016, № 2, с. 39–44.

16. **Калантаров П.Л., Цейтлин Л.А.** Расчёт индуктивностей, 2-е изд. Ленинград: Энергия, 1970, 415 с.

17. **Вольдек А.И., Попов В.В.** Электрические машины. Машины переменного тока. Санкт-Петербург: Питер, 2008, 350 с.

18. **Специальные электрические машины.** Источники и преобразователи энергии: Учебное пос. для вузов/Под ред. А.И. Бертинова. М.: Энергоиздат, 1982, 552 с.

19. **Российский морской регистр судоходства** — Правила классификации и постройки морских судов. Санкт-Петербург, 2014, т. 2.

20. **ГОСТ 32144-2013** (Взамен ГОСТ Р 54149-2010), введен 2014-07-01. Электрическая энергия. Совместимость технических средств электромагнитная. Нормы качества электрической энергии в системах электроснабжения общего назначения. М.: Стандартинформ, 2014, 19 с.

[21.05.2018]

А в т о р ы: Кузьмин Илья Юрьевич окончил Севмашвуз — филиал Северного (Арктического) федерального университета — СФУ. Инженер-конструктор АО «СПО «Арктика».

Черевко Александр Иванович окончил завод-вуз Ленинградского кораблестроительного института в 1971 г. Докторскую диссертацию защитил в 2006 г. Профессор кафедры «Судовая электроэнергетика и автоматика» Института судостроения и морской арктической техники (Севмашвуз) — филиала САФУ, г. Северодвинск.

The Mathematical Model of a Self-Excited Inverter Constructed on the Basis of a Transformer with Rotating Magnetic Field

KUZ'MIN Il'ya Yu. (Joint-Stick Company «Northern Production Assosiation «Arktika», Severodvinsk, Arkhangelsk region, Russia) — Engineer-designer

CHEREVKO Aleksander I. (Branch of Northern (Arctic) Federal University, Severodvinsk, Russia) — Professor, Dr. Sci. (Eng.)

Ways for solving the widely known electromagnetic compatibility problem, an issue that is especially important for self-contained electric power systems, are suggested. The use of a new class of semiconductor converters made on the basis of a transformer with rotating magnetic field (RMFT) is one of such ways, which in the authors' opinion is the most promising one. The article describes the mathematical model of a self-excited inverter (SEI) with an RMFT developed in the MATLAB Simulink software environment, which operates, as part of an electrical system, on resistive, resistive-inductive load, and also on a squirrel-cage

induction motor. The designations of the model's main components are explained. The equations laid in the basis of the RMFT (the device serving as the SEI power core) mathematical model are presented. The phase voltage waveforms and their spectra for the 12 kVA SEI operating on different loads of commensurable capacity are shown. The apparent, active and reactive power values, and the output voltage harmonic distortion factor are calculated for each case. The advantages of the proposed model of an SEI with RMFT are pointed out, and the assumptions adopted in its development are substantiated.

Key words: *three-phase self-excited inverter, transformer with rotating magnetic field, mathematical modeling, electric power quality, mutual inductance, differential equation, Kirchoff's second law*

REFERENCES

1. **Dmitriyev B.F., Ryaben'kii V.M., Cherevko A.I., Muzyka M.M.** *Sudovye poluprovodnikovye preobrazovateli, 2-ye izd.* (Power semiconductor converters, 2d edit). Arkhangel'sk, North (Arctic) Federal University, 2015, 556 p.
2. **Anisimov Ya.F., Vasil'yev Ye.P.** *Elektromagnitnaya sovместimost' poluprovodnikovyykh preobrazovatelei i sudovykh elektroustanovok* (Electromagnetic Compatibility of Semiconductor Converters and Ship Electrical Installations). Leningrad, Sudostroeniye, 1990.
3. **RozaNov Yu.K., Ryabchitskiy M.V., Kvasnyuk A.A.** *Silovaya elektronika* (Power Electronics). Moscow, Publ. House of Moscow Power Engineering Institute, 2007, 632 p.
4. **Yatsenko A.S.** *Izv. vuzov. Energetika – in Russ. (News of Institutions of higher learning. Power Engineering)*, 1985, No. 9, pp. 22–27.
5. **Ivanov V.A., Ivanova N.A., Shukalov V.F.** *Mnogofaznye vypryamiteli na baze transformatorov s vrashchayushchimsya magnitnym polem. Elektromashinnye elementy* (Multiphase Rectifiers on the Basis of Transformers with Rotating Magnetic Field. Electrical machine-based automatic control devices): Scientific Proceedings. Leningrad Electrotechnical Institute, 1980, 128 p.
6. **A.s. 524234 (SSSR).** *Sticheskiy reguliruyemyi transformator s vrashchayushchimsya magnitnym polem* (USSR Inventor's Certificate: A Static Controlled Transformer with Rotating Magnetic Field)/V.F. Shukalov, N.A. Ivanova. Bulletin of inventions, 1976, No. 29.
7. **Vorshevskiy A.A., Gal'perin V.Ye.** *Elektromagnitnaya sovместimost' sudovykh tekhnicheskikh sredstv* (Electromagnetic Compatibility of Ship Equipment Items). St. Petersburg State Sea Technical University, 2006, 317 p.
8. **Zinov'yev G.S.** *Elektrotekhnika – in Russ. (Electrical Engineering)*, 2000, No. 11, pp. 12–16.
9. **GOST 2.103-2013** (Supersedes GOST 2.103-68). *Edinaya sistema konstruktorskoi dokumentatsii* (Unified System of Design Documentation (USDD)). Moscow, Standartinform, 2015.
10. **German-Galkin S.G.** *Komp'yuternoye modelirovaniye poluprovodnikovyykh sistem* (Computer Modeling of Semiconductor Systems). MatLab 6.0. St. Petersburg, Korona print, 2001, 320 p.
11. **Chernykh I.V.** *SIMULINK: sreda sozdaniya inzhenernykh prilozhenii* (SIMULINK: An Environment for Developing Engineering Applications)/Edit. by V.G. Potemkin. Moscow, Dialog-MIFI, 2003, 496 p.
12. **Ketkov Yu.L., Ketkov A.Yu., Shul'ts M.M.** *MATLAB 6.x.: programmirovaniye chislennykh metodov* (Programming numerical methods). St. Petersburg, BKHV-Petersburg, 2004, 672 p.
13. **Cherevko A.I., Kuz'min I.Yu., Muzyka M.M., Platonenkov S.V., Sakovich I.A.** *Izv. vuzov. Elektromekhanika – in Russ. (News of higher educational institutions. Electromechanics)*, 2012, No. 3, pp. 13–18.
14. **Kuz'min I.Yu., Cherevko A.I., Limonnikova Ye.V.** *Elektrotekhnika – in Russ. (Electrical Engineering)*, 2015, No. 8, pp. 11–16..
15. **Kuz'min I.Yu., Cherevko A.I., Limonnikova Ye.V.** *Elektrichestvo – in Russ. (Electricity)*, 2016, No. 2, pp. 39–44.
16. **Kalantarov P.L., Tseitlin L.A.** *Raschet induktivnostei, 2-ye izd.* (Calculation of inductances, 2-d edit.). Leningrad, Energiya, 1970, 415 p.
17. **Vol'dek A.I., Popov V.V.** *Elektricheskiye mashiny. Mashiny peremennogo toka* (Electrical machines. AC machines). St. Petersburg, 2008, 350 p.
18. **Bertinov A.I., But D.A., Mizyurin S.R., Aliyevskiy B.L.** *Spetsial'nye elektricheskiye mashiny. Istochnik i preobrazovateli energii* (Special-Purpose Electrical Machines. Power Sources and Converters): Train aid for institutions of higher learning/Edit. by A.I. Bertinov. Moscow, Energiya, 1982, 552 p.
19. **Rossiiskii morskoi registr sudokhodstva.** *Pravila klassifikatsii i postroiki morskikh sudov, t. 2* (Russian Maritime Registry of Shipping. Sea Vessels Classification and Design Regulations). St. Petersburg, 2014.
20. **GOST 32144-2013** (Supersedes GOST R 54149-2010). *Elektricheskaya energiya. Sovместimost' tekhnicheskikh sredstv elektromagnitnaya. Normy kachestva elektricheskoi energii v sistemakh elektronsnabzheniya obshchego naznacheniya* (Electric Energy. Electromagnetic Compatibility of Technical Equipment. Power Quality Limits in the Public Power Supply Systems).

[21.05.2018]