ЗАКЛЮЧЕНИЕ И ОБСУЖДЕНИЕ

Результаты, полученные при моделировании и на лабораторном стенде, подтвердили работоспособность и высокое качество робастной системы. Робастный регулятор тока может быть рекомендован для получения качественных переходных процессов в системах управления при питании двигателя от «слабых» линий или от сетей, для которых характерны значительные просадки напряжения; робастный регулятор скорости – для получения качественных переходных процессов в промышленных САР асинхронного электропривода с 3–4-кратной вариацией момента инерции и (или) заметным влиянием упругостей механической части.

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. Решмин Б.И. Уточненная модель асинхронного двигателя как объект для построения системы управления // Электротехника. 2005. №7. С.14-19.

2. Борцов Ю.А., Поляхов Н.Д., Путов В.В. Электромеханические системы с адаптивным и модальным управлением. Л.: Энергоатомиздат, 1984. 216 с.

3. Ключев В.И. Теория электропривода: учебник для вузов. М.: Энергоатомиздат, 1998. 704 с.

4. Виноградов А.Б., Чистосердов В.Л., Сибирцев А.Н. Адаптивная система векторного управления асинхронным электроприводом // Электротехника. 2007. №7. С. 7–17.

5. Ишматов З.Ш. Микропроцессорное управление электроприводами и технологическими объектами. Полиномиальные методы. Екатеринбург: Изд-во УГТУ-УПИ. 2007. 278 с.

6. Goodwin G.C., Graebe S.F., Salgado M.E. Control system design. Valparaiso, 2000. 883 p.

INFORMATION IN ENGLISH

ROBUST CURRENT AND SPEED CONTROLLERS OF VARIABLE SPEED INDUCTION MOTOR DRIVE

Ishmatov Z.Sh., Plotnikov Y.V., Gurentjev E.A.

The frequency-controlled electric drive with vector control system under parametric and external disturbances is considered. Robust current and speed controllers, which are used to reduce the sensitivity to different disturbances, are offered.

Keywords: frequency-controlled induction electric drive, interval model, robust control.

REFERENCES

1. Reshmin B.I. Utochnennaya model asinhronnogo dvigatelya kak obyekt dlya postroyeniya sistemy upravleniya [Refined model of induction motor as an object for control system development]. *Elektrotechnika* [Electrical engineering], 2005, no. 7, pp. 14–19.

2. Bortsov Yu.A., Polyakhov N.D., Putov V.V. *Elektromehanicheskie sistemi s adaptivnym i modalnym upravleniem* [Electromechanical systems with adaptive and modal control]. Leningrade: Energoatomizdat, 1984, 216 p.

3. Klyuchev B.I. *Teoriya elektroprivoda* [Theory of electric drive]: textbook for universities. M.: Energoatomizdat, 1998. 704 p.

4. Vinogradov A.B., Chistoserdov V.L., Sibirtsev A.N. Adaptivnaya sistema vektornogo upravleniya asinhronnym elektroprivodom [Adaptable system of induction electric drive vector control]. *Elektrotechnika* [Electrical engineering], 2007, no. 7, pp. 7–17.

5. Ishmatov Z.S. *Mikroprotsessornoye upravlenie elektroprivodami i tehnologicheskimi obyektami. Polinomialnye metody* [Microprocessor based control of electric drives and production facilities. Polynomial methods]. Yekaterinburg: Publishing house of UGTU-UPI, 2007, 278 p.

6. Goodwin G.C., Graebe S.F., Salgado M.E. Control system design. Valparaiso, 2000. 883 p.

УДК 62-83:621.313.3

Усынин Ю.С., Григорьев М.А., Сидоренко Н.Ю.

СИЛОВЫЕ ЦЕПИ СИНХРОННЫХ РЕАКТИВНЫХ ЭЛЕКТРОПРИВОДОВ С НЕЗАВИСИМЫМ УПРАВЛЕНИЕМ ПО КАНАЛУ ВОЗБУЖДЕНИЯ

В статье представлены схемы силовых цепей синхронных реактивных электроприводов с независимым управлением по каналу возбуждения. Показано, что количество ключей определяется числом фаз и лежит в диапазоне от 2*m* до 4*m*. Методами регрессионного анализа установлено, что удельная цена на полупроводниковые преобразователи при малых значениях тока не зависит от величины тока и определяется стоимостью микропроцессорной системы управления. При токах, больших 100 А, зависимость между ценой и током приближается к линейной, поэтому отказ от трехфазной конфигурации силовых цепей полупроводникового преобразователя и переход к многофазной конфигурации не приводят к увеличению массогабаритных показателей источника питания. Таким образом, усложнение конфигурации схем силовых цепей (увеличение количества фаз) для технологических установок с установленной мощностью более 200 кВт позволяет улучшить массогабаритные показатели электромеханического преобразователя при сохранении габаритов полупроводникового преобразователя.

Ключевые слова: полупроводниковые преобразователи частоты, многофазность, удельные массогабаритные показатели.

ВВЕДЕНИЕ

В установках с тяжёлыми и весьма тяжёлыми условиями эксплуатации хорошо зарекомендовали себя синхронные реактивные электроприводы с независимым управлением по каналу возбуждения (СРМНВ), в которых роль обмотки возбуждения выполняет обмотка, размещённая в пазах статора, когда её витки нахо-

дятся напротив межполюсного промежутка ротора, в то время как роль якоря выполняет обмотка, расположенная над полюсом.

Достижение высоких удельных показателей машины возможно при специальных законах формирования фазных токов, что приходится учитывать при конструировании полупроводникового преобразователя. Современные электрические преобразователи выполняются на вентилях нового поколения: *MOSFET* (отличающиеся большим входным сопротивлением и предельным коммутируемым напряжением 500 В), *IGBT* (с высоким быстродействием, малым падением напряжения, выпускаемые на предельные напряжение 3,3 кВ и токи 1200 А).

Надежностные показатели и возможности современных полупроводниковых преобразователей значительно увеличены за счет применения новых законов управления [1-9]. Расширены возможности реализации тормозных режимов работы электропривода за счет применения активных выпрямителей [10].

Сопоставление схем силовых цепей

Как известно, полупроводниковый преобразователь вносит существенную долю в общую стоимость комплектного электропривода. Поэтому применение нестандартных (несерийных) схем силовых цепей требует дополнительного обоснования. С другой стороны, в диапазоне больших мощностей унификация элементной базы не имеет такого значения, как в серийных электроприводах малых и средних мощностей.

В электроприводах с СРМНВ при снижении количества фаз возрастают пульсации электромагнитного момента, при этом уменьшается среднее значение электромагнитного момента, а затраты на полупроводниковую часть снижаются.

На **рис. 1** представлены линейные регрессионные зависимости весового стоимостного коэффициента от тока для разных типов полупроводниковых преобразователей.

Наиболее просто реализуется схема с индивидуальными источниками тока (ИИТ) на каждую фазу (**рис. 2**). Такие системы могут выполняться с симметричным или несимметричным управлением вентилями. Недостатком схемы является большое суммарное число ключей $4m$ (где m – число фаз СРМНВ).

С учётом возможностей серийных трёхфазных инверторов напряжения (ИН) целесообразно рассматривать вариант электропривода, в котором статорные обмотки собраны в две трёхфазные звезды, сдвинутые на 30 электрических градусов друг относительно друга (**рис. 3**). Схема требует двух трёхфазных инверторов: ИН1 и ИН2. В электроприводах малой и средней мощностей она выгоднее схемы (см. **рис. 2**) с меньшим числом ключей. В электроприводах большой мощности она является наиболее естественной, т.к. не требует параллельного соединения ключей при больших токах.

Как показали оптимизационные расчёты электропривода с СРМНВ для разных вариантов схем силовых цепей статора, наименьший по габаритам электродвигатель при заданном номинальном моменте получается в схеме на **рис. 2** при прямоугольной форме фазных токов. В схеме на **рис. 3** электрический преобразователь, выполненный на стандартных ИН, имеет меньшее число ключей, но габарит электродвигателя из-за невозможности иметь прямоугольную форму фазных токов получается на 12% больше.

В электроприводах и электрогенераторах, работающих в сетях с пониженным напряжением, заслуживают внимания варианты нулевых схем силовых цепей статора, т.к. в отличие от мостовых, здесь нет двойного падения напряжения на вентилях, и при том же количестве ключей можно получить двойной ток.

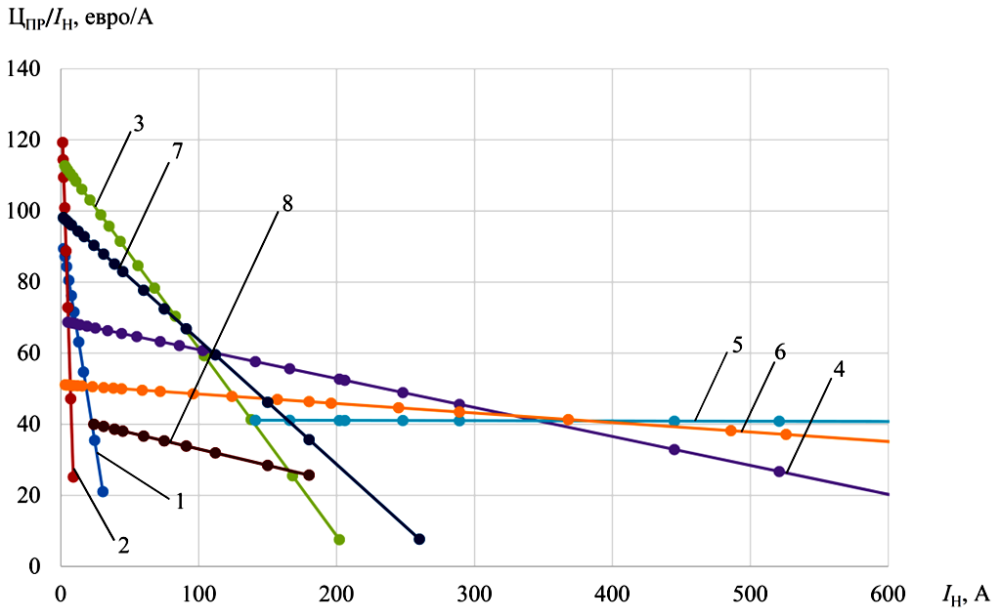


Рис. 1. Линейная регрессионная зависимость удельной цены вентильных преобразователей от номинального тока нагрузки:
1 – *SE* фирмы *Control Techniques*; 2 – *SK* фирмы *Control Techniques*; 3 – *SP* фирмы *Control Techniques*; 4 – *ACS*800 фирмы *ABB*; 5 – *ACS*880 фирмы *ABB*; 6 – *ACS*550-01 фирмы *ABB*; 7 – 3*G*3*RVA* фирмы *Omron*; 8 – 3*G*3*PVA* фирмы *Omron*

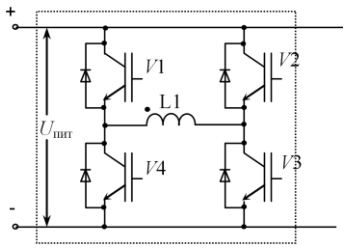


Рис. 2. Мостовая схема питания фазы СРМНВ

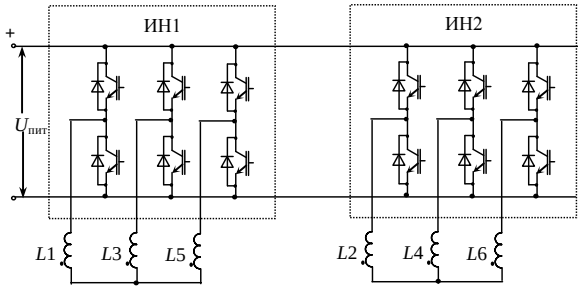


Рис. 3. Схема с двумя мостовыми инверторами

Бортовые сети подвижных объектов выполняются на постоянном токе с очень низким уровнем напряжения – 12, 24 или 48 В. Здесь оказывается выгоднее разделить потенциально силовые цепи и цепи возбуждения: силовые цепи – выполнить по нулевым схемам с неуправляемыми вентилям, а цепи возбуждения с целью снижения тока через транзисторы – с питанием от высоковольтного источника напряжения. Один из вариантов такого решения представлен на **рис. 4**.

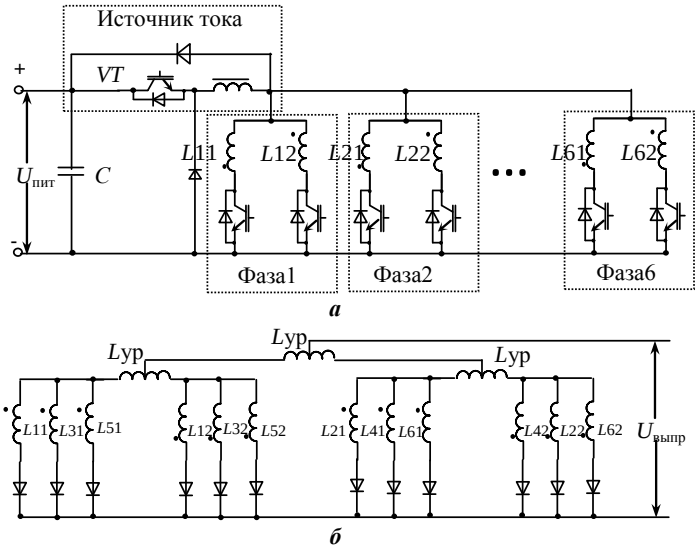


Рис. 4. Схема цепей возбуждения (*а*) и силовых (якорных) цепей (*б*) при их гальваническом разделении

Здесь (см. **рис. 4, *а***) в цепи обмоток возбуждения включены транзисторы, которые образуют коммутатор фазных токов. Последовательно с ними включен транзистор *VT*, который работает в режиме широтно-импульсной модуляции и выполняет функцию регулируемого источника тока. Так как каждая из обмоток возбуждения должна создавать магнитодвижущую силу в двух направлениях, а вентиль проводит ток только в одном направлении, то каждую обмотку фазы выполнили расщеплённой.

Переменное напряжение силовой (якорной) обмотки преобразуется в постоянное по нулевой схеме выпрямления «звезда – обратная звезда» (**рис. 4, *б***).

По данным дилеров ряда отечественных и зарубежных фирм, выпускающих серийное электрооборудование, были рассчитаны и сопоставлены затраты на электропривод с СРМНВ для разных вариантов силовых схем (**рис. 5**). Анализ приведенных кривых показывает, что схемы с инверторами напряжений (**рис. 5**, кривая 2) оказываются вполне конкурентоспособными в диапазоне средних мощностей (от 10 до 100 кВт). При мощностях более P=100 кВт относительная разница цен схемы с индивидуальными источниками питания и с инверторами напряжения выравнивается. Здесь схема с индивидуальными источниками питания оказывается наиболее естественной из-за высокой надёжности электропривода.

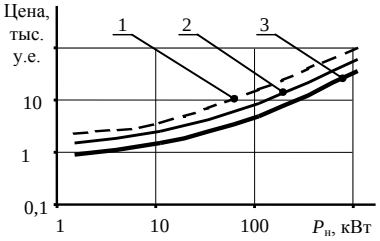


Рис. 5. Стоимость электрических преобразователей при различных схемах силовых цепей СРМНВ:
1 – ИИТ; 2 – ИН; 3 – схема на рис. 4

ЗАКЛЮЧЕНИЕ И ОБСУЖДЕНИЕ

Рассмотрение представленных схем силовых цепей показывает, что в схемах с СРМНВ вполне эффективно могут найти применение схемы со стандартным инвертором напряжения. В схемах же с пониженным напряжением постоянного тока (бортовые сети подвижных установок) выгоднее гальванически разделять цепи возбуждения и силовые цепи.

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. Частотно-широтноимпульсный адаптивный регулятор переменного напряжения с интегрирующей системой управления / М.М. Дудкин, О.Г. Брылина, Л.И. Цы-тович, А.В. Тюгаев // Вестник Южно-Уральского государственного университета. Серия: Энергетика. 2013. Т. 13. № 2. С. 45-52.

2. Дудкин М.М. Энергосберегающие технологии в испытательных стендах с использованием однофазных обратимых преобразователей //Вестник Южно-Уральского государственного университета. Серия: Энергетика. 2013. Т. 13. № 1. С. 5-18.

3. Интегрирующее устройство синхронизации с псевдоследящей фиксацией точек естественной коммутации напряжения сети / Л.И. Цытович, М.М. Дудкин, О.Г. Брылина, А.В. Тюгаев // Вестник Южно-Уральского государственного университета. Серия: Энергетика. 2013. Т. 13. № 2. С. 53-61.

4. Интегрирующий аналого-цифровой датчик нулевого тока / Л.И. Цытович, М.М. Дудкин, О.Г. Брылина, В.П. Мацин // Вестник Южно-Уральского государственного университета. Серия: Энергетика. 2012. № 37 (296). С. 93-96.

5. О новом принципе интегрирующего аналого-цифрового преобразования с бестактовым поразрядным уравновешиванием / С.П. Лохов, Л.И. Цытович, М.М. Дудкин, О.Г. Брылина, Р.М. Рахматулин // Вестник Южно-Уральского государственного университета. Серия: Энергетика. 2012. № 37 (296). С. 97-106.

6. Система непрерывного контроля сопротивления изоляции электротехнических изделий в процессе их термической сушки / Л.И. Цытович, Р.М. Рахматулин, О.Г. Брыли-

на, М.М. Дудкин, А.Ю. Мыльников, В.А. Тюгаев, А.В. Тюгаев // Промышленная энергетика. 2013. № 1. С. 24-28.

7. Комплексный автоматизированный стенд для изучения физических основ электроники и преобразовательной техники / М.В. Гельман, Р.З. Хусаинов, М.М. Дудкин, О.Г. Терещина // Вестник Южно-Уральского государственного университета. Серия: Энергетика. 2007. № 12 (84). С. 19-24.

8. Частотно-широтноимпульсный терморегулятор сушильной камеры с непрерывным тестированием сопротивления изоляции электротехнического изделия / Л.И. Цытович, О.Г. Брылина, М.М. Дудкин, Р.М. Рахматулин, А.В. Тюгаев // Вестник Южно-Уральского государственного университета. Серия: Энергетика. 2011. № 34 (251). С. 50–55.

9. Дудкин М.М. Однофазные обратимые преобразователи напряжения для улучшения качества электрической энергии в сетях ограниченной мощности // Практическая силовая электроника. 2012. № 2. С. 19.

10. Дудкин М.М. Энергетические характеристики однофазных обратимых преобразователей напряжения с различными законами модуляции // Практическая силовая электроника. 2010. № 38. С. 25–32.

INFORMATION IN ENGLISH

POWER CIRCUITS OF RELUCTANCE SYNCHRONOUS ELECTRIC DRIVES WITH INDEPENDENT CONTROL BY EXCITATION CHANNEL

Usinin Yu.S., Grigorev M.A., Sidorenko N.Yu.

The article presents the main-circuit schemes of field regulated reluctance electric drives. It is shown that the number of switches is defined by the number of phases and lies in a range from 2*m* to 4*m*. Using regression analysis method it was found that the semiconductor converter unit price for small current values does not depend on the current value and is determined by the microprocessor control system price. At currents greater than 100 A the relationship between the price and the current is nearly linear, so replacement of a three-phase semiconductor converters power circuits configuration with a polyphase configuration does not increase the weight or size of the power source. Thus, the complication of power circuits configurations (increasing the number of phases) for technological installations with rated capacity of more than 200 kW allows to improve the weight-size parameters of the electromechanical converter without increasing the size of the semiconductor converter.

Keywords: semiconductor frequency converters, polyphase quality, unit weight-size parameters.

REFERENCES

1. Dudkin M.M., Brylina O.G., Tsytovich L.I., Tyugaev A.V. Chastotno-shirokoimpulsnyi adaptivnyi regulyator peremennogo napryazheniya s integriruyuschei sistemoi upravleniya [Frequency-pulse-width adaptive controller of AC voltage with integrated control system]. Bulletin of the South Ural State University. Series: Power Engineering, 2013, vol. 13, no. 2, pp. 45-52 .

2. Dudkin M.M. Energosberegayuschie tehnologii v ispytatelnyh stendah s ispolzovaniem odnofaznyh obratimyh preobrazovatelei [Energy saving technologies in test rigs using single phase reversible converters]. *Vestnik Yuzhno-Uralskogo Gosudarstvennogo Universiteta. Seriya: Energetica* [Bulletin of the South Ural State University. Series: Power Engineering], 2013, vol. 13, no. 1, pp. 5-18.

3. Tsytovich L.I., Dudkin M.M., Brylina O.G., Tyugaev A.V. Integriruyuschee ustroistvo sinhronizatsii s psevdosledyaschei fiksatsiyei tochek estestvennoi kommutatsii napryazheniya seti [Integrating synchronization device with pseudofollowing fixation of natural switching voltage points]. *Vestnik Yuzhno-Uralskogo Gosudarstvennogo Universiteta. Seriya: Energetica* [Bulletin of the South Ural State University. Series: Power Engineering], 2013, vol. 13, no. 2, pp. 53-61.

4. Tsytovich L.I., Dudkin M.M., Brylina O.G., Matsin V.P. Integriruyuschii analogo-tsifrovoi datchik nulevogo toka [Integrating analog-to-digital sensor of zero current]. *Vestnik Yuzhno-Uralskogo Gosudarstvennogo Universiteta. Seriya: Energetica* [Bulletin of the South Ural State University. Series: Power Engineering], 2012, no. 37(296), pp. 93-96.

5. Lokhov S.P., Tsytovich L.I., Dudkin M.M., Brylina O.G., Rakhmatulin R.M. O novom printsipe integriruyuschego analogo-tsifrovogo preobrazovaniya s bestaktovym porazryadnym uravnoveshivaniem [About the new principle of integrating analog-to-digital conversion with tactless bit-by-bit balancing]. *Vestnik Yuzhno-Uralskogo Gosudarstvennogo Universiteta. Seriya: Energetica* [Bulletin of the South Ural State University. Series: Power Engineering], 2012, no. 37(296), pp. 97-106.

6. Tsytovich L.I., Rakhmatulin R.M., Brylina O.G., Dudkin M.M., Mylnikov A.Y., Tyugaev V.A., Tyugaev A.V. Sistema nepreryvnogo kontrolya soprotivleniya izolyatsii elektrotehnicheskih izdelii v protsesse ih termicheskoy sushki [Continuous monitoring of electro technical products in process of thermal drying insulation resistance control system]. *Promishlennaya Energetika* [Industrial Energy], 2013, no. 1, pp. 24-28.

7. Gelman M.V., Khousainov R.Z., Dudkin M.M., Tereschina O.G. Kompleksnyi avtomatizirovannyi stend dlya izucheniya fizicheskih osnov elektroniki i preobrazovatelnoy tehniki [Complex automated stand for studying physical fundamentals of electronics and converter technology]. *Vestnik Yuzhno-Uralskogo Gosudarstvennogo Universiteta. Seriya: Energetica* [Bulletin of the South Ural State University. Series: Power Engineering], 2007, no. 12(84), pp. 19-24.

8. Tsytovich L.I., Brylina O.G., Dudkin M.M., Rakhmatulin R.M., Tyugaev A.V. Chastotno-shirotno-impulsnyi termoregulyator sushilnoi kamery s nepreryvnym testirovaniem soprotivleniya izolyatsii elektrotehnicheskogo izdeliya [Frequency-pulse-width thermocontroller drying chamber with continuous testing of electrical product insulation resistance]. *Vestnik Yuzhno-Uralskogo Gosudarstvennogo Universiteta. Seriya: Energetica* [Bulletin of the South Ural State University. Series: Power Engineering], 2011, no. 34(251), pp. 50-55.

9. Dudkin M.M. Odnofaznye obratimye preobrazovateli napryazheniya dlya uluchsheniya kachestva elektricheskoi energii v setyah ogranichennoy moschnosti [Single-phase reversible voltage converters improving the quality of electric power in the mains of limited power]. *Practicheskaya Silovaya Electronika* [Practical power electronics], 2012, no. 2, p. 19.

10. Dudkin M.M. Energeticheskie haracteristiki odnofaznykh obratimyh preobrazovatelei napryazheniya s razlichnymi zakonami modulyatsii [Energy characteristics of single-phase reversible voltage converters with different laws of modulation]. *Practicheskaya Silovaya Electronika* [Practical power electronics], 2010, no. 38, pp. 25-32.