

УДК 621.331:621.311+06

В. Ю. Смачный

СТРУКТУРНЫЙ СИНТЕЗ И ИССЛЕДОВАНИЕ СИЛОВОЙ СХЕМЫ ПРЕОБРАЗОВАТЕЛЯ ДЛЯ ПИТАНИЯ ФАЗ ВЕНТИЛЬНО-ИНДУКТОРНОГО ЭЛЕКТРОПРИВОДА

Аннотация. В статье проведен анализ требований предъявляемых к преобразователям вентильно-индукторных приводов, предложена новая топология преобразователя, содержащая один полупроводниковый ключ на фазу. Новая одноключевая топология преобразователя позволяет осуществить полное резервирование вентильно-индукторного привода, снижает стоимость преобразователя, позволяет упростить его силовую часть, следовательно, повышает его надежность. Также в статье приведены результаты физического моделирования одноключевой схемы преобразователя.

Ключевые слова: вентильно-индукторный привод, преобразователь, одноключевая схема, асимметричная полумостовая схема, математическое моделирование, экспериментальные исследования.

Для цитирования: Смачный, В. Ю. Структурный синтез и исследование силовой схемы преобразователя для питания фаз вентильно-индукторного электропривода / В. Ю. Смачный // Труды Ростовского государственного университета путей сообщения. – 2024. – № 3. – С. 73–78.

В настоящее время в РФ реализуется комплекс мероприятий, направленных на повышение уровня энергоэффективности и энергосбережения. Так, в Энергетической стратегии РФ указано, что уровень энергоемкости производства российских промышленных товаров хуже среднемировых в 1,2-2 раза. Низкая энергоэффективность обуславливает повышенную себестоимость и низкую конкурентоспособность отечественной продукции. В РФ есть потенциал энергосбережения, достигающий 30% текущего энергопотребления.

Согласно Указу Президента РФ «Об утверждении приоритетных направлений развития науки, технологий и техники в РФ и перечня критических технологий РФ» приоритетным направлениям развития является «Энергоэффективность, энергосбережение, ядерная энергетика (08)», критической технологией РФ – «Технологии создания энергосберегающих систем транспортировки, распределения и использования энергии (26)».

Из приведенного следует, что для многих отраслей остро стоят вопросы энергосбережения и энергоэффективности, которые возможно решить переходом от нерегулируемого электропривода к регулируемому.

Также для многих сфер деятельности человека в общем, и для сферы транспорта в частности, помимо энергоэффективности электрических приводов, очень важным параметром является нежность их работы и живучесть.

Указанным качествам достаточно полно удовлетворяет вентильно-индукторный привод (ВИП), в англоязычной литературе именуемый Switched Reluctance Drive (SRD). ВИП является перспективным электромеханическим преобразователем энергии, который имеет высокие технико-экономические показатели, в том числе по энергоэффективности и надежности. Он содержит следующие конструктивные элементы: вентильно-индукторную машину, которая в свою очередь состоит из статора с обмотками сосредоточенного типа и ротора, не имеющего обмоток или постоянных магнитов; преобразователь осуществляющий питание обмоток статора в течении заданного интервала времени согласованного с положением ротора, за счет чего обеспечивается заданный режим работы ВИП. ВИП не имеют коллектора, контактных

колец, обмотки на роторе за счет чего надежен в работе, технологичен в изготовлении. ВИП обладает высоким КПД, по которому уступают только машинам с постоянными магнитами. Сдерживающим фактором практического применения ВИП была необходимость принятия ряда достаточно трудоемких и затратных мер по снижению шума и вибраций, снижению пульсаций электромагнитного момента и улучшения ряда других характеристик, в том числе повышения надежности силового преобразователя и снижения его себестоимости [1-2].

К преобразователям ВИП предъявляют следующие требования: преобразователь должен иметь возможность проводить переключение фаз, контролировать и регулировать ток фаз; преобразователь должен обеспечивать возможность подключения полного напряжения источника к обмотке фазы (положительный контур); преобразователь должен иметь возможность не подключать фазу к источнику (нулевой контур); после отключения фазы преобразователь должен иметь возможность принудительно снизить ток путем приложения напряжения с отрицательной полярностью к обмотке двигателя (отрицательный контур); преобразователь должен иметь возможность сохранять остаточный ток обмотки фазы в конденсаторе или источнике (контур сохранения энергии); преобразователь должен обеспечить независимую работу фаз, иметь возможность одновременно питать несколько фаз независимо друг от друга; желательно применять наиболее простую топологию преобразователя с минимальным количеством полупроводниковых ключей.

Наиболее употребительной в настоящее время является полумостовая силовая схема питания ВИМ, которая имеет два ключевых элемента на каждую фазу. Сокращение количества относительно дорогих силовых элементов позволит снизить себестоимость и упростить силовую часть преобразователя, а также создать предпосылки для повышения его надежности.

Предлагаемая одноключевая схема состоит из 2-х независимых гальванически развязанных источника питания, 2-х конденсаторов, диода, полупроводникового ключа и статорной обмотки фазы ВИП, разделенной на две полуобмотки. Если напряжения источников равны, то применяется схема приведенная на рис. 1а, если не равны – в схему дополнительно включаются «диодные пробки» (рис. 1б). На рисунке 1, в приведена схема замещения фазы одноключевой топологии преобразователя ВИП[3, 4].

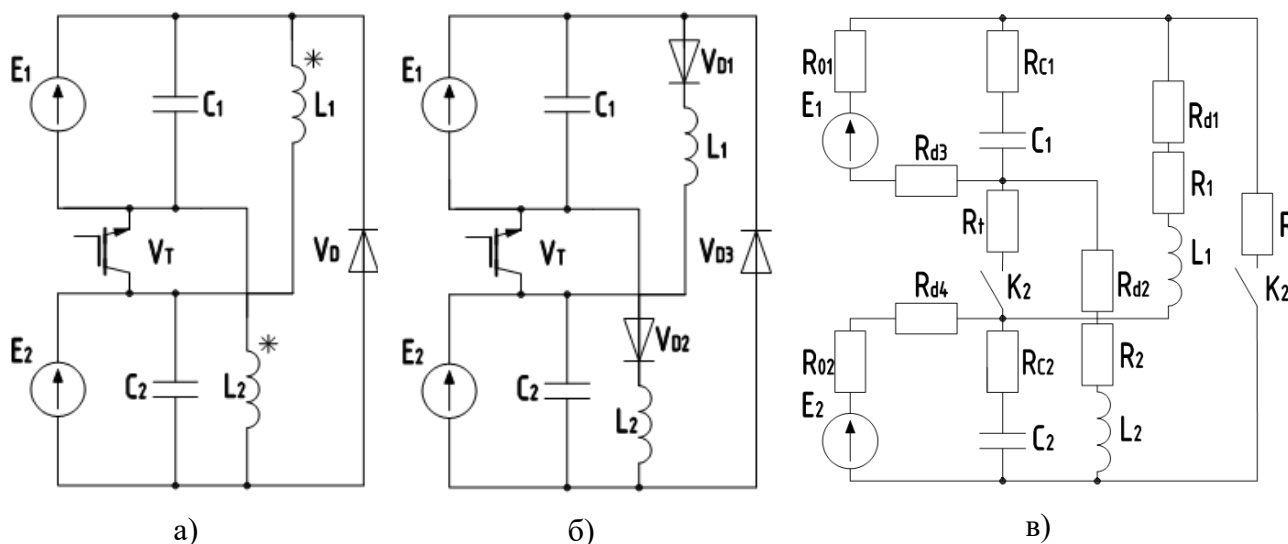


Рис. 1. Одноключевая схема преобразователя ВИП

Новая одноключевая топология, как и асимметричная полумостовая, соответствует всем требованиям, предъявляемым к преобразователям ВИП, но содержит меньше ключей, имеет меньшую стоимость, а также позволяет упростить силовую часть преобразователя, что повышает его надежность.

Новая одноключевая топология преобразователя позволяет осуществить полное резервирование ВИП не только по фазам, но и по источнику питания. Часто в транспортных средствах источником питания служат аккумуляторные батареи, что позволяет разделить источник на отдельные группы, которые питают разные фазы (рис. 2). Утрата работоспособности одной группы источников, например, при внутреннем замыкании, обесточит только одну фазу, а остальные продолжат работу[5, 6].

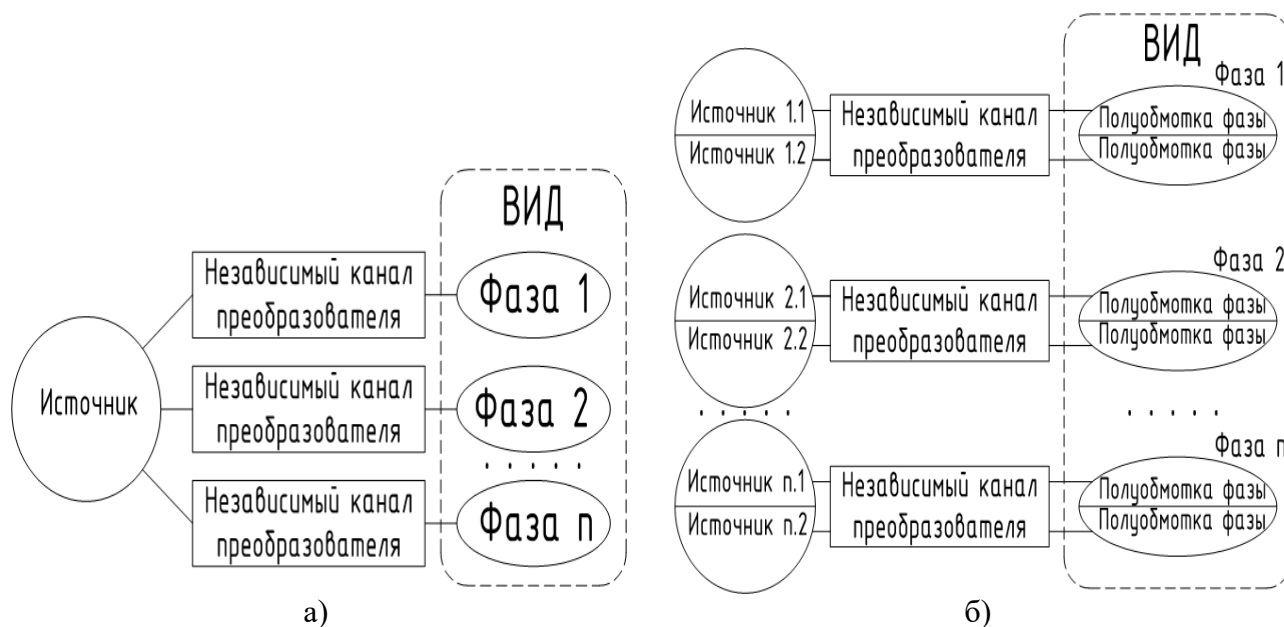


Рис. 2. Схема питания фаз ВИП:

а) без резервирования

б) с одноключевой схемой и резервированием

Проведено математическое моделирование работы предлагаемой одноключевой схемы в различных режимах:

– при открытии полупроводникового ключа

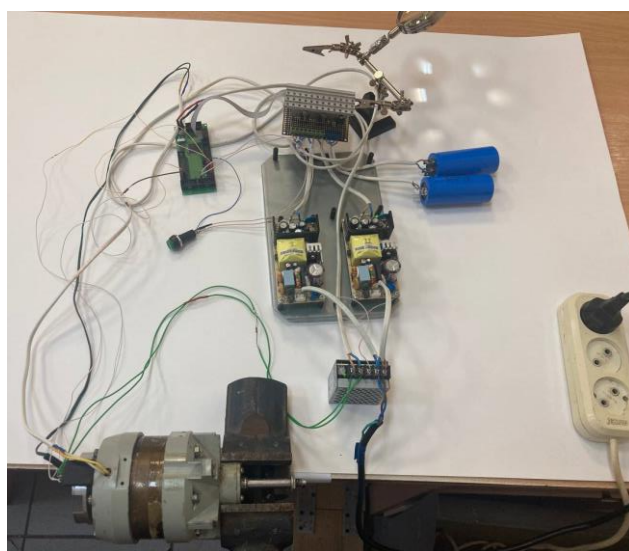
$$\left\{ \begin{array}{l} \frac{dU_{c1}}{dt} = \frac{E_1 - U_{c1} - i_{a1}R_{01} - i_{a1}R_{d3}}{C_1(R_{01} + R_{d3} + R_{c1})} \\ \frac{di_{a1}}{dt} = \frac{1}{L_{g1}} \left(E_1 - i_{a1}(R_{01} + R_{d1} + R_1 + R_t + R_{d3}) - C_1 \frac{dU_{c1}}{dt} (R_{01} + R_{d3}) - \omega \frac{\partial \psi(i_{a1}, \theta)}{\partial \theta} - i_{a2}R_t \right) \\ \frac{dU_{c2}}{dt} = \frac{E_2 - U_{c2} - i_{a2}R_{02} - i_{a2}R_{d4}}{C_2(R_{02} + R_{d4} + R_{c2})} \\ \frac{di_{a2}}{dt} = \frac{1}{L_{g2}} \left(E_2 - i_{a2}(R_{02} + R_{d4} + R_t + R_{d2} + R_2) - C_2 \frac{dU_{c2}}{dt} (R_{02} + R_{d4}) - \omega \frac{\partial \psi(i_{a2}, \theta)}{\partial \theta} - i_{a1}R_t \right) \\ \frac{d\omega}{dt} = \frac{1}{J} (M_d - M_n - B_t \omega) \\ M_d = \frac{\partial \int_0^i \psi(i_{a1}, \theta) di}{\partial \theta} + \frac{\partial \int_0^i \psi(i_{a2}, \theta) di}{\partial \theta} \end{array} \right.$$

– при закрытии полупроводникового ключа

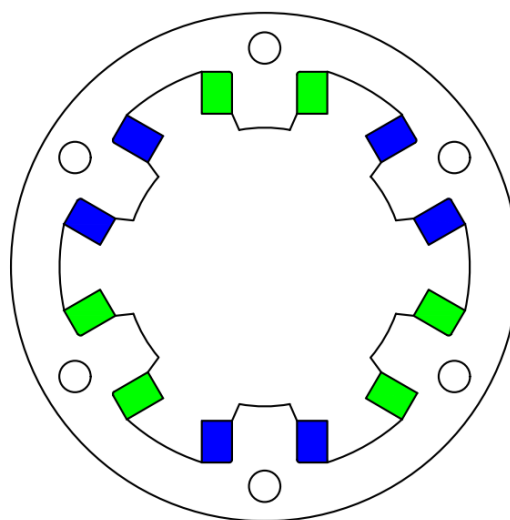
$$\left\{ \begin{array}{l} \frac{dU_{c1}}{dt} = \frac{E_1 - U_{c1} + i_{a2}R_{01} + i_{a2}R_{d3}}{C_1(R_{01} + R_{d3} + R_{c1})} \\ \frac{dU_{c2}}{dt} = \frac{E_2 - U_{c2} + i_{a1}R_{02} + i_{a1}R_{d4}}{C_2(R_{02} + R_{d4} + R_{c2})} \\ \frac{di_{a2}}{dt} = -\frac{1}{L_{g2}} \left(U_{c1} + C_1 \frac{dU_{c1}}{dt} R_{c1} + i_{a2}(R_d + R_2 + R_{d2}) + \omega \frac{\partial \psi(i_{a2}, \theta)}{\partial \theta} + i_{a1}R_d \right) \\ \frac{di_{a1}}{dt} = -\frac{1}{L_{g1}} \left(U_{c2} + C_2 \frac{dU_{c2}}{dt} R_{c2} + \omega \frac{\partial \psi(i_{a1}, \theta)}{\partial \theta} + i_{a1}(R_1 + R_{d1} + R_d) + i_{a2}R_d \right) \\ \frac{d\omega}{dt} = \frac{1}{J} (M_d - M_n - B_t \omega) \\ M_d = \frac{\partial \int_0^i \psi(i_{a1}, \theta) di}{\partial \theta} + \frac{\partial \int_0^i \psi(i_{a2}, \theta) di}{\partial \theta} \end{array} \right.$$

Для оценки адекватности полученных теоретических результатов о режимах работы схемы было провести экспериментальные исследования (рис. 3, а).

В качестве объекта исследований был выбран однофазный ВИП, электрическая машина которого имеет соотношение зубцов статора и ротора 6/6 [5]. Катушки обмотки фазы соединены следующим образом: две параллельные ветви L_1 и L_2 с тремя последовательно соединенными катушками, сдвинутыми относительно друг друга на 120° (рис. 3, б).



а)



б)

Рис. 3. ВИП с реализованной одноключевой схемой преобразователя

В ходе проведения экспериментальных исследований были получены следующие данные: напряжение в полуобмотке L_1 (рис. 4, а), максимальное значение 26,4В, минимальное значение -28,8 В; напряжение на полуобмотке L_2 (рис. 4, б), максимальное значение 26,4 В, минимальное значение -29,6; ток в полуобмотке L_1 (рис. 4, в) – измерялся с помощью шунта 0,5

Ом – максимальное значение 2 А; ток на полуобмотке L_2 (рис. 4, г) – измерялся с помощью шунта 0,5 Ом – максимальное значение 1,9 А.

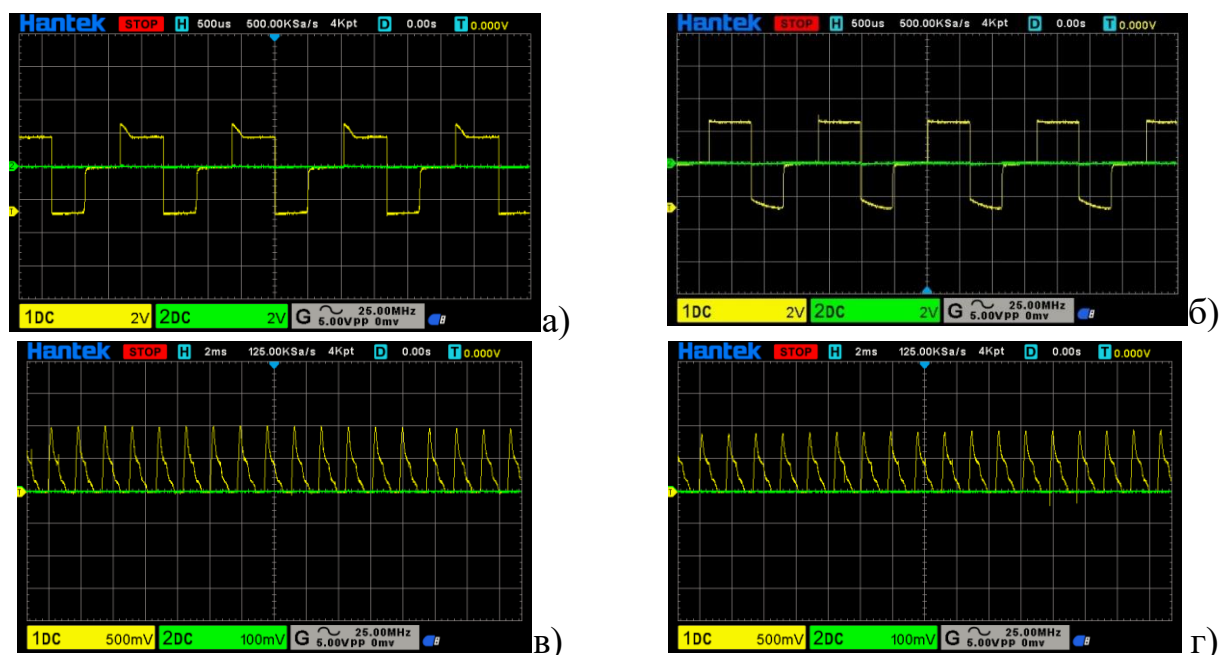


Рис. 4. Результаты экспериментальных исследований

Физическое моделирование новой одноключевой топологии преобразователя для питания фазы ВИП подтвердило ее работоспособность и сходимость расчетных и экспериментальных данных.

Библиографический список

1. Шевкунова, А. В. Усовершенствование алгоритма проектирования вентильно-индукторных машин / А. В. Шевкунова, А. В. Кашуба // Вестник Чувашского университета. – 2021. – № 3. – С. 140-155. DOI: 10.47026/1810-1909-2021-3-140-155
2. Кашуба, А. В. Оптимизационный метод формирования геометрических размеров зубцовой зоны вентильно-индукторного двигателя / А. В. Кашуба // Транспортные системы и технологии. – 2020. – Т. 6. – № 1. – С. 30-47. DOI: 10.17816/transsyst20206130-47
3. Пат. 2459341 Российская федерация, МПК H02K 29/00 (2006.01), H02P 6/00 (2006.01), H02P 25/08 (2006.01), H02K 19/06 (2006.01). Электропривод одноключевой / А. Д. Петрушин, Р. М. Девликамов, В. Ю. Смачный. – № 2011119730/07; заявл. 16.05.2011; опубл. 20.08.2012 бюл. №23.
4. Пат. 2704494 Российская федерация, МПК H02K 29/00, H02P 25/086. Электропривод одноключевой многофазный / А. Д. Петрушин, В. Ю. Смачный. Дата регистр: 29.10.2019. Заявка №2019102994; заявл. 04.02.2019г.
5. Смачный, В. Ю. Анализ схем преобразователей, применяемых для питания фаз вентильно-индукторных приводов / В. Ю. Смачный // Вестник Самарского государственного технического университета. Серия «Технические науки». – 2022. – Т. 30. – № 2. – С. 100-121. DOI: 10.14498/tech.2022.2.8
6. Мирошниченко, Е. Е. Исследование асимметрии магнитной системы вентильно-индукторного двигателя / Е. Е. Мирошниченко, А. В. Шевкунова // Эксплуатация морского транспорта. – 2024. – № 2(111). – С. 126-137. – DOI 10.34046/aumsuomtl11/22.

V. Yu. Smachney

**STRUCTURAL SYNTHESIS AND STUDY OF THE POWER CIRCUIT
OF THE CONVERTER FOR POWERING THE PHASES
OF THE SWITCHED RELUCTANCE DRIVE**

Abstract. The article analyzes the requirements for converters of switched-reluctance drives, proposes a new converter topology containing one semiconductor switch per phase. The new single-switch topology of the converter allows for full redundancy of the switched-reluctance drives, reduces the cost of the converter, simplifies its power section, and therefore increases its reliability. The article also presents the results of a physical study of a single-switch converter circuit.

Keywords: switched-reluctance drive, converter, single-switch circuit, asymmetric half-bridge circuit, mathematical modeling, experimental studies.

For citation: Smachney, V. Yu. Structural Synthesis and Study of the Power Circuit of the Converter for Powering the Phases of the Switched Reluctance Drive / V. Yu. Smachney // Trudy Rostovskogo Gosudarstvennogo Universiteta Putej Soobsenia. – 2024. – № 3. – P. 73–78.

Сведения об авторах

Смачный Владислав Юрьевич
Ростовский государственный
университет путей сообщения (РГУПС),
кафедра «Вагоны и вагонное хозяйство»,
Старший преподаватель,
e-mail: smachney87@mail.ru

Information about the authors

Smachney Vladislav Yurievich
Rostov State Transport University (RSTU)
Chair «Car and Car Economy»,
Senior Lecturer,
e-mail: smachney87@mail.ru