

Рекуперирующий двухсекционный преобразователь частоты для электроприводов переменного тока

Шрейнер Р.Т., докт. техн. наук, Кривовяз В.К., канд. техн. наук,
Костылев А.В., канд. техн. наук, Шилин С.И., канд. техн. наук

Статья посвящена анализу рекуперирующих двухсекционных преобразователей частоты с позиций реализации заложенных в них потенциальных возможностей средствами управления. Рассматриваются различные варианты построения выпрямителя в схеме рекуперирующего преобразователя с промежуточным звеном постоянного тока. Представлены результаты математического моделирования.

Ключевые слова: электропривод, рекуперирующий двухсекционный преобразователь частоты

Regenerating two-section frequency converter for AC drives

Shreiner R.T., Doctor of Engineering, Krivovyaz V.K., Candidate of Engineering,
Kostylev A.V., Candidate of Engineering, Shilin S.I., Candidate of Engineering

The article analyzes the regenerating two-section frequency converter from the standpoint of implementation of its inherent potential control recourses. Various variants of the rectifier of regenerating DC link convertor are considered. The simulation results are presented.

Key words: electric drive, regenerating two-section frequency converter

В современной полупроводниковой преобразовательной технике для регулируемого электропривода переменного тока получили применение трехуровневые автономные инверторы, позволяющие увеличить число уровней выходного напряжения и улучшить гармонический состав переменного тока, питающего двигатель. С целью улучшения качества потребляемой электроэнергии в схемах мощных преобразователей с промежуточным звеном постоянного тока используются либо 12-пульсные неуправляемые выпрямители, либо трехуровневые активные выпрямители [1]. К недостаткам силовых схем с трехуровневыми автономными инверторами относятся наличие дополнительных фиксирующих диодов и проблема поддержания заданного значения нулевого уровня напряжения питания.

В работе [2] рассмотрен альтернативный вариант топологии силовой схемы – двухсекционный преобразователь частоты (ДСПЧ), содержащий два двухуровневых инвертора напряжения (АИ1, АИ2), выполненных по трехфазным мостовым схемам и имеющих независимое питание от двух потенциально разделенных источников (АВ1, АВ2). В сравнении с классической схемой трехуровневого инвертора такая схема дает аналогичное увеличение выходной мощности, величины и числа возможных уровней выходного напряжения. При этом снимается проблема распределения напряжения между конденсаторами в цепях питания инверторов, а также между последовательно соединенными силовыми транзисторами в классической схеме. Кроме того, в двухсекционной схеме отсутствуют дополнительные фиксирующие диоды и облегчается возможность улучшения сетевых характеристик преобразователя частоты за счет использования возможностей многопульсных схем выпрямления.

Недостатком ДСПЧ является подключение двигателя к инверторам по шестипроводной схеме раздельного питания фазных обмоток. Его значимость определяется конкретными условиями размещения электрооборудования.

В многоуровневых преобразователях с ШИМ для снижения du/dt используют фазовые смещения опорных сигналов [3]. Результаты моделирования показали [2], что наиболее благоприятные результаты по улучшению качества выходного напряжения ДСПЧ с ШИМ могут быть достигнуты путем модернизации опорных сигналов, а именно заменой симметричных на несимметричные, и введения относительного сдвига этих сигналов во времени. Выявлены дополнительные факторы, возникающие в цифровых системах управления вследствие дискретизации задающих воздействий узлов ШИМ по времени и уровню, а также предложены способы устранения негативных последствий дискретизации на гармонический состав выходного напряжения.

Настоящая статья посвящена вопросам построения рекуперирующих вариантов двухсекционных преобразователей с промежуточным звеном постоянного тока. При этом входные элементы силовой схемы (неуправляемые выпрямители) заменяются на управляемые активные выпрямители, работающие в режиме обратных автономных инверторов напряжения. Анализируется силовая схема такого рекуперирующего ДСПЧ, представленная на рис.1.

Схема содержит два двухуровневых инвертора напряжения (АИ1, АИ2), выполненных по трехфазным мостовым схемам. В качестве источников их питания используются трехфазные активные выпрямители (АВ1, АВ2).

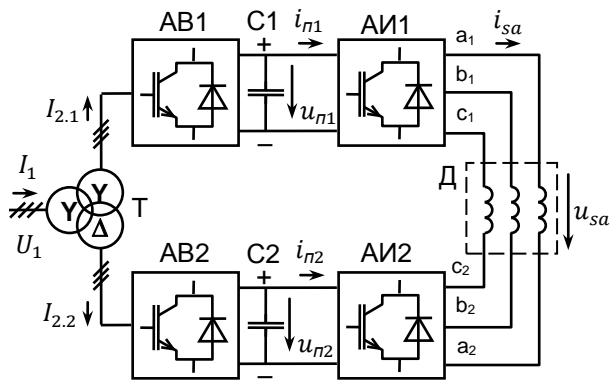


Рис. 1. Силовая схема рекуперирующего двухсекционного преобразователя частоты

Потенциальное разделение выпрямителей обеспечивается трехмоточным сетевым трансформатором (Т). В звене постоянного тока используются фильтрующие конденсаторы (С1, С2). Рассмотрены два варианта построения систем управления этими устройствами.

В первом варианте реализуется режим коммутации силовых управляемых ключей активных выпрямителей с частотой, равной частоте сетевого напряжения с постоянным интервалом проводимости. Установлено, что с позиции выравнивания токов, потребляемыми выпрямителями из сети, имеют важное значение дополнительные факторы организации систем управления инверторами АИ1, АИ2. Однократное обновление цифровых управляющих воздействий на входах узлов ШИМ АИН при показанном на рис. 2 смещении модернизированных опорных сигналов во времени вызывает соответствующее смещение основных гармоник импульсного переменного напряжения на выходах автономных инверторов. В данном двухсекционном преобразователе инверторы подключаются к нагрузке последовательно и обтекаются общим током. Поэтому фазовые сдвиги основной гармоники выходных токов по отношению к основным гармоникам выходных напряжений инверторов АИ1 и АИ2 (соответственно φ_1 и φ_2) оказываются различными. Отсюда возникает неравномерность средних значений токов, потребляемых инверторами от источников питания. Для оценки значимости этого фактора используется коэффициент неравномерности токов:

$$K_H = \frac{|I_{d1.c.p} - I_{d2.c.p}|}{I_{d1.c.p} + I_{d2.c.p}}, \quad (1)$$

где, $I_{d1.c.p}$, $I_{d2.c.p}$ – средние значения токов, потребляемых инверторами от источников питания.

Используя известные соотношения между входными и выходными значениями токов и напряжений АИ [4], можно выразить коэффициент неравномерности через параметры схемы ДСПЧ с ШИМ следующим образом:

$$K_H = \frac{|\cos(\varphi_H - \Delta\varphi/2) - \cos(\varphi_H + \Delta\varphi/2)|}{\cos(\varphi_H - \Delta\varphi/2) + \cos(\varphi_H + \Delta\varphi/2)}, \quad (2)$$

где $\Delta\varphi = 2\pi \frac{f_1}{f_{оп}}$ – различие фазовых углов нагрузки, пропорциональное отношению циклической частоты опорного сигнала ШИМ $f_{оп}$ к циклической частоте основной гармоники выходных напряжений инверторов f_1 . Например, при $f_{оп} = 1$ кГц, $f_1 = 50$ Гц и коэффициенте мощности нагрузки по основной гармонике $\cos \varphi_H = 0,8$ получаем коэффициент неравномерности $K_H = 0,12$, т.е. различие токов составляет 12%.

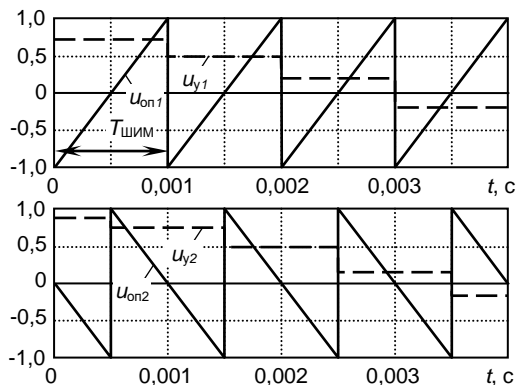


Рис. 2. Диаграммы дискретных задающих воздействий и опорных сигналов узлов ШИМ ДСПЧ в системе с однократным обновлением

Для устранения данного различия необходимо обеспечить равенство фазовых углов основных гармоник выходных напряжений инверторов. В условиях смещения опорных сигналов во времени это может быть обеспечено путем двукратного обновления значений цифровых сигналов на входах узлов ШИМ и поочередной загрузкой обновленных значений управляющих воздействий в регистры сравнения ШИМ, как это показано на рис. 3.

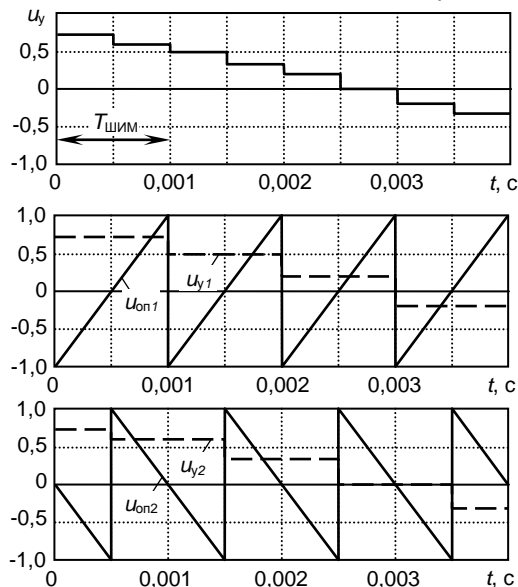


Рис. 3. Диаграммы дискретных задающих воздействий и опорных сигналов узлов ШИМ ДСПЧ в системе с двукратным обновлением

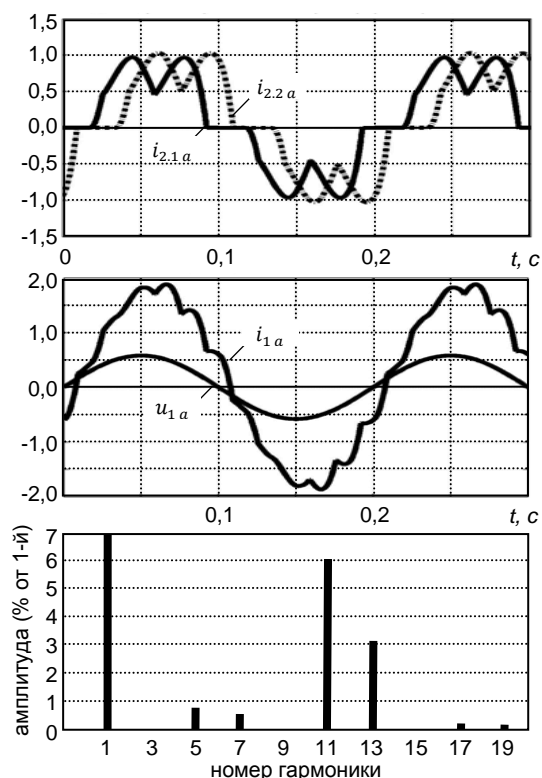


Рис.4. Временные диаграммы напряжений и токов в узле управляемых выпрямителей и гармонический состав сетевого тока ДСПЧ в системе с однократным обновлением

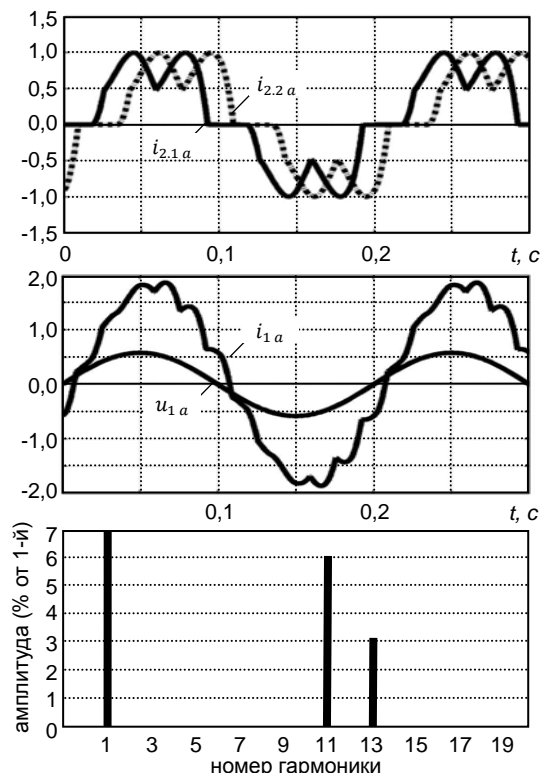


Рис.5. Временные диаграммы напряжений и токов в узле управляемых выпрямителей и гармонический состав сетевого тока ДСПЧ в системе с двукратным обновлением

Сказанное подтверждается сопоставлением представленных на рис. 4 и рис.5 результатов математического моделирования режимов работы ДСПЧ при

следующих условиях, $f_{оп} = 1$ кГц, $f_1 = 50$ Гц, $\cos \varphi_H = 0,92$ режим работы электропривода – двигательный. Здесь и далее все переменные представлены в системе относительных единиц при использовании базисных значений двигателя.

Как видно, при однократном обновлении различие значений токов $i_{1.2a}$ и $i_{2.2a}$ составляет порядка 6%, что соответствует соотношению (2). Благодаря 12-пульсной схеме выпрямления ток, потребляемый ДСПЧ из сети i_{1a} , имеет более благоприятную форму в сравнении с токами питания отдельных выпрямителей. По спектру потребляемого тока коэффициент высших гармоник составляет 7%.

Наиболее значимыми по амплитуде являются 5,7,11 и 13 гармоники. Наличие в спектре 5 и 7 гармоник в схеме 12-пульсного выпрямления объясняется неравномерностью средних значений токов питания инверторов в системе с однократным обновлением.

Двукратное обновление задающих воздействий на входах узлов ШИМ ДСПЧ при тех же условиях обеспечивает полное устранение неравномерности токов, потребляемых инверторами. Это позволяет полностью реализовать преимущества 12-пульсной схемы выпрямления: устранить 5 и 7 гармоники в токах питания выпрямителей ДСПЧ, что дает снижение коэффициента высших гармоник.

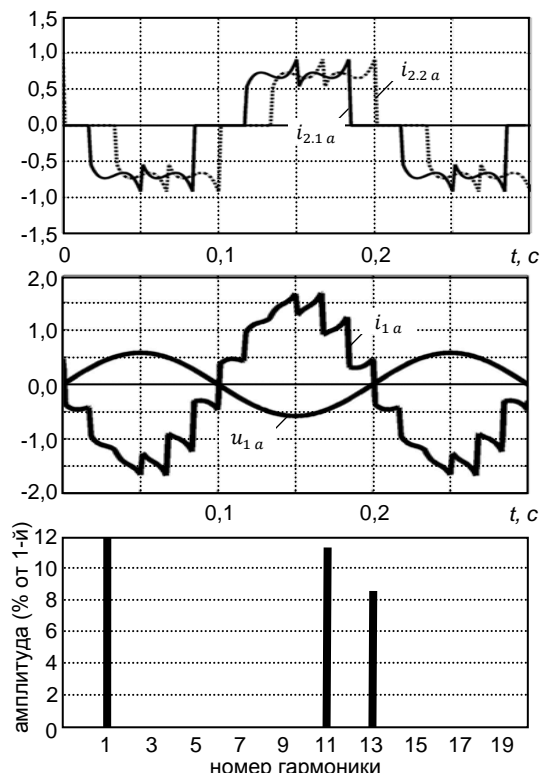


Рис.6. Временные диаграммы напряжений и токов в узле управляемых выпрямителей и гармонический состав сетевого тока ДСПЧ в системе с двукратным обновлением в режиме рекуперации

Результаты моделирования работы ДСПЧ в режиме рекуперации энергии при действии на вал двигателя активного момента нагрузки, равного номинальному значению

представлены на рис. 6. Как видно, двукратное обновление и здесь обеспечивает равенство средних значений токов, потребляемых инверторами, однако форма и коэффициент высших гармоник потребляемого из сети тока оказываются худшими в сравнении с двигательным режимом. Как следует из спектра тока питания ДСПЧ, коэффициент высших гармоник составляет 16,8%.

Отметим, что результаты моделирования инверторного режима получены при длительности проводящего состояния транзисторов силовых ключей активных выпрямителей $\lambda_T=150^\circ$, что является оптимальным значением для данного соотношения параметров. Представленные выше графики для двигательного режима получены при блокировании управляющих сигналов на транзисторы силовых ключей АВ1, АВ2.

Рассмотренный выше первый вариант управления приемлем для активных выпрямителей, использующих низкочастотные силовые полупроводниковые приборы. Как видно из представленных результатов моделирования, при частоте коммутации ключей с частотой питающей сети не удовлетворяются требования высокого качества потребления электроэнергии. При более высокой частоте коммутации низкочастотных ключей улучшение гармонического состава потребляемого тока в низкочастотной части спектра может быть обеспечено на основе принципа селективного подавления гармоник [5,6,7].

При использовании высокочастотных силовых ключей АВ радикальным способом улучшения качества потребляемого тока является использование второго варианта управления, а именно – режима ШИМ активных выпрямителей ДСПЧ. Активные выпрямители с высокочастотной ШИМ гораздо более адаптированы к нормам по электромагнитной совместимости с питающей сетью. Они могут быть использованы как средство энергосбережения и улучшения качества потребления и использования электроэнергии.

Типовым решением в данном варианте является использование двухканальной системы управления АВ, содержащей внутреннюю двухканальную систему регулирования потребляемых (сетевых) токов и внешнюю одноканальную САР выпрямленного напряжения АВ. Принципы построения и методики расчета регуляторов таких систем известны из литературы [8] и могут быть используемы для построения рекуперирующих ДСПЧ. При этом отметим следующее. Режим ШИМ позволяет подавлять в спектре сетевого тока низкочастотные составляющие, в частности 5,7 и т.д. гармоники. В этих условиях открывается возможность упрощения конструкции сетевого трансформатора, выполняемого без использования комбинации схем соединения вторичных обмоток «звезда-треугольник» (см. рис.1).

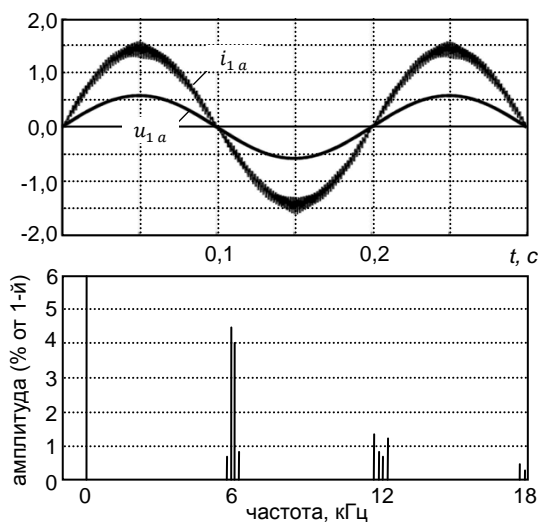


Рис.7. Временные диаграммы напряжений и токов в узле управляемых выпрямителей и гармонический состав сетевого тока ДСПЧ в системе с ШИМ

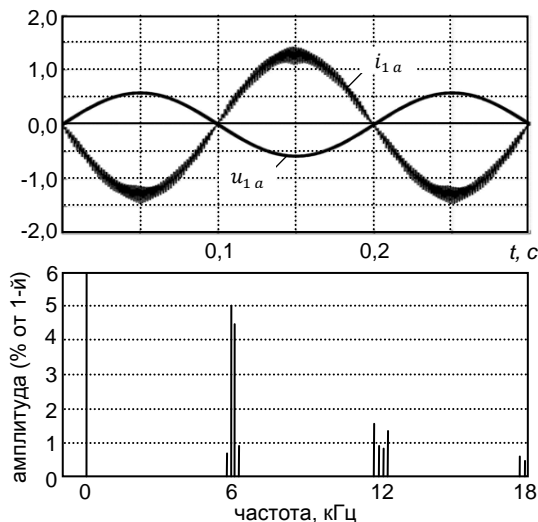


Рис.8. Временные диаграммы напряжений и токов в узле управляемых выпрямителей и гармонический состав сетевого тока ДСПЧ в системе с ШИМ в режиме рекуперации

Отметим также, что автономные инверторы ДСПЧ по отношению к цепи нагрузки включены последовательно и обтекаются общим током нагрузки, что обуславливает описанную в [2] модернизацию опорных сигналов ШИМ. В отличие от этого активные выпрямители ДСПЧ по отношению к питающей сети включены параллельно и токи его каналов суммируются. В этих условиях допустимо стандартное построение узлов ШИМ с использованием симметричных опорных сигналов. Вместе с тем, топология ДСПЧ содержит дополнительную возможность улучшения качества потребляемого тока за счет временного сдвига симметричных пилообразных опорных сигналов в каналах выпрямителя. Качество потребляемого тока при двукратном обновлении дискретных управляющих воздействий иллюстрируется результатами моделирования, приведенными на рис.7 при $f_{оп} = 3$ кГц.

Как видно, форма токов незначительно отличается от синусоидальной (коэффициент высших гармоник в двигательном и тормозном

режимах электропривода не превышает 7%). Потребление реактивной мощности в этих режимах практически отсутствует.

Приведенные материалы свидетельствуют о том, что топология ДСПЧ позволяет строить энергоэффективные системы электроприводов переменного тока с высоким качеством потребления и рекуперации электроэнергии и возможностью реализации различных вариантов построения систем управления в зависимости от параметров силовых ключей преобразователей и конкретных требований, предъявляемых к электроприводу, как потребителю электроэнергии и источнику механического движения в технологических процессах.

Библиографический список

1. Пронин М.В. Силовые полностью управляемые полупроводниковые преобразователи (моделирование и расчет). / М.В. Пронин, А.Г. Воронцов. Под ред. Крутякова Е.А. Санкт-Петербург, «Электросила», 2003. 172 с.

2. Шрейнер Р.Т. Электропривод переменного тока с двухсекционным инвертором напряжения / Шрейнер Р.Т., Костылев А.В., Шилин С.И. // Труды VII Международной (XVIII Всероссийской) конференции по автоматизированному электроприводу АЭП-2012, Иваново, ИЭГУ, 2012, С. 345-350

3. Шрейнер Р.Т. Развитие высоковольтных каскадных преобразователей частоты для электропривода / Шрейнер Р.Т., Кривовяз В.К., Калыгин А.И. // Труды V Международной (XVI Всероссийской) конференции по автоматизированному электроприводу АЭП-2007, Санкт-Петербург, 18-21 сентября, 2007. С.186-189.

4. Зиновьев Г.С. Основы силовой электроники, 4-е издание: монография / Г. С. Зиновьев, Новосибирск, НГТУ, 2009. 672 с.

5. José R. Espinoza, Géza Joós, Johan I. Guzmán, Luis A. Morán, Rolando P. Burgos Selective Harmonic Elimination and Current/Voltage Control in Current/Voltage-Source Topologies: A Unified Approach // IEEE Trans. On Industrial Electronics, Vol. 48, №. 1, Feb. 2001, PP.71-81.

6. H.R.Karshenas, H.A.Kojori, S.B.Dewan Generalized Techniques of Selective Harmonic Elimination and Current Control in Current Source Inverters/Converters // IEEE Tran. Power Electronics, Vol.10, №5, Sept. 1995.

7. Шрейнер Р.Т. Построение высоковольтных рекуперующих каскадных непосредственных преобразователей частоты для электропривода / Р.Т. Шрейнер, А.И. Калыгин, В.К. Кривовяз // Электротехника №9, 2012, С. 8-13.

8. Шрейнер Р.Т. Математическое моделирование электроприводов переменного тока с полупроводниковыми преобразователями частоты./ Р.Т. Шрейнер, Екатеринбург: УРО РАН, 2000. 654 с.

Сведения об авторах

Шрейнер Рудольф Теодорович, ЗАО «Автоматизированные системы и комплексы», г.Екатеринбург доктор технических наук, профессор, заведующий сектором, телефон +7 (343) 360 05 01 e-mail: r_sreiner@mail.ru

Кривовяз Владимир Константинович, ЗАО «Автоматизированные системы и комплексы», г. Екатеринбург, кандидат технических наук, первый заместитель генерального директора, телефон +7 (343) 360 05 01, e-mail: kvk @asc-ural.ru

Костылев Алексей Васильевич, ФГАОУ ВПО «УрФУ имени первого Президента России Б.Н.Ельцина» кандидат технических наук, доцент, доцент кафедры ЭАПУ, тел. +7 (343) 375 46 46 e-mail: a.v.kostylev@urfu.ru

Шилин Сергей Иванович, ЗАО «Автоматизированные системы и комплексы», г. Екатеринбург кандидат технических наук, доцент, начальник научно-инженерного центра, тел. +7 (343) 360 05 01 e-mail: shilin@asc-ural.ru

УДК 62-83:004

Имитационное моделирование систем векторного управления асинхронным электроприводом

Федотов И.М., инженер, Хитров А.И., к.т.н., доцент

Представлены разработанные имитационные модели систем векторного управления асинхронным электроприводом и результаты моделирования динамических процессов на моделях.

Ключевые слова: имитационное моделирование, Simulink, векторное управление, прямое управление моментом, асинхронный электропривод.

Simulation modeling of vector controlsystems of asynchronous electric drives