

УДК 621.313.392

В.Ю. Смачный¹, А.В. Шевкунова¹, С.В. Шутемов²¹Ростовский государственный университет путей сообщения,
Ростов-на-Дону, Россия²Пермский национальный исследовательский политехнический университет,
Пермь, Россия

СХЕМА ПИТАНИЯ ФАЗЫ ВЕНТИЛЬНО-ИНДУКТОРНОГО ДВИГАТЕЛЯ С ОДНИМ СИЛОВЫМ КЛЮЧОМ

Приведены основные требования, предъявляемые к преобразователям вентильно-индукторных двигателей (ВИД): возможность реализации положительного, отрицательного и нулевого контуров, сохранение энергии накопленной в обмотке фазы вентильно-индукторного привода (ВИП) для дальнейшего использования, обеспечение работы фаз с перекрытием, а также отказоустойчивость. Представлены режимы работы и преимущества классической асимметричной полумостовой схемы преобразователя ВИД, содержащей источник, два транзисторных ключа, два обратных диода и конденсатор.

Предложено новое схемотехническое решение для преобразователя. Рассмотрена одноключевая схема, которая содержит два независимых гальванически развязанных источника постоянного напряжения, два конденсатора, диод, полупроводниковый ключ и статорную обмотку фазы ВИД, разделенную на две полуобмотки. Представлена математическая модель и проведено моделирование в среде MatLab/Simulink классической и одноключевой схемы питания фазы вентильно-индукторной машины (ВИМ). Получены для двух схем сравнительные графики мгновенных значений токов в обмотке и электромагнитного момента, отличающиеся по амплитуде в два раза значения токов и напряжений на полупроводниковом ключе и диоде. Новая схема, сохранив достоинства классической схемы, позволяет уменьшить количество силовых полупроводниковых элементов и, следовательно, стоимость преобразователя, а также позволяет реализовать раздельное питание катушек ВИД.

Предлагается силовая схема питания ВИП с одним силовым ключевым элементом (транзистором) для коммутации каждой из фаз, в то время как наиболее употребительной в настоящее время является полумостовая силовая схема питания ВИМ, имеющая два ключевых элемента. Сокращение количества относительно дорогих силовых элементов позволит снизить стоимость преобразователя и упростить его силовую часть.

Определена основная область применения нового схемотехнического решения. Поскольку одноключевая схема требует два источника, она наиболее удобна для электроприводов, питаемых от автономных источников электроэнергии, например, электромобилей, роботов, летательных и подводных аппаратов приводных механизмов, а также электроприводов, работающих в местах, отдаленных от централизованного электроснабжения.

Ключевые слова: вентильно-индукторный привод, асимметричный полумостовой преобразователь, одноключевой преобразователь, полупроводниковый ключ, обмотка фазы, ротор, обратный диод, источник напряжения, контур, индуктивность обмотки, потокосцепление, угол поворота ротора, ток фазы, электромагнитный момент, математическая модель, MatLab/Simulink.

V.Yu. Smachney¹, A.V. Shevkunova¹, S.V. Shutemov²

¹Rostov State Transport University, Rostov-on-Don, Russian Federation

²Perm National Research Polytechnic University, Perm, Russian Federation

THE POWER SUPPLY CIRCUIT PHASE SWITCHED-RELUCTANCE MOTOR WITH ONE POWER SWITCH

The article presents the basic requirements for the converters of the switched-reluctance motors (SRM): the possibility of implementing positive, negative and zero circuits, saving energy accumulated in the winding phase of the switched-reluctance drive (SRD) for further use, ensuring the operation of the phases with overlap, fault tolerance. The modes of operation and advantages of the classical asymmetric half-bridge converter circuit SRM containing a source, two transistor switches, two reverse diodes and a capacitor are presented.

A new circuit solution for the converter is proposed. A single-key circuit is considered, which contains two independent galvanically isolated DC voltage sources, two capacitors, a diode, a semiconductor key and a phase stator winding of a SRM divided into two half-windings. The mathematical model is presented and simulation in the environment of MatLab/Simulink, classical and single-key power supply circuit of the switched-reluctance machine (SRM) phase is carried out. Comparative graphs of instantaneous values of currents in the winding and electromagnetic moment, which differ in amplitude by two times the values of currents and voltages on a semiconductor key and diode, are obtained for two circuits. The new scheme, while maintaining the advantages of the classical scheme, allows to reduce the number of power semiconductor elements and, consequently, the cost of the converter, and also allows you to implement a separate power supply of coils SRM.

Power supply scheme of SRD with one power key element (transistor) is proposed for switching each phase. While the most commonly used at present is the half-bridge power circuit SRM, which has two key elements. Reducing the number of relatively expensive power elements will reduce the cost of the converter and simplify its power part.

The main application area of the new circuit solution is determined. Since the single-key circuit requires two sources, it is most convenient for electric drives powered from autonomous electric power sources, for example, electric vehicles, robots, aircraft and underwater vehicles of drive mechanisms, as well as electric drives operating in places remote from the centralized power supply.

Keywords: switched-reluctance drive, asymmetrical half bridge converter, single-ended transducer, semiconductor wrench, phase winding, rotor, reverse diode, voltage source, circuit, winding inductance, flux linkage, rotor rotation angle, phase current, electromagnetic moment, mathematical model, MatLab / Simulink.

Вентильно-индукторный привод (ВИП) является перспективным электромеханическим преобразователем энергии. Он имеет простую конструкцию активной части, надежен в работе, технологичен в изготовлении, обладает высокими энергетическими показателями.

ВИП изготавливается широким мощностным рядом от нескольких ватт до сотен киловатт и используется в различных отраслях промышленности и транспорта [1–6]. В настоящее время производство и выпуск этих машин освоили многие ведущие компании, такие как: «General Electric», «Siemens», «Bosch Rexroth», «Land Rover» и т.д. Благодаря своим преимуществам ВИП имеют перспективу применения

в технических устройствах, питаемых от автономных источников электроэнергии, например, электромобилях, роботах, летательных и подводных аппаратах, приводных механизмах, работающих в местах, отдаленных от централизованного электроснабжения.

Вентильно-индукторный привод содержит вентильно-индукторный двигатель, преобразователь частоты и датчик положения ротора (ДПР). Преобразователь частоты состоит из выпрямителя с фильтром (при питании привода от звена переменного тока) и инвертора. Сдерживающим фактором практического применения ВИП была необходимость принятия ряда мер по снижению шума и вибраций, снижению пульсаций электромагнитного момента и улучшению ряда других характеристик, в том числе повышению надежности силового преобразователя и снижению его стоимости.

Совершенствование силовой полупроводниковой техники и схемотехнических решений открывает для этого определенные возможности. Обычно к преобразователям ВИП предъявляют следующие требования [7, 8]:

- каждая фаза ВИД должна иметь, по крайней мере, один полупроводниковый ключ, чтобы иметь возможность самостоятельно проводить коммутацию. Ток должен подаваться в обмотку в течение заданного интервала проводимости, точно согласованного с положением ротора, чтобы обеспечить заданный режим работы;

- преобразователь должен иметь возможность контролировать и регулировать фазный ток. Это особенно важно при работе с низкой частотой вращения, где фазный ток должен удерживаться на требуемом уровне на протяжении интервала проводимости;

- схема должна обеспечивать возможность в двигательном режиме быстро подключить полное напряжение источника к обмотке фазы (положительный контур);

- преобразователь должен иметь возможность после отключения фазы не прикладывать напряжение к фазе для постепенного спада тока (нулевой контур);

- после отключения фазы преобразователь должен иметь возможность принудительно довести фазовый ток до нуля или близко к этому значению, прежде чем начнется генераторный режим работы, чтобы как можно быстро снизить ток даже на высоких скоростях. Это достигается путем приложения фазного напряжения с отрицательной полярностью к обмотке двигателя (отрицательный контур);

- одним из главных преимуществ ВИД является отказоустойчивость, поскольку каждая фаза является электрически независимой, что позволяет продолжать работу, если одна или несколько фаз неисправны. Преобразователь должен быть аналогичным образом структурирован, чтобы обеспечить независимую работу фаз и отказоустойчивость;
- преобразователь должен иметь возможность одновременно питать несколько фаз, обеспечивая работу фаз с перекрытием;
- желательно применять наиболее простую топологию преобразователя с минимальным количеством полупроводниковых ключей.

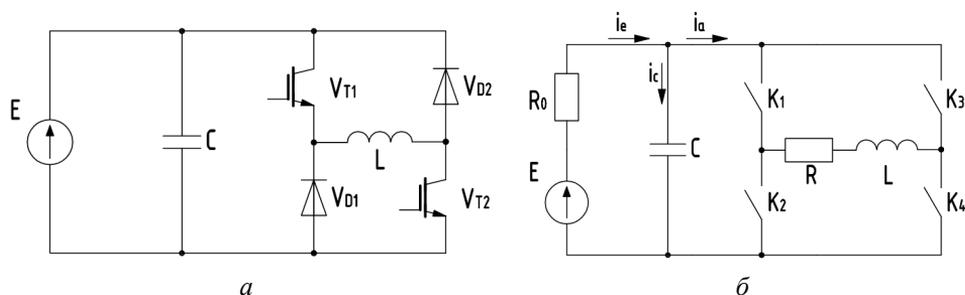


Рис. 1. Схема питания и замещения фазы ВИМ: *а* – классическая схема питания фазы ВИМ; *б* – схема замещения ВИМ

На рис. 1, *а* представлена наиболее распространенная схема питания фазы обмотки ВИД, содержащая источник, два транзисторных ключа $VT1$, $VT2$ и два обратных диода $VD1$, $VD2$, а также конденсатор C . Ключ $VT1$ нужен для регулирования тока, ключ $VT2$ определяет, активна ли данная фаза, конденсатор выполняет функцию фильтра и накопителя энергии для обмена ею с обмоткой W . На рис. 1, *б* изображена соответствующая расчетная схема замещения фазы обмотки ВИД, где R_0 – внутреннее сопротивление источника питания; R и L – сосредоточенные параметры фазы обмотки ВИМ (активное сопротивление и индуктивность); $K1...K4$ – идеальные ключи, коммутирующие обмотку с источником питания по сигналу датчика положения ротора ВИП. Данная схема называется «асимметричный полумостовой преобразователь».

Особенностью работы такой схемы является то, что между управляемыми ключами всегда включена индуктивность (фазная обмотка), ограничивающая скорость нарастания тока. Это практически исключает сквозные короткие замыкания в инверторе, которые свойственны классическим схемам инверторов для питания асинхронных двигателей с частотным управлением и для вентильных двигателей синхронного типа.

Предлагается силовая схема питания ВИП с одним силовым ключевым элементом (транзистором) для коммутации каждой из фаз [9], в то время как наиболее употребительной в настоящее время является полумостовая силовая схема питания ВИМ, имеющая два ключевых элемента. Сокращение количества относительно дорогих силовых элементов позволит снизить стоимость преобразователя и упростить его силовую часть.

Одноключевая схема (рис. 2, а) содержит два независимых гальванически развязанных источника постоянного напряжения, два конденсатора, диод, полупроводниковый ключ и статорную обмотку фазы ВИД, разделенную на две полуобмотки.

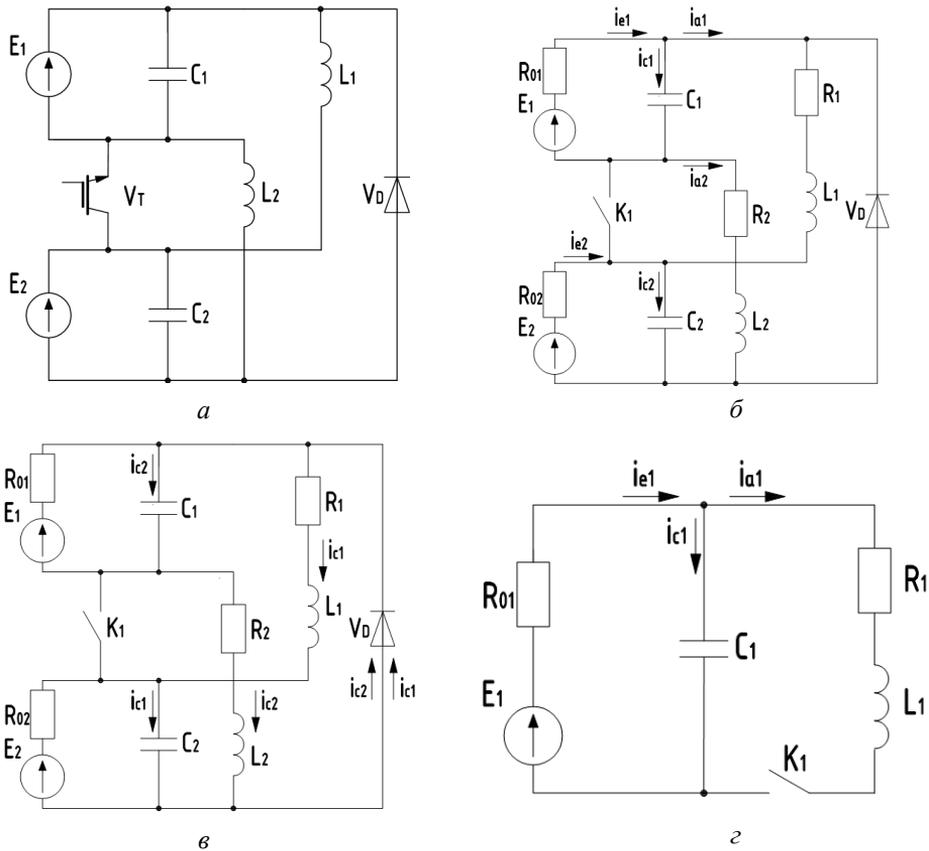


Рис. 2. Силовая схема питания фазы ВИМ и токи в схеме замещения: а – силовая схема питания фазы ВИМ с меньшим количеством силовых полупроводниковых элементов; б – токи в схеме замещения при замыкании ключа; в – токи в схеме замещения при размыкании ключа; г – токи в схеме замещения при замыкании ключа для одного контура

Плюс первого источника E_1 соединен с плюсом первого конденсатора C_1 , началом первой полуобмотки L_1 и катодом диода VD ; минус источника E_1 соединен с первым выводом ключа VT , с минусом первого конденсатора C_1 и с началом второй полуобмотки L_2 ; плюс второго источника E_2 соединен со вторым выводом ключа VT , с плюсом второго конденсатора C_2 и концом первой полуобмотки L_1 ; минус второго источника E_2 соединен с минусом второго конденсатора C_2 , концом второй полуобмотки L_2 и с анодом диода VD , причем параметры первого и второго источников удовлетворяют следующему условию:

$$U_1 = U_2, \quad (1)$$

где U_1 и U_2 – напряжение первого и второго источника соответственно.

Электропривод одноключевой работает следующим образом. В исходном состоянии (рис. 2, б), когда VT разомкнут и выполняется условие равенства напряжений U_1 и U_2 , ток в полуобмотках L_1 и L_2 ВИД отсутствует, конденсаторы C_1 и C_2 заряжены. При замыкании VT через полуобмотки L_1 и L_2 протекает ток по следующим цепям: источник E_1 – полуобмотка L_1 – VT – источник E_1 ; конденсатор C_1 – VT – полуобмотка L_1 – конденсатор C_1 , источник E_2 – полуобмотка L_2 – VT – источник E_2 ; конденсатор C_2 – VT – полуобмотка L_2 – конденсатор C_2 . При этом в ВИД происходит преобразование электромагнитной энергии в механическую (положительные контуры напряжения). При размыкании VT энергия (рис. 2, в), накопленная в индуктивных полуобмотках L_1 и L_2 , заряжает конденсаторы C_1 и C_2 по следующим цепям: полуобмотка L_1 – конденсатор C_2 – VD – полуобмотка L_1 ; полуобмотка L_2 – VD – конденсатор C_1 – полуобмотка L_2 (контуры зарядки). Далее цикл повторяется. При разомкнутом ключе VT и переключении полярности источников отрицательное напряжение подается на фазу через диод VD (отрицательные контуры напряжения).

Рассмотрим работу одноключевой схемы. Для этого используем метод наложения и разобьем схему на два одинаковых контура (рис. 2, з). Запишем уравнения для электрических цепей силовой схемы питания ВИП [10–12]:

$$u_1 = i_{a1} R_1 + \frac{\partial \psi_1(i_{a1}, \theta)}{\partial t}, \quad (2)$$

$$\frac{d\psi_1(i_{a1}, \theta)}{dt} = \frac{\partial \psi_1}{\partial i} \frac{di_{a1}}{dt} + \frac{\partial \psi_1}{\partial \theta} \frac{d\theta}{dt}; \quad \overline{\omega} = \frac{d\theta}{dt}; \quad L_{\pi 1} \frac{\partial \psi_1}{\partial i}; \quad \frac{d\psi_1(i_{a1}, \theta)}{dt} = L_{\pi 1} \frac{di_{a1}}{dt} + \overline{\omega} \frac{\partial \psi_1}{\partial \theta}, \quad (3)$$

$$u_1 = i_{a1}R_1 + L_{Д1} \frac{di_{a1}}{dt} + \varpi \frac{\partial \psi_1}{\partial t}; i_{c1} = C_1 \frac{du_1}{dt}; u_1 = E_1 - i_{e1}R_{01}, \quad (4)$$

$$\left\{ \begin{array}{l} \frac{di_{a1}}{dt} = \frac{1}{L_{Д1}} \left(u_1 - i_{a1}R_1 - \varpi \frac{\partial \psi_1}{\partial \theta} \right), \\ \frac{du_1}{dt} = \frac{1}{C_1} \left(\frac{u_1 - E_1}{R_{01}} - i_{a1} \right), \\ \frac{d\theta}{dt} = \varpi, \\ \frac{\partial \psi_1}{\partial i} = L_{Д1}. \end{array} \right. \quad (5)$$

Сведем полученные уравнения в систему (5) и приведем ее к форме Коши, удобной для использования стандартных пакетов прикладных программ при решении систем дифференциальных уравнений. Получаем систему уравнений, идентичную классической полумостовой схеме. Система уравнений для второго контура аналогична. С целью расчета переходных электромагнитных и электромеханических процессов ВИП дополним систему уравнений выражением для электромагнитного момента (6):

$$M_1 = \left. \frac{\partial W_{К1}(i_{a1}, \theta)}{\partial \theta} \right]_{i=\text{const}}, \quad (6)$$

где $W_{К1}$ – коэнергия первой полуобмотки фазы,

$$W_{К1} = \int_0^{i_{a1}} \psi_1(i_{a1}, \theta) di. \quad (7)$$

Электромагнитный момент, развиваемый первой полуобмоткой фазы, находим по формуле:

$$M_1(i_{a1}, \theta) = T_L + B\varpi + J \frac{d\varpi}{dt}, \quad (8)$$

где J – момент инерции вращающихся частей ВИД; T_L – момент сопротивления; B – коэффициент трения.

Таким образом, поскольку обмотка фазы разделена на две равные полуобмотки, то система уравнений для фазы имеет следующий вид:

$$\left\{ \begin{array}{l} \frac{di_{a1}}{dt} = \frac{1}{L_{\text{Д1}}} \left(u_1 - i_{a1} R_1 - \varpi \frac{\partial \psi_1}{\partial \theta} \right); \frac{di_{a2}}{dt} = \frac{1}{L_{\text{Д2}}} \left(u_2 - i_{a2} R_2 - \varpi \frac{\partial \psi_2}{\partial \theta} \right), \\ \frac{du_1}{dt} = \frac{1}{C_1} \left(\frac{u_1 - E_1}{R_{01}} - i_{a1} \right); \frac{du_2}{dt} = \frac{1}{C_2} \left(\frac{u_2 - E_2}{R_{02}} - i_{a2} \right), \\ \frac{d\theta}{dt} = \varpi, \\ \frac{\partial \psi_1}{\partial i} = L_{\text{Д1}}; \frac{\partial \psi_2}{\partial i} = L_{\text{Д2}}, \\ \frac{d\varpi}{dt} = \frac{1}{J} (M_1(i_{a1}, \theta) - T_L - B\varpi); \frac{d\varpi}{dt} = \frac{1}{J} (M_2(i_{a2}, \theta) - T_L - B\varpi). \end{array} \right. \quad (9)$$

Анализируя полученную систему уравнений, делаем следующие выводы:

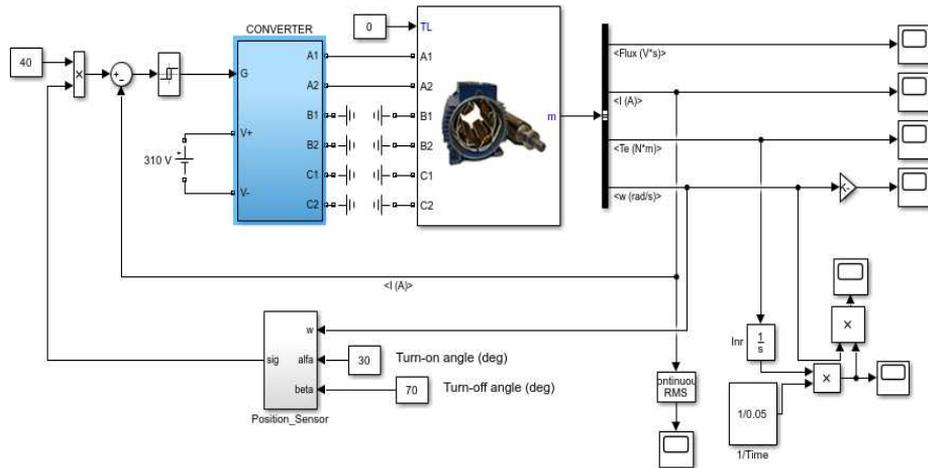
– поскольку обмотка фазы разделена на две равные полуобмотки, следовательно, для сопоставления классической и перспективной схем примем следующие параметры: $L_1 = L_2 = L/2$, $R_1 = R_2 = R/2$, $E_1 = E_2 = E/2$, тогда мы получим одинаковые для схем токи и соответственно моменты;

– через полупроводниковый ключ течет полный ток $i_{\kappa} = i_{a1} + i_{a2}$;

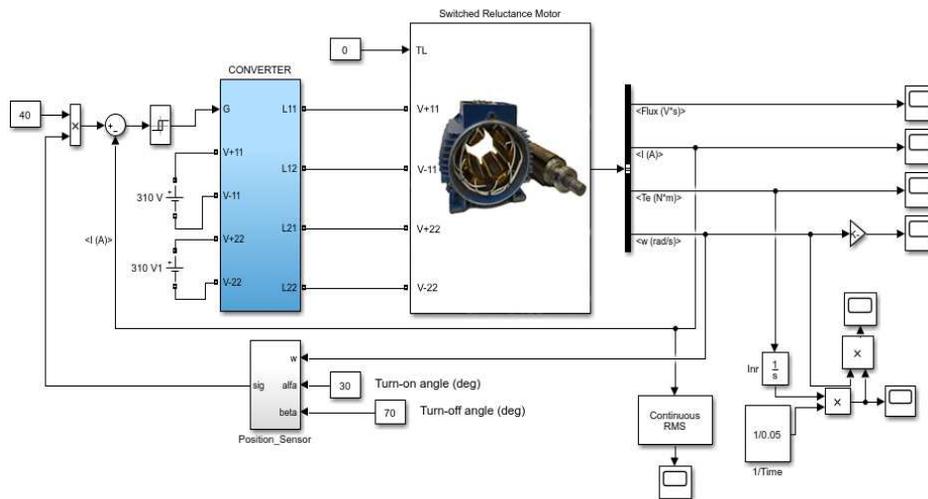
– одноключевая схема позволяет реализовать раздельное питание катушек ВИД;

– одноключевая схема удобна для эксплуатации на устройствах, питаемых от автономных источников электроэнергии (аккумуляторов, накопителей энергии), так как возможно реализовать два независимых гальванически развязанных, равных источника постоянного напряжения.

Для проверки расчетов рассмотрим режим работы ВИД с использованием одной фазы машины. Так же используем параллельное соединение катушек обмотки и в классической схеме, и в одноключевой схеме, что позволит получить эквивалентные по активному и реактивному сопротивлению обмотки [13–17]. Методом конечных элементов в ходе решения полевой задачи определяем зависимость потокосцепления фазы ВИД от тока и угла поворота ротора с помощью программного обеспечения FEMM, предварительно задав свойства материалов и обмоточные данные электрической машины. В системе MatLab/Simulink получаем основные характеристики ВИД (рис. 3, 4). Для питания ВИД были выбраны одинаковые источники (310 В) [18–20].



a



б

Рис. 3. Компьютерные модели ВИД в программном комплексе MatLab/Simulink: *a* – классическая расчетная схема ВИД; *б* – одноключевая расчетная схема ВИД

По результатам имитационного моделирования классической и одноключевой схемы питания фазы ВИМ в программном комплексе MatLab/Simulink получены идентичные графики токов в обмотке и моментов (рис. 5, *a* и *б*), идентичные по форме и отличающиеся в два раза по амплитуде значения токов и напряжений на ключе (для классической схемы – 27,7 А и 310,8 В, для одноключевой схемы – 55,5 А и 620,8 В) (рис. 5, *в* и *г*) и диоде (для классической схемы – 19,5 А и 309 В, для одноключевой схемы – 39,3 А и 619 В) (рис. 5, *д* и *е*).

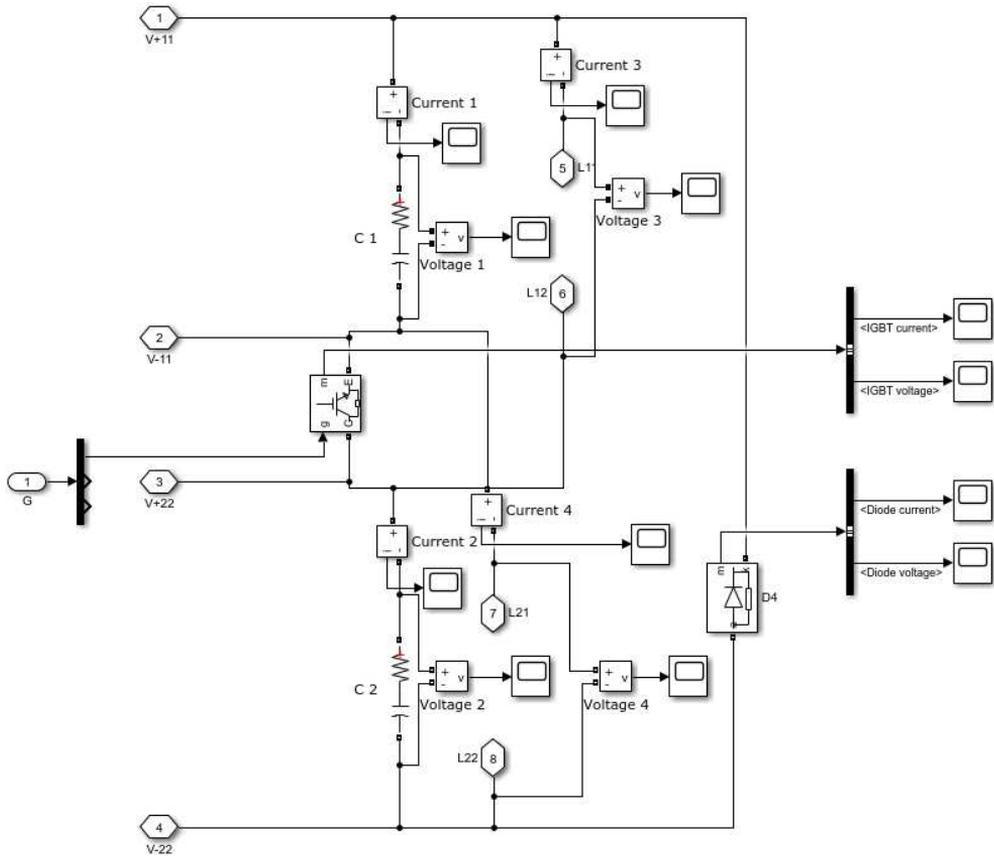
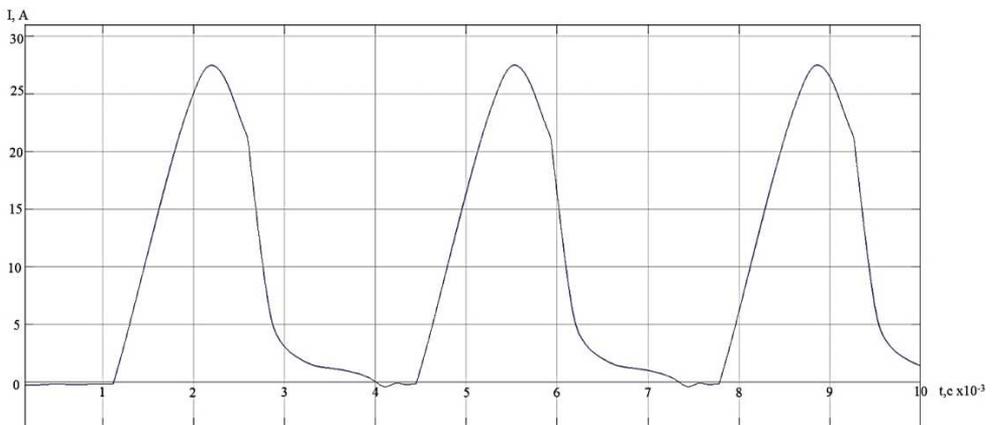
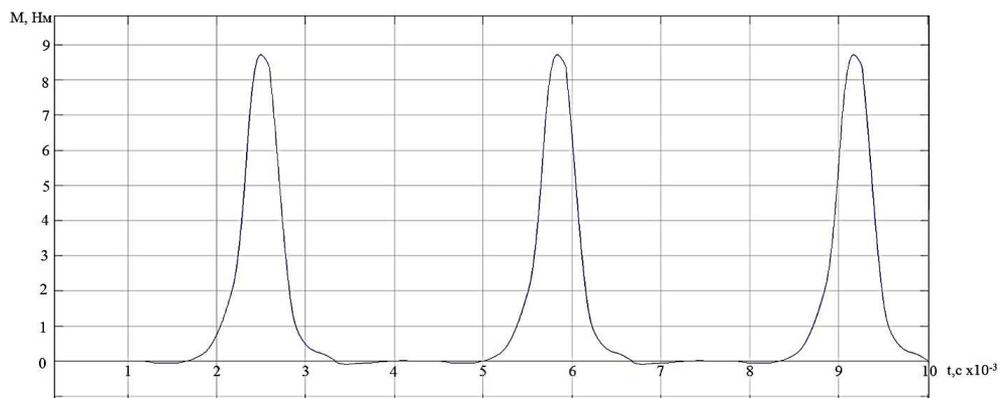


Рис. 4. Блок Converter одноключевой схема ВИД в программном комплексе MatLab/Simulink

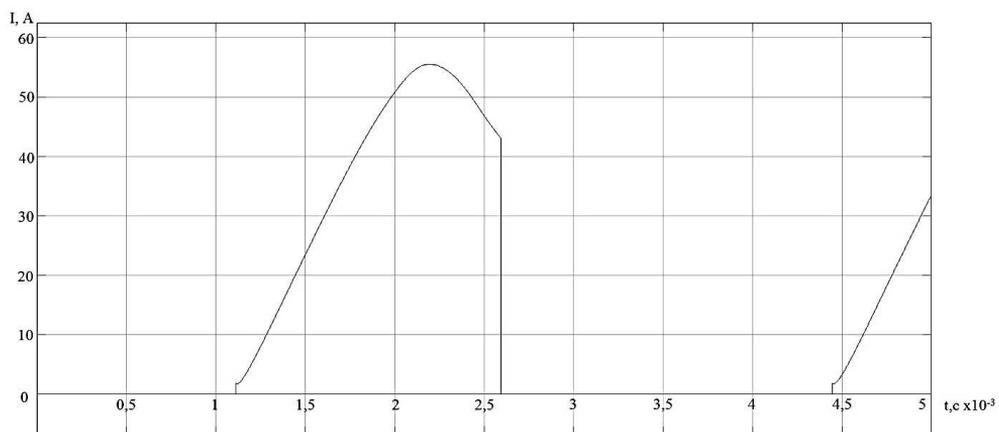


a

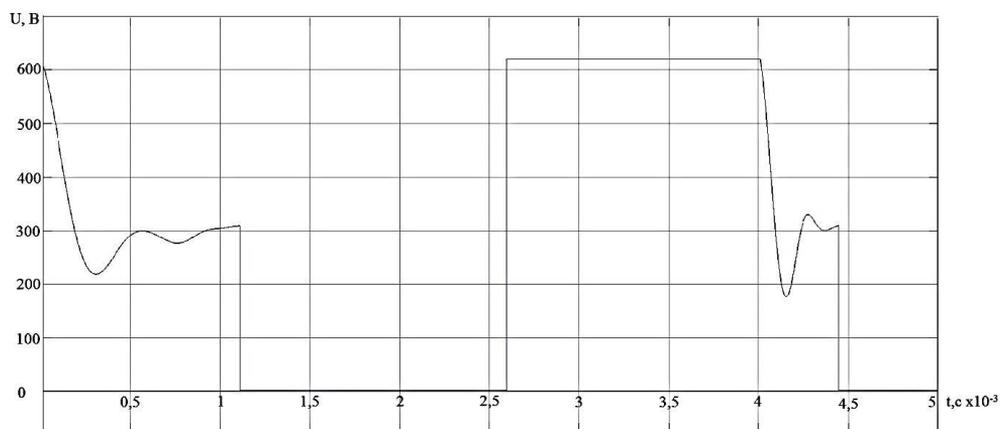
Рис. 5. Графики расчетов: *a* – токи в обмотке; *б* – моменты; *в* – токи в ключе; *г* – напряжения в ключе; *д* – токи на диоде; *е* – напряжения на диоде



б

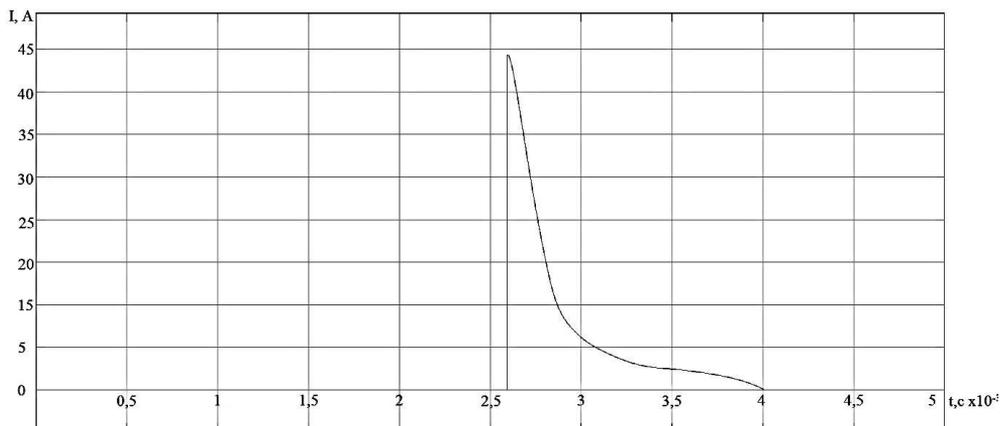


в

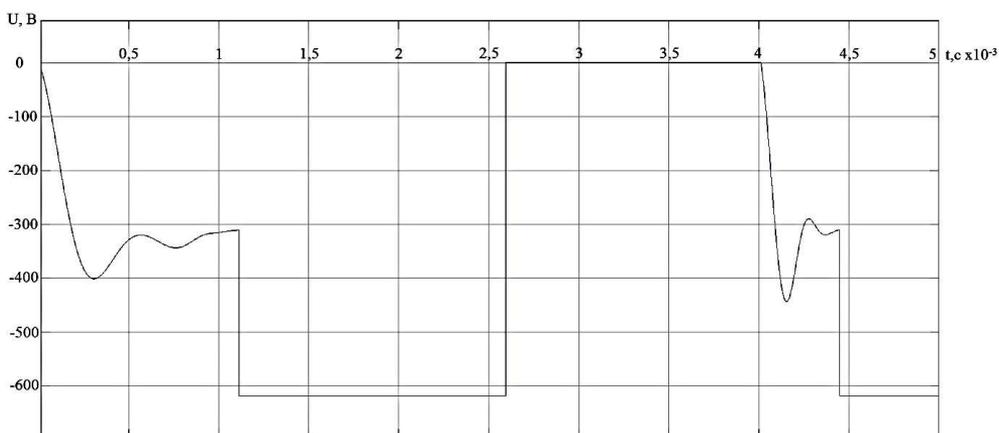


г

Рис. 5. Продолжение



d



e

Рис. 5. Окончание

Анализ рынка полупроводников техники показывает, что цены на диоды с прямым током 19,5 А, обратным напряжением 309 В и 39,3 А, 619 В соответственно отличаются не существенно, так же как и цены на IGBT-транзисторы с максимальным током 27,7 А, напряжением катод-электрод 310,8 В от цен на транзисторы с током 55,5 А и напряжением 620,8 В.

Выводы:

1. Предлагаемая схема питания фазы ВИМ с одним ключевым элементом на одну фазу позволяет уменьшить количество силовых полупроводников и снизить стоимость преобразователя.

2. Одноключевая схема требует два независимых гальванически развязанных источника и наиболее удобна для питаемых от автономных источников электроэнергии электроприводов, например, на электромобилях, роботах, летательных и подводных аппаратах.

Библиографический список

1. Птах Г.К. Вентильно-индукторный реактивный электропривод средней и большой мощности: зарубежный и отечественный опыт // Электротехника: сетевой электронный научный журнал. – 2015. – Т. 2. – № 3. – С. 23–33.

2. Панкратов В.В. Вентильный электропривод: от стиральной машины до металлорежущего станка и электровоза [Электронный ресурс] // Электронные компоненты. – 2007. – № 2. – URL: http://www.erasib.ru/user_images/File/papers/vent.pdf (дата обращения: 05.03.2018).

3. Налбатов И.И., Набалтова Е.И. Современное состояние машиностроительного комплекса России и уровень конкурентоспособности машиностроительных предприятий // Научный альманах. – 2015. – № 7(9). – С. 147–156.

4. Официальный сайт Новочеркасского электровозостроительного завода [Электронный ресурс]. – URL: <http://www.nevz.com> (дата обращения: 16.02.2018).

5. Электродвигатели: какие они бывают [Электронный ресурс]. – URL: https://geektimes.ru/company/npf_vektor/blog/270666 (дата обращения: 16.02.2018).

6. Рисованый С.В., Финкельштейн В.Б. Проектирование вентильных реактивных двигателей: монография. – Харьков: Изд-во Харьк. нац. ун-т гор. хоз-ва им. А.Н. Бекетова, 2014. – 245 с.

7. Samia M. Mahmoud, Mohsen Z. El-Sherif, Emad S. Abdel-Aliem. Studying different types of power converters fed switched reluctance motor // International Journal of Electronics and Electrical Engineering. – 2013. – Vol. 1. – № 4.

8. Cunningham J.D. Switched reluctance motor drive circuit evaluation criteria for vehicle efficiency and responsiveness: Ph.D. Thesis. – The University of Texas at Austin, 2011. – 234 p.

9. Электропривод одноключевой: пат. 2459341 Рос. Федерация, МПК H02K 29/00 (2006.01), H02P 6/00 (2006.01), H02P 25/08 (2006.01),

Н02К 19/06 (2006.01) / А.Д. Петрушин, Р.М. Девликамов, В.Ю. Смачный. – № 2011119730/07; заявл. 16.05.2011; опубл. 20.08.2012. Бюл. № 23.

10. Кузнецов В.А., Кузмичев В.А. Вентильно-индукторные двигатели. – М.: Изд-во МЭИ, 2003. – 70 с.

11. Miller T.J.E. Switched Reluctance motor and their Control. – Magna Physics Publishing and Clarendon Oxford Press, 1993. – 203 p.

12. Тяговые электрические машины подвижного состава: учеб. пособие в 3 ч. Ч. III / А.Д. Петрушин, С.А. Пахомин, В.И. Седов [и др.]; ред.: А.Д. Петрушин, В.Г. Щербаков; РГУПС. – Ростов- н/Д, 2013. – 179 с.

13. Овчинников И.Е., Адволоткин Н.П. Закономерности проектирования вентильных двигателей с постоянными магнитами для станков с ЧПУ и других механизмов // Электротехника. – 1988. – № 7. – С. 59–65.

14. Шимчак И.В. Инновационные конструкции магнитных систем синхронных машин с постоянными магнитами // Электричество. – 2009. – № 9. – С. 37–44.

15. Соколовский Г.Г. Электроприводы переменного тока с частотным управлением. – М.: Академия. – 2006. – 272 с.

16. Ганджа С.А., Мартьянов А.С. Методика инженерного расчета вентильных машин с аксиальным потоком // Вестник Южно-Урал. гос. ун-та. Сер. Энергетика. – Челябинск: Изд. центр ЮУрГУ, 2013. – Т. 13. – № 2. – С. 85–87.

17. Зечихин Б.С., Журавлев С.В., Ситин Д.А. Расчетные коэффициенты синхронных машин с редкоземельными магнитами // Электричество. – 2009. – № 3. – С. 35–40.

18. Официальный сайт Mathworks [Электронный ресурс]. – URL: www.mathworks.com (дата обращения: 10.03.2018).

19. Черных И.В. Моделирование электротехнических устройств в MatLab. SimPowerSystems и Simulink. – М.: ДМК-Пресс, 2007. – 288 с.

20. Le-Huy H., Brunelle P. Design and Implementation of a Switched Reluctance Motor Generic Model for Simulink SimPowerSystems // Conference: Industrial Electronics, 2005.

References

1. Ptakh G.K. Ventil'no-induktorniye reaktivnyiye elektroprivod srednei i bol'shoi moshchnosti: zarubezhnyiye i otechestvennyiye opyt [Medium and high power switched reluctance motor jet electric drive: foreign and domestic

experience]. *Elektrotehnika: setevoi elektronnyi nauchnyi zhurnal*, 2015, vol. 2, no. 3, pp. 23-33.

2. Pankratov V.V. Ventil'nyi elektroprivod: ot stiral'noi mashiny do metallozhushchego stanka i elektrovoza [Valve electric drive: from the washing machine to the metal-cutting machine and an electric locomotive]. *Elektronnye komponenty*, 2007, no. 2, available at: http://www.erasib.ru/user_images/File/papers/vent.pdf (accessed 05 March 2018).

3. Nalbatov I.I., Nabal'tova E.I. Sovremennoe sostoianie mashinostroitel'nogo kompleksa Rossii i uroven' konkurentosposobnosti mashinostroitel'nykh predpriatii [The current state of the Russian machine-building complex and the level of competitiveness of machine-building enterprises]. *Nauchnyi al'manakh*, 2015, no. 7(9), pp. 147-156.

4. Ofitsial'nyi sait Novochoerkasskogo elektrovozostroitel'nogo zavoda [Official site of Novochoerkassk Electric Locomotive Plant], available at: <http://www.nevz.com> (accessed 16 February 2018).

5. Elektrodvigateli: kakie oni byvaiut [Electric motors: what they are], available at: https://geektimes.ru/company/npf_vektor/blog/270666 (accessed 16 February 2018).

6. Risovanyi S.V., Finkel'shtein V.B. Proektirovanie ventil'nykh reaktivnykh dvigatelei [Design of switched jet engines]. Kharkov: Khar'kovskii natsional'nyi universitet gorodskogo khoziaistva imeni A.N. Beketova, 2014. 245 p.

7. Samia M. Mahmoud, Mohsen Z. El-Sherif, Emad S. Abdel-Aliem. Studying different types of power converters fed switched reluctance motor. *International Journal of Electronics and Electrical Engineering*, 2013, vol. 1, no. 4.

8. Cunningham J.D. Switched reluctance motor drive circuit evaluation criteria for vehicle efficiency and responsiveness: Ph.D. Thesis. The University of Texas at Austin, 2011. 234 p.

9. Petrushin A.D., Devlikamov R.M., Smachnyi V.Iu. Elektroprivod odnokliuchevoi [Single-key electric drive]. Patent Rossiiskaia Federatsiia no. 2459341 (2012).

10. Kuznetsov V.A., Kuzmichev V.A. Ventil'no-induktornye dvigateli [Switched-reluctance motors]. Moscow: Moskovskii energeticheskii institut, 2003. 70 p.

11. Miller T.J.E. Switched Reluctance motor and their Control. Magna Physics Publishing and Clarendon Oxford Press, 1993. 203 p.

12. Petrushin A.D., Pakhomin S.A., Sedov V.I. et al. Tiagovye elektricheskie mashiny podvizhnogo sostava [Traction electric machines of rolling stock]. Eds. A.D. Petrushin, V.G. Shcherbakov. Rostov-on-Don: Rostovskii gosudarstvennyi universitet putei soobshcheniia, 2013, part 3. 179 p.

13. Ovchinnikov I.E., Advolotkin N.P. Zakonomernosti proektirovaniia ventil'nykh dvigatelei s postoiannymi magnitami dlia stankov s ChPU i drugikh mekhanizmov [Patterns of design brushless motors with permanent magnets for CNC machine tools and other mekhanizmov]. *Elektrotekhnika*, 1988, no. 7, pp. 59-65.

14. Shimchak I.V. Innovatsionnye konstruksii magnitnykh sistem sinkhronnykh mashin s postoiannymi magnitami [Innovative designs of magnetic systems of synchronous machines with permanent magnets]. *Elektrichestvo*, 2009, no. 9, pp. 37-44.

15. Sokolovskii G.G. Elektroprivody peremennogo toka s chastotnym upravleniem [AC drives with frequency control]. Moscow: Akademiia, 2006. 272 p.

16. Gandzha S.A., Mart'ianov A.S. Metodika inzhenerenogo rascheta ventil'nykh mashin s aksial'nym potokom [Technique of engineering calculation of gate machines with axial flow]. *Vestnik Iuzhno-Ural'skogo gosudarstvennogo universiteta. Energetika*, Cheliabinsk: Iuzhno-Ural'skii gosudarstvennyi universitet, 2013, vol. 13, no. 2, pp. 85-87.

17. Zechikhin B.S., Zhuravlev S.V., Sitin D.A. Raschetnye koeffitsienty sinkhronnykh mashin s redkozemel'nymi magnitami [Calculating coefficients of synchronous machines with rare earth magnets]. *Elektrichestvo*, 2009, no. 3, pp. 35-40.

18. Ofitsial'nyi sait Mathworks [Official site of Mathworks], available at: www.mathworks.com (accessed 10 March 2018).

19. Chernykh I.V. Modelirovanie elektrotekhnicheskikh ustroistv v MatLab. SimPowerSystems i Simulink [Simulation of electrical devices in MatLab. SimPowerSystems and Simulink]. Moscow: DMK Press, 2007. 288 p.

20. Le-Huy H., Brunelle P. Design and Implementation of a Switched Reluctance Motor Generic Model for Simulink SimPowerSystems. *Conference: Industrial Electronics*, 2005.

Сведения об авторах

Смачный Владислав Юрьевич (Ростов-на-Дону, Россия) – начальник отдела трудоустройства и мониторинга карьеры Ростовского государственного университета путей сообщения (344038, Ростов-на-Дону, пл. Ростовского стрелкового полка народного ополчения, 2, e-mail: Smachney87@mail.ru).

Шевкунова Анастасия Владимировна (Ростов-на-Дону, Россия) – специалист по подготовке кадров высшей квалификации отдела докторантуры и аспирантуры Ростовского государственного университета путей сообщения (344038, Ростов-на-Дону, пл. Ростовского стрелкового полка народного ополчения, 2, e-mail: nastya3051990@mail.ru).

Шутемов Сергей Владимирович (Пермь, Россия) – старший преподаватель кафедры «Электротехника и электромеханика» Пермского национального исследовательского политехнического университета (614990, Пермь, Комсомольский проспект, 29, e-mail: shutemsv@yandex.ru).

About the authors

Smachney Vladislav Yuryevich (Rostov-on-Don, Russian Federation) is a head of Employment and Career Monitoring Rostov State Transport University (344038, Rostov-on-Don, Rostovskogo Strelkovogo Polka Narodnogo Opolcheniya, sq. 2, e-mail: Smachney87@mail.ru).

Shevkunova Anastasiya Vladimirovna (Rostov-on-Don, Russian Federation) is a specialist in training highly qualified specialists of the doctoral and postgraduate department Rostov State Transport University (344038, Rostov-on-Don, Rostovskogo Strelkovogo Polka Narodnogo Opolcheniya sq., 2, e-mail: nastya3051990@mail.ru).

Shutemov Sergey Vladimirovich (Perm, Russian Federation) is a Senior Lecturer Electrical Engineering and Electromechanics Department Perm National Research Polytechnic University (614990, Perm, 29, Komsomolsky pr., e-mail: shutemsv@yandex.ru).

Получено 15.04.2019