

СИСТЕМА ВЕКТОРНОГО УПРАВЛЕНИЯ АСИНХРОННЫМ ЭЛЕКТРОПРИВОДОМ БЕЗ ДАТЧИКА НА ВАЛУ ДВИГАТЕЛЯ

Р.Т. Шрейнер, А.И. Калыгин, В.К. Кривовяз, С.И. Шилин
(г.Екатеринбург, ЗАО «Автоматизированные системы и комплексы»)

Аннотация. Доклад посвящен вопросу построения бездатчиковой системы векторного управления асинхронным электроприводом. Рассмотрены недостатки общепринятого метода вычисления вектора потокосцепления ротора на основе информации об ЭДС ротора. Предложен комбинированный способ, включающий также вычисление потокосцепления на основе измерения тока статора. Представлены результаты экспериментальных исследований.

Abstract. The paper concerns a problem of design of sensorless adjustable speed asynchronous drive. The limitations of a widely used way of rotor flux estimation based on information about rotor back-emf are analysed. A combined approach which also includes flux estimation on stator currents is proposed. The results of experiment are presented.

Одним из путей повышения надежности систем регулируемых электроприводов переменного тока, их конструктивного упрощения и снижения стоимости является исключение датчика скорости вращения ротора. Решение данной задачи особенно актуально для электроприводов механизмов, работающих в условиях тяжелых атмосферных воздействий, повышенных вибраций и других неблагоприятных факторов. В ряде случаев установка датчика скорости на валу оказывается просто невозможной. В этих случаях в систему автоматического регулирования вводится наблюдатель состояния, определяющий скорость вращения ротора электродвигателя на основе решения полной системы уравнений, описывающих электромагнитное состояние цепей статора и ротора по доступной информации о напряжениях и токах статора. Важной функцией наблюдателя является также определение координат вектора потокосцепления ротора двигателя, что необходимо для реализации высококачественных систем векторного регулирования электромагнитных переменных двигателя в системе координат, ориентированной по полю ротора.

На сегодняшний день все ведущие производители преобразовательной техники реализуют в своей продукции возможность регулирования скорости вращения ротора с помощью бездатчиковых алгоритмов. При этом для систем асинхронного электропривода заявляется точность поддержания заданной скорости на уровне 10% от номинального скольжения [1], [2]. Из опыта эксплуатации диапазон регулирования скорости составляет порядка 1:10, при полосе пропускания контура скорости 5-7Гц. Подобные характеристики оказываются далеко не всегда удовлетворительными даже для систем общепромышленных электроприводов. В большинстве случаев производители вообще не указывают в технической документации ни диапазон регулирования скорости, ни полосу пропускания. Таким образом, задача дальнейшего развития и совершенствования алгоритмов бездатчикового управления сохраняет свою актуальность.

Обобщенная структура системы автоматического регулирования (САР) скорости современных промышленно-выпускаемых систем электроприводов с подчиненным регулированием электромагнитного момента представлена на рис.1. САР электромагнитного момента двигателя строятся на основе различных принципов и технических решений:

- косвенного регулирования электромагнитного момента за счет регулирования токов статора и потокосцеплений обмоток двигателя;

- прямого регулирования электромагнитного момента по отклонению фактического значения момента m , вычисляемого по модели АД, от заданного значения m^* .

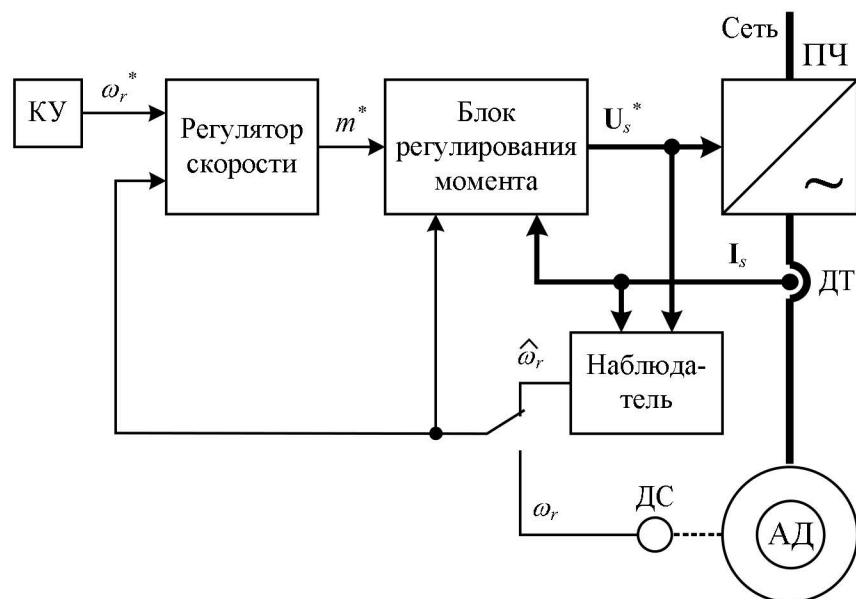


Рис. 1. Обобщенная структура САР скорости с подчиненным регулированием электромагнитного момента

Основная проблема, связанная с построением бездатчиковых систем заключается в том, что реализуемые сегодня наблюдатели состояния способны обеспечить приемлемую точность вычисления потокосцепления и скорости только в ограниченном низу диапазоне частот вследствие [3] изменения параметров электропривода в процессе работы, ошибок при оценке эквивалентных значений токов и напряжений статора на интервале расчета процессов, вызываемых «мертвым временем», а также падениями напряжений на силовых полупроводниковых вентилях преобразователей частоты.

Влияние названных факторов оказывается тем существенней, чем ниже частота, а, следовательно, и питающее напряжение, поскольку в этом случае увеличиваются относительные доли и вес ошибок, как вычисления падений напряжений на активных сопротивлениях, так и от различий между заданными и фактическими напряжениями статора, вызванных реальными процессами коммутации.

В докладе рассматривается бездатчиковая система векторного управления асинхронным электроприводом. САР скорости вращения ротора построена на основе принципов подчиненного регулирования электромагнитных переменных во вращающейся системе координат с ориентацией по потокосцеплению ротора. Структурная схема САР применительно к типовой схеме преобразователя частоты на основе автономного инвертора напряжения с ШИМ представлена на рис.2. На этом рисунке РС – регулятор скорости; ФЗМ – фильтр задания момента, служит для ограничения темпа изменения электромагнитного момента в динамических режимах привода; РМиП – регулятор момента и потокосцепления, формирует желаемое электромагнитное состояние двигателя; РТ – регулятор токов статора; ФКФ – формирователь вектора эталонных непрерывных коммутационных функций инвертора; ПККФ – преобразователь координат вектора коммутационных функций; БК – блок компенсации, корректирует значения коммутационных функций с учетом мертвого времени коммутации и падения напряжения на силовых ключах; ПКТ – преобразователь координат токов; ВП – вычислитель потока;

БО – блок ориентации, выполняет автоматическую ориентацию САР по вектору потоко- сцепления ротора, вычисляет скорость вращения ротора АД; ФС – фильтр скорости.

В данной структуре использован принцип автоматической ориентации системы координат по вектору потоко- сцепления ротора, описанный в [4]. При этом сигнал скорости формируется ориентирующим регулятором с учетом заданного скольжения. Пред- думотрена компенсация углового запаздывания $\omega_k \Delta T / 2$, вызванного квантованием по времени цифровой САР.

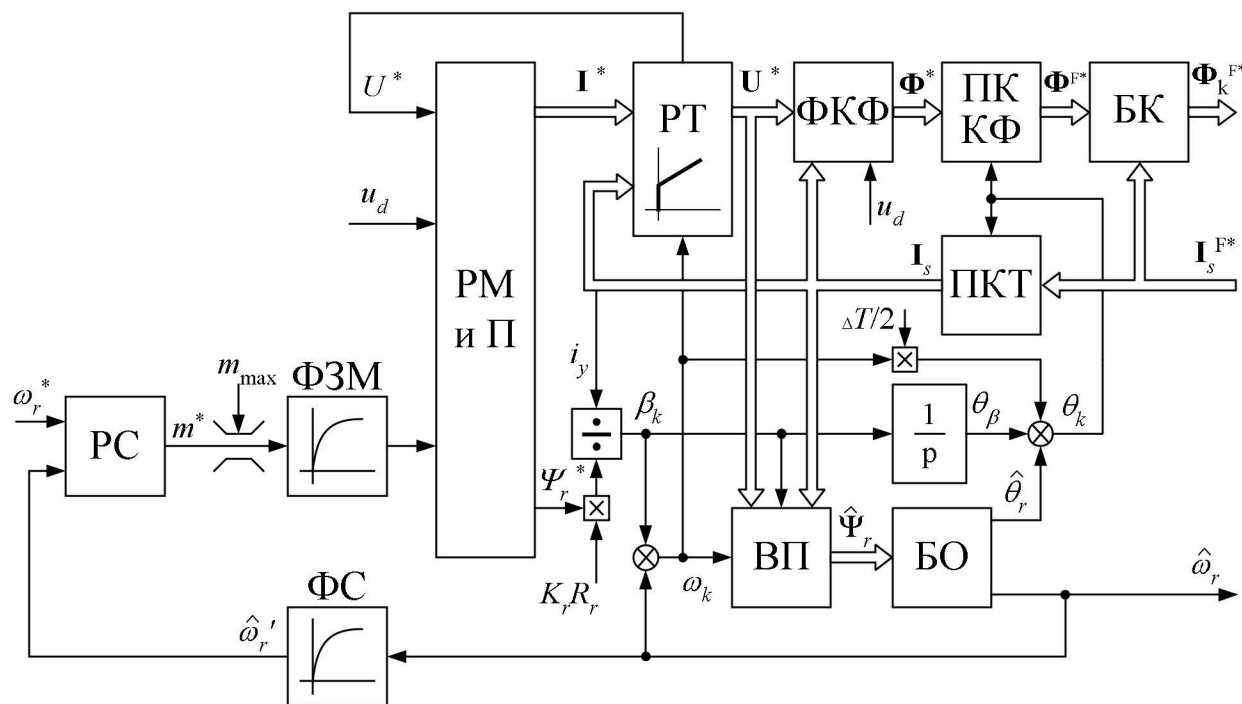


Рис. 2. Структурная схема бездатчиковой САР скорости асинхронного электропривода

Из анализа уравнений математической модели АД следует, что вектор потоко- сцепления ротора может быть вычислен двумя способами:

- по ЭДС, наведенной магнитным полем ротора;
- по токам статора.

В существующих бездатчиковых системах частотного управления в основном используется алгоритмически более простой первый способ. Однако, он характеризуется относительно большими ошибками вычисления ЭДС при низких скоростях вращения ротора, когда величина ЭДС мала. При этом оказываются существенно значимыми погрешности, обусловленные неидеальностями каналов измерения напряжений и токов, а также неадекватностью параметров модели в структуре наблюдателя и параметров реального двигателя. Кроме того, при нулевой частоте напряжения статора вычисление потоко- сцепления ротора данным способом оказывается принципиально невозможным. В связи с этим реальные системы дополняются различными устройствами сохраняющими работоспособность электропривода при частотах близких к нулевой, при снижении качества регулирования.

В отличие от ЭДС, ток статора АД при частотном управлении изменяется в меньшем диапазоне и зависит главным образом от нагрузки двигателя. Однако, вычисление потока с помощью токовой модели требует информации о величине скольжения ротора двигателя. Поэтому в бездатчиковых системах данный способ оказывается ре-

ально применимым при нулевой скорости и при скоростях вращения ротора, близких к нулевой.

В связи с изложенным представляется рациональным комбинированный (двух-канальный) вариант вычислителя, позволяющий эффективно использовать достоинства и частично компенсировать недостатки обоих способов косвенного определения вектора потокосцепления и скорости вращения ротора. Структурная схема такого вычислителя представлена на рис.3.

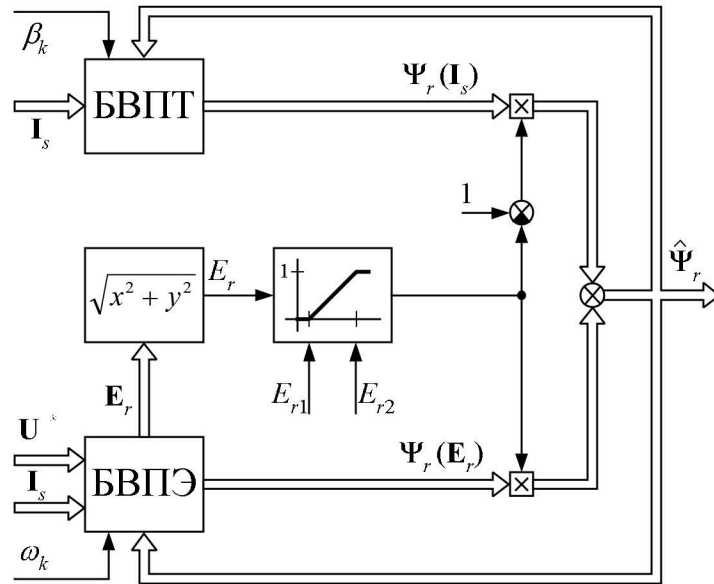


Рис. 3. Структурная схема вычислителя потокосцепления ротора

В схеме предусмотрены: блок вычисления потокосцепления ротора по току статора (БВПТ), блок вычисления потокосцепления ротора по ЭДС (БВПЭ) ротора и узел, осуществляющий весовое смешение результатов расчетов $\Psi_r(I_s)$ и $\Psi_r(E_r)$ в функции модуля ЭДС ротора E_r по следующему алгоритму:

$$\hat{\Psi}_r = \begin{cases} \Psi_r(I_s), & E_r \leq E_{r1} \\ \frac{E_r - E_{r1}}{E_{r2} - E_{r1}} \cdot \Psi_r(I_s) + \frac{E_{r2} - E_r}{E_{r2} - E_{r1}} \Psi_r(E_r), & E_r < E_r < E_{r2} \\ \Psi_r(E_r), & E_r \geq E_{r2} \end{cases}$$

Таким образом, при малых значениях ЭДС ротора ($E_r \leq E_{r1}$, при малых частотах питающего напряжения), когда ошибки вычисления ЭДС оказывают существенное влияние на результат вычисления потокосцепления, для его расчета используется токовая модель. В области малых относительных ошибок вычисления ЭДС ($E_r \geq E_{r2}$) расчет потокосцепления выполняется по ЭДС ротора. Введена также «переходная» зона $E_r < E_r < E_{r2}$, в которой результат вычисления потокосцепления $\hat{\Psi}_r$ получается путем смешивания результатов двух расчетов в функции величины ЭДС ротора. Полученный результат используется в качестве начальных условий на следующем интервале интегрирования в каналах вычисления $\Psi_r(E_r)$ и $\Psi_r(I_s)$.

Данный вычислитель обеспечивает улучшенное качество регулирования в широком диапазоне скоростей и нагрузок, включая режим упора электродвигателя.

Экспериментальные исследования бездатчиковой САР скорости с двухканальным вычислителем вектора потокосцепления ротора были проведены на макете асинхронного электропривода, силовая схема которого изображена на рис.4. Питание электродвигателя (мощность 4кВт) осуществлялось от двухзвенного непосредственного преобразователя частоты [5]. Микропроцессорная система управления (МПСУ) реализована на базе микроконтроллера фирмы Texas Instruments TMS320LF2407A, при следующих параметрах: тактовая частота 40МГц; частота ШИМ 2,5кГц, с однократным обновлением; «мертвое время» коммутации силовых ключей – 3мкс.

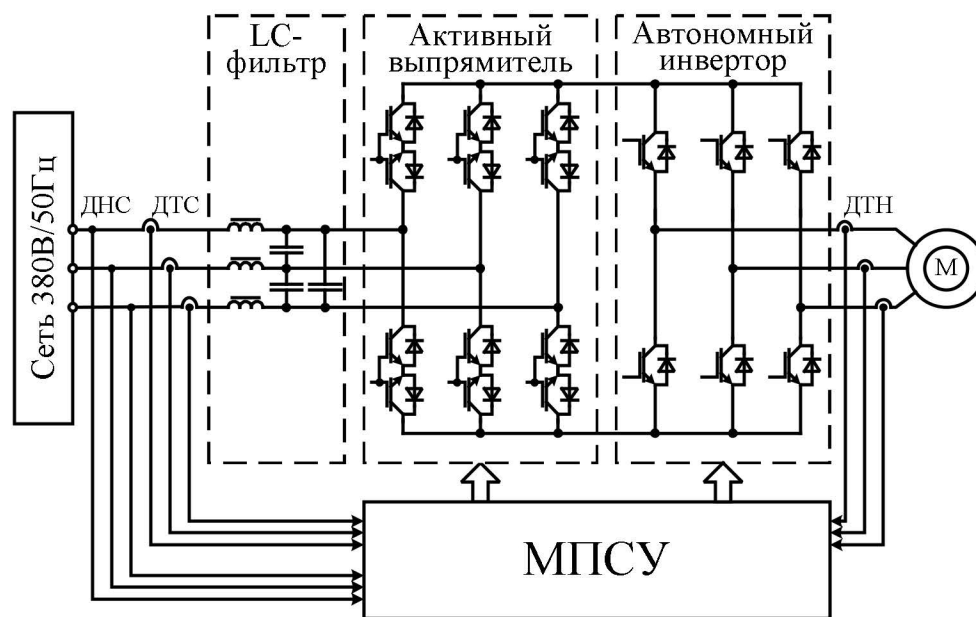


Рис. 4. Силовая часть асинхронного электропривода

Исследовались динамические и статические режимы работы на холостом ходу и при реактивном моменте сопротивления на валу АД при поддержании постоянства потокосцепления ротора. Результаты представлены осциллограммами (рис.5-7), где: i_{sx} – намагничивающая составляющая тока статора АД; i_{sy} – моментобразующая составляющая тока статора АД; ω_r – фактическая скорость вращения ротора; $\hat{\omega}_r$ – вычисленная скорость.

Рис.5, 6 иллюстрируют процессы работы электропривода на холостом ходу. Максимальный динамический момент двигателя, при этом, составил 60% от номинального.

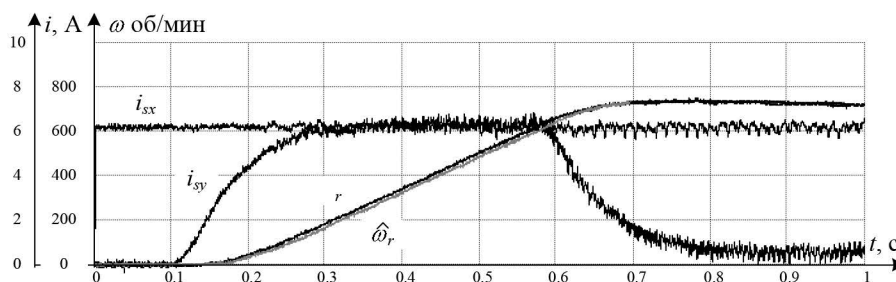


Рис. 5. Пуск АД на холостом ходу

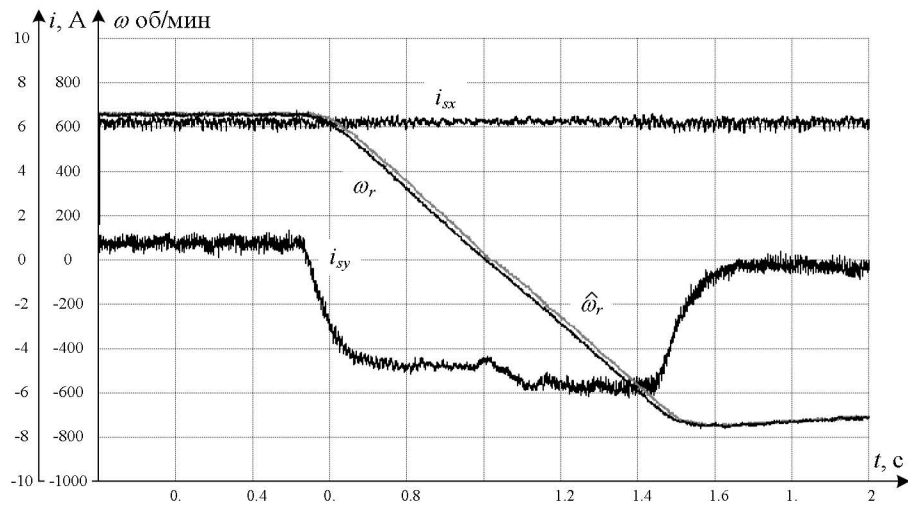


Рис. 6. Реверс АД на холостом ходу

На рис.7 показаны осциллограммы работы электропривода в установившемся режиме при малой скорости вращений (15 об/мин, что составляет 1% от номинальной синхронной скорости) при номинальном моменте нагрузки на валу.

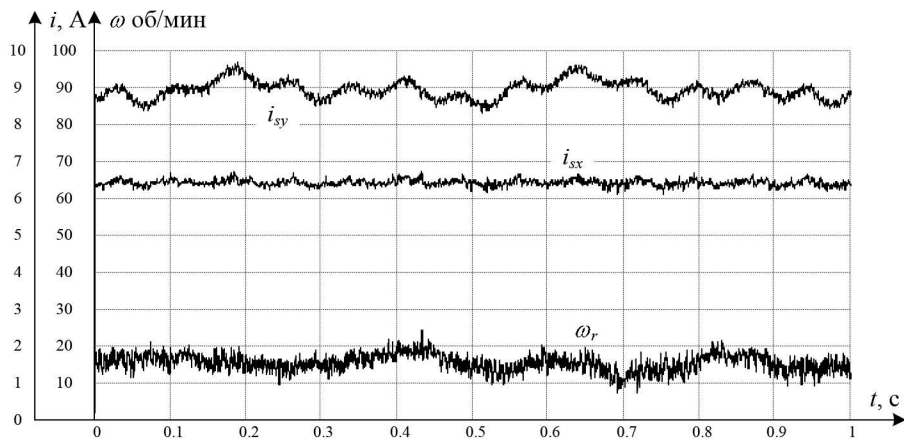


Рис. 7. Установившийся режим: заданная скорость 15 об/мин (0,5Гц), момент сопротивления на валу АД 100%

Проведенный теоретический анализ и экспериментальные исследования на лабораторном макете позволяют сделать вывод о возможности улучшения характеристик и расширения диапазона регулирования скорости асинхронного двигателя в сравнении с существующими аналогами путем применения двухканального вычислителя потокосцепления ротора.

Приведенные выше результаты получены при вычислении потокосцепления на основе информации о заданном напряжении с косвенным учетом падения напряжения на силовых ключах и «мертвого» времени. Дальнейшее улучшение качества наблюдателя и, соответственно, расширения диапазона и повышения быстродействия САР скорости может быть достигнуто на основе повышения точности информации о фактическом напряжении на зажимах статора АД.

- [1] Aaltonen M., Tiintinen P., Lalu J., Heikkila S. Direct Torque Control of AC Motor Drives // ABB Review. 1995. No 3. p. 19-24.
- [2] Каталог ACS800. Программные средства и дополнительное оборудование. (3AFE 64589075 REV E RU) 15.01.2004.
- [3] Виноградов А.Б. Векторное управление электроприводами переменного тока / ГОУВПО «Ивановский государственный энергетический университет имени В.И. Ленина». – Иваново, 2008. – 298 с.
- [4] Шрейнер Р.Т. Математическое моделирование электроприводов переменного тока с полупроводниковыми преобразователями частоты. Екатеринбург: УрО РАН, 2000. 654с. ISBN 5-7691-1111-9
- [5] Шрейнер Р.Т., Кривовяз В.К., Калыгин А.И. Управление непосредственными преобразователями частоты с ШИМ в системах электроприводов переменного тока // Электричество, 2007. №5 с.26-37.



Рудольф Теодорович Шрейнер, д.т.н., профессор Российского государственного профессионально-педагогического университета, г.Екатеринбург. Окончил в 1960г. Уральский политехнический институт. В 1991г. защитил в Московском энергетическом институте докторскую диссертацию на тему «Асинхронные электроприводы с полупроводниковыми преобразователями частоты» Автор более 350 статей и 6 монографий. e-mail: r_shreiner@mail.ru



Андрей Игоревич Калыгин, к.т.н., ведущий инженер ЗАО «Автоматизированные системы и комплексы», г.Екатеринбург. Окончил Новоуральский государственный технологический институт в 1997г. В 2000 году защитил в Государственном университете аэрокосмического приборостроения, г.С-Петербург кандидатскую диссертацию на тему «Энергосберегающий синхронно-гистерезисный электропривод». e-mail: a.kalygin@mail.ru



Владимир Константинович Кривовяз, к.т.н., технический директор ЗАО «Автоматизированные системы и комплексы», г.Екатеринбург. Окончил электротехнический факультет Уральского политехнического института в 1980г. В 2005 году защитил кандидатскую диссертацию на тему «Регулируемый электропривод переменного тока на базе двухзвенного непосредственного преобразователя частоты с координатной стратегией управления». e-mail: kvk@asc-ural.ru



Сергей Иванович Шилин, к.т.н., начальник отдела электропривода ЗАО «Автоматизированные системы и комплексы», г.Екатеринбург. Окончил Уральский политехнический институт в 1981 году. В 1996 г. защитил в Уральском политехническом институте кандидатскую диссертацию на тему «Цифровая система управления скоростью асинхронного электропривода с тиристорным преобразователем напряжения». e-mail: shilin@asc-ural.ru