

Министерство науки и высшего образования Российской Федерации

**Федеральное государственное бюджетное
образовательное учреждение высшего образования
«Тульский государственный университет»**

**16+
ISSN 2071-6168**

**ИЗВЕСТИЯ
ТУЛЬСКОГО ГОСУДАРСТВЕННОГО
УНИВЕРСИТЕТА**

ТЕХНИЧЕСКИЕ НАУКИ

Выпуск 4

**Тула
Издательство ТулГУ
2023**

Председатель редакционного совета

Кравченко О.А., д-р техн. наук.

Первый заместитель председателя редакционного совета

Воротилин М.С., д-р техн. наук.

Заместитель председателя редакционного совета

Прейс В.В., д-р техн. наук, авторизованный представитель Издательства ТулГУ в РИНЦ.

Ответственный секретарь редакционного совета

Моргунова Е.В., авторизованный представитель ТулГУ в РИНЦ.

Члены редакционного совета:

Батанина И.А., д-р полит. наук, –

гл. редактор серии «Гуманитарные науки»;

Берестнев М.А., канд. юрид. наук, –

гл. редактор серии «Экономические и юридические науки»;

Борискин О.И., д-р техн. наук, –

гл. редактор серии «Технические науки»;

Егоров В.Н., канд. пед. наук, –

гл. редактор серии «Физическая культура. Спорт»;

Заславская О.В., д-р пед. наук, –

гл. редактор серии «Педагогика»;

Качурин Н.М., д-р техн. наук, –

гл. редактор серии «Науки о Земле»;

Понаморева О.Н., д-р хим. наук, –

гл. редактор серии «Естественные науки».

РЕДАКЦИОННАЯ КОЛЛЕГИЯ:

Главный редактор

Борискин О.И., д-р техн. наук (ТулГУ, г. Тула).

Заместитель главного редактора

Ларин С.Н., д-р техн. наук (ТулГУ, г. Тула).

Ответственный секретарь

Яковлев Б.С., канд. техн. наук (ТулГУ, г. Тула).

Авторизованный представитель ТулГУ в РИНЦ

Журин А.В., канд. техн. наук (ТулГУ, г. Тула).

Члены редакционной коллегии:

Агуреев И.Е., д-р техн. наук (ТулГУ, г. Тула);

Анцев А.В., д-р техн. наук (ТулГУ, г. Тула);

Анцев В.Ю., д-р техн. наук (ТулГУ, г. Тула);

Бабкин А.С., д-р техн. наук (ЛГТУ, г. Липецк);

Бабокин Г.И., д-р техн. наук (Российский химико-технологический университет им. Д.И. Менделеева, г. Москва);

Вальтер А.И., д-р техн. наук (ТулГУ, г. Тула);

Вартамов М.В., д-р техн. наук (Московский политехнический университет, г. Москва);

Васин С.А., д-р техн. наук (ТулГУ, г. Тула);

Волгин В.М., д-р техн. наук (ТулГУ, г. Тула);

Гринчар Н.Г., д-р техн. наук (Российский университет транспорта (МИИТ), г. Москва);

Дикусар А.И., чл.-корр. АН Молдовы, д-р хим. наук (Институт прикладной физики АН Молдовы, г. Кишинев);

Добровольский Н.М., д-р физ.-мат. наук (ТППУ, г. Тула);

Жулай В.А., д-р техн. наук (Воронежский государственный технический университет, г. Воронеж);

Запонец Я., д-р техн. наук (Технический университет Острavy, Чехия, г. Острава);

Золотухин В.И., д-р техн. наук (ТулГУ, НПП «Вулкан-ТМ», г. Тула);

Крюков В.А., д-р техн. наук (ТулГУ, г. Тула);

Куц В.В., д-р техн. наук (Юго-Западный государственный университет, г. Курск);

Лавриненко В.Ю., д-р техн. наук (МГТУ им. Н.Э. Баумана, г. Москва);

Ивахненко А.Г., д-р техн. наук (Юго-Западный государственный университет, г. Курск);

Колтунович Т.Н., д-р техн. наук (Люблинский технологический университет, Польша, г. Люблин);

Коновалов А.В., д-р техн. наук (МГТУ им. Н.Э. Баумана, г. Москва);

Костров Б.В., д-р техн. наук (Рязанский государственный радиотехнический университет им. В.Ф. Уткина, г. Рязань);

Ларкин Е.В., д-р техн. наук (ТулГУ, г. Тула);

Мещеряков В.Н., д-р техн. наук (Липецкий государственный технический университет (ЛГТУ), г. Липецк);

Мозжечков В.А., д-р техн. наук (АО «Тулаэлектроривод», г. Тула);

Романович А.А., д-р техн. наук (Белгородский государственный технологический университет им. В.Г. Шухова, г. Белгород);

Савин Л.А., д-р техн. наук (Орловский государственный университет имени И.С. Тургенева, г. Орёл);

Степанов В.М., д-р техн. наук (ТулГУ, г. Тула);

Сычугов А.А., д-р техн. наук (ТулГУ, г. Тула);

Титов В.С., д-р техн. наук (Юго-Западный государственный университет, г. Курск);

Трегубов В.И., д-р техн. наук (АО «НПО «СПЛАВ» им. А.Н. Ганичева, г. Тула);

Черняев А.В., д-р техн. наук (ТулГУ, г. Тула);

Шолохов М.А., д-р техн. наук (УрФУ имени первого Президента России Б.Н. Ельцина, г. Екатеринбург);

Юдин С.В., д-р техн. наук (Российский экономический университет им. Г.В. Плеханова, Тульский филиал, г. Тула);

Яцун С.Ф., д-р техн. наук (Юго-Западный государственный университет, г. Курск).

Сборник зарегистрирован в Федеральной службе по надзору в сфере связи, информационных технологий и массовых коммуникаций (Роскомнадзор). ПИ № ФС77-75986 от 19 июня 2019 г.

Подписной индекс сборника 27851 по Объединённому каталогу «Пресса России».

Сборник включен в Перечень рецензируемых научных изданий, в которых должны быть опубликованы научные результаты диссертаций на соискание учёной степени кандидата наук, на соискание учёной степени доктора наук, утвержденный ВАК Минобрнауки РФ, по следующим научным специальностям:

- 2.3.1 Системный анализ, управление и обработка информации (технические науки);
- 2.3.3 Автоматизация и управление технологическими процессами и производствами (технические науки);
- 2.3.5 Математическое и программное обеспечение вычислительных систем, комплексов и компьютерных сетей (технические науки);
- 2.4.2 Электротехнические комплексы и системы (технические науки);
- 2.5.2 Машиноведение (технические науки);
- 2.5.5 Технология и оборудование механической и физико-технической обработки (технические науки);
- 2.5.6 Технология машиностроения (технические науки);
- 2.5.7 Технологии и машины обработки давлением (технические науки);
- 2.5.8 Сварка, родственные процессы и технологии (технические науки);
- 2.5.11 Наземные транспортно-технологические средства и комплексы (технические науки);
- 2.5.21 Машины, агрегаты и технологические процессы (технические науки);
- 2.5.22 Управление качеством продукции. Стандартизация. Организация производства (технические науки).

АВТОМАТИЗАЦИЯ И УПРАВЛЕНИЕ ТЕХНОЛОГИЧЕСКИМИ ПРОЦЕССАМИ И ПРОИЗВОДСТВАМИ

УДК 681.51

DOI: 10.24412/2071-6168-2023-4-614-624

СПОСОБ ПОСТРОЕНИЯ СИСТЕМЫ АВТОУПРАВЛЕНИЯ ПЕРЕМЕННОЙ СТРУКТУРЫ ДЛЯ ЧАСТОТНО-РЕГУЛИРУЕМОГО СИНХРОННОГО ЭЛЕКТРОПРИВОДА

В.Ю. Островляничик, Н.С. Зайцев, В.А. Кубарев, Е.С. Кузнецова, Д.Е. Модзелевский

В статье предлагается способ построения системы автоуправления (САУ) с переменной структурой частотно-регулируемого (ЧР) электропривода (ЭП), основой которого выступает синхронная машина классической конструкции. Способ основывается на расчете и определенном задании в зависимости от нагрузки угла между пространственными векторами потокоцепления обмоток статора и тока, протекающего в них. Проводится математическое и имитационное моделирование САУ синхронного ЭП с векторным управлением. Результаты данной работы могут быть использованы при проектировании систем автоуправления частотно-регулируемого синхронного двигателя (СД) с полеориентированным управлением (ПОУ).

Ключевые слова: система автоуправления, переменная структура, синхронный электропривод, векторное управление, электромагнитный момент, закон управления магнитным полем, потокоцепление статора, потокоцепление рассеяния.

Введение. Коренные успехи в области силовой электроники конца предыдущего столетия, обусловившие создание и бурное развитие полностью управляемых мощных электронных ключей, входящих в состав более совершенных в техническом плане двухзвенных преобразователей частоты (ДПЧ), позволили перейти от относительно легко регулируемого, но несовершенного в конструктивном плане (наличие щеточно-коллекторного узла (ЩКУ), завышенные массогабаритные показатели, высокий момент инерции и др.) ЭП постоянного тока к более оптимальным регулируемым электромеханическим системам (ЭМС) переменного тока [1, 2].

В настоящее время в отечественной и зарубежной промышленности подавляющее большинство новых и реконструируемых регулируемых ЭП строятся на основе машин переменного тока с ЧР [3, 4]. Классическими ЭМС, применяемыми для различного технологического оборудования малой и средней мощности, стали системы – «Преобразователь частоты – асинхронный двигатель» и «Преобразователь частоты – синхронный двигатель с постоянными магнитами» [4 – 6]. Широкая распространенность данных систем обусловлена их оптимальными технико-экономическими показателями, в связи с чем изучению и решению проблем первых уделяется крайне много исследовательского внимания как в отечественной, так и в зарубежной научно-технической литературе.

Иным образом обстоит ситуация в области ответственных приводов большой мощности (от единиц до десятков МВт), где до недавнего времени, особенно в отечественной промышленности, в подавляющем большинстве случаев использовалась ЭМС постоянного тока – «Тиристорный преобразователь – двигатель» (ТП-Д) [7 – 9]. В начале XXI века в зарубежной и российской практике в рассматриваемой области наметилась тенденция перехода от несколько морально устаревшей системы ТП-Д к более совершенному ЭП, построенному по схеме «Преобразователь частоты – синхронный двигатель с электромагнитным возбуждением» (ПЧ-СД) [5, 10, 11]. Данная система в сравнении со схемой ТП-Д имеет лучшие динамические и статические показатели качества, меньший момент инерции и возможность глубокого наращивания мощности машины, ввиду отсутствия ЩКУ в главной силовой цепи [10, 12, 13], а в сравнении с другими ЭМС переменного тока – наилучшие энергетические показатели [10]. Несмотря на указанные достоинства системы ПЧ-СД и ее непрерывно возрастающее распространение, она оказывается наименее изученной в сравнении с другими традиционными частотно-регулируемыми ЭП [14]. Более того, как показывает отечественная практика, устанавливаемые зарубежные регулируемые синхронные приводы могут иметь ряд проблем, сказывающиеся на производительности и простотах технологического оборудования [15 – 17].

Проблемы, возникающие в синхронном электроприводе, относительно низкий уровень научно-технической базы в сравнении с иными ЭМС и в то же время увеличивающаяся их распространенность, а также широкие перспективы развития, регулируемого синхронного ЭП большой мощности делает актуальным проведение исследований в области совершенствования его систем автоматического управления.

Настоящая работа посвящена частотно-регулируемому синхронному ЭП с векторным (поле-ориентированным) управлением. Предлагается к рассмотрению новый подход к построению САУ с переменной структурой, обладающий относительно простой программной реализацией и требующий минимального изменения структуры динамических звеньев.

Общие сведения. Для высокопроизводительных и ответственных механизмов, привод которых основан на ЧР СД с обмоткой возбуждения (ОВ), как правило, используются два метода регулирования – векторное управление и прямое управление моментом [18, 19]. В основе ПОУ лежит идея о регулировании координат машины переменного тока подобно тому, как это происходит в двигателях постоянного тока (ДПТ) с независимым возбуждением. Такая аналогия достигается за счет реализации независимого управления координатами тока, протекающего в обмотках статора, и потокосцепления магнитного поля машины при ортогональности векторов данных величин [5]. При выполнении указанных условий устанавливается прямо пропорциональная зависимость между электромагнитным (ЭМ) моментом и током статора. При этом принятое за базовое потокосцепление остается неизменным во всех режимах работы, кроме случаев, когда необходимо увеличивать скорость вращения ротора сверх основной.

При дальнейшем описании условимся все переменные СД и его различные конструктивные параметры за исключением постоянных времени выражать в относительных единицах (о.е.), нормируя величины, приведенные в абсолютных единицах (а.е.), относительно их базовых значений. Выбор базовых величин производится по аналогии с тем, что представлен в работе [20]. Переменные и параметры машины, выраженные в о.е., впредь будут записываться с чертой над ними, при этом для обозначения пространственных векторов переменных используется знак тильда «~». В данной работе трехфазная симметричная система АВС представляется пространственными векторами с помощью преобразований Парка и Кларка, поэтому при указании вектора той или иной величины имеется в виду вектор, ориентированный в электрическом пространстве.

Математическим основанием ПОУ, как и большинства способов регулирования машин переменного тока в целом, выступает уравнение электромагнитного момента, выраженное через требуемые регулируемые величины. Запишем два уравнения ЭМ момента $\bar{M}$ СД, выраженные через модули потокосцепления статора $\bar{\Psi}_s$ и потокосцепления рассеяния $\bar{\Psi}_\delta$:

$$\bar{M} = [\tilde{\Psi}_s \times \tilde{I}_s] = \bar{\Psi}_{sd} \bar{i}_{sq} - \bar{\Psi}_{sq} \bar{i}_{sd} = \bar{\Psi}_s \bar{I}_s \sin \alpha, \quad (1)$$

$$\bar{M} = [\tilde{\Psi}_\delta \times \tilde{I}_s] = \bar{\Psi}_{\delta d} \bar{i}_{sq} - \bar{\Psi}_{\delta q} \bar{i}_{sd} = \bar{\Psi}_\delta \bar{I}_s \sin \beta, \quad (2)$$

где $\tilde{\Psi}_s$ – вектор потокосцепления, пронизывающего фазные обмотки статора; $\tilde{I}_s$ – вектор тока, протекающего в фазных обмотках статора; $\bar{\Psi}_{sd}$ и $\bar{\Psi}_{sq}$ – проекции вектора потокосцепления статора на прямую и квадратурную ось соответственно, о.е.; $\bar{i}_{sq}$ и $\bar{i}_{sd}$ – проекции вектора тока статора на квадратурную и прямую ось соответственно, о.е.; $\bar{I}_s$ – модуль вектора тока статора, о.е.; α – угол между векторами потокосцепления статора и тока статора; $\tilde{\Psi}_\delta$ – вектор потокосцепления в воздушном зазоре (рассеяния); $\bar{\Psi}_{\delta d}$ и $\bar{\Psi}_{\delta q}$ – проекции вектора потокосцепления рассеяния на прямую и квадратурную ось соответственно, о.е.; β – угол между векторами потокосцепления в воздушном зазоре и тока статора.

Из уравнений (1) и (2) вытекают два основных способа реализации векторного управления СД. В первом случае регулирование осуществляют по магнитному полю статора за счет поддержания постоянства его потокосцепления, вектор которого перпендикулярен вектору тока статора, во втором – по магнитному полю в воздушном зазоре (основное поле машины) за счет аналогичных действий. Потокосцепление магнитного поля, за счет которого осуществляется векторное управление, называют базовым $\bar{\Psi}_\delta$. Величина данного потокосцепления не зависит от закона управления полем машины и при регулировании скорости в первой зоне всегда поддерживается на номинальном уровне. Математически условия настройки на тот или иной закон управления магнитным полем машины могут быть записаны следующим образом:

$$\begin{cases} \bar{M} = \bar{I}_s = \bar{\Psi}_\delta \bar{I}_s \sin \beta, \text{ при } \bar{\Psi}_s = \bar{\Psi}_\delta = 1 \text{ и } \alpha = \frac{\pi}{2}; \\ \bar{M} = \bar{I}_s = \bar{\Psi}_s \bar{I}_s \sin \alpha, \text{ при } \bar{\Psi}_\delta = \bar{\Psi}_\delta = 1 \text{ и } \beta = \frac{\pi}{2}. \end{cases} \quad (3)$$

Способ управления магнитным полем в соответствии с первым условием системы уравнений (3) обеспечивает оптимальные энергетические характеристики машины, исключая потребление реактивной энергии СД; позволяет наилучшим образом задействовать габаритную мощность машины и ДПЧ; имеет наиболее простую структуру САУ и, следовательно, программную реализацию, однако в то же время имеет ограниченную область применения, ввиду перенасыщения магнитной цепи машины при приложении больших ударных нагрузок. Способ, описываемый вторым условием, обладает диаметрально противоположными свойствами и, как правило, не находит самостоятельного применения [12]. В наиболее совершенных САУ осуществляют попеременное использование обоих способов управления в зависимости от прикладываемой к валу нагрузки, что позволяет сохранить производительность ЭП в области больших нагрузок, не жертвуя при этом энергоэффективностью при работе двигателя в окрестности номинального режима.

Математическое моделирование синхронной машины. Математическая модель СД удобная для синтеза так называемой «частотно-напряженческой» системы автоматического регулирования (САР) выводится на основании уравнений Парка-Горева для синхронной машины. С целью упрощения исследования в качестве объекта управления (ОУ) принимается СД, не имеющий в своем составе демпферную обмотку. Успокоительная обмотка не является обязательным конструктивным элементом частотно-регулируемых синхронных машин и в то же время ее наличие сильно усложняет математическую модель двигателя [21], что, в свою очередь, не ставится целью данной статьи. Система уравнений Парка-Горева в операторной форме, выраженная в о.е., имеет вид [13, 20]:

$$\begin{cases} \bar{u}_{sd} = \bar{R}_s \bar{i}_{sd} + p \frac{\bar{\Psi}_{sd}}{\omega_{эл.б}} - \bar{\omega}_{эл} \bar{\Psi}_{sq}; \\ \bar{u}_{sq} = \bar{R}_s \bar{i}_{sq} + p \frac{\bar{\Psi}_{sq}}{\omega_{эл.б}} + \bar{\omega}_{эл} \bar{\Psi}_{sd}; \\ \bar{U}_f = \bar{I}_f + p T_f \bar{\Psi}_f; \\ \bar{\Psi}_{sd} = \bar{L}_{sd} \bar{i}_{sd} + \bar{I}_f; \\ \bar{\Psi}_{sq} = \bar{L}_{sq} \bar{i}_{sq}; \\ \bar{\Psi}_f = \bar{I}_f + \mu \bar{L}_{sd} \bar{i}_{sd}, \end{cases} \quad (4)$$

где $\bar{u}_{sd}$ и $\bar{u}_{sq}$ – проекции вектора напряжения фазных обмоток статора на ось d и q соответственно, о.е.; $\bar{R}_s$ – активное сопротивление обмотки статора, о.е.; p – оператор дифференцирования; $\omega_{эл.б}$ – базовая скорость вращения основного магнитного поля машины, $\omega_{эл.б} = 2\pi f_n, \frac{\text{рад}}{\text{с}}$; f_n – номинальная частота синусоидального напряжения, подведенного к фазным обмоткам статора, Гц; $\bar{\omega}_{эл}$ – скорость вращающегося магнитного поля, $\bar{\omega}_{эл} = \bar{\omega}$, о.е.; $\bar{U}_f$ – напряжение на зажимах ОБ, о.е.; $\bar{I}_f$ – ток, протекающий в ОБ, о.е.; T_f – электромагнитная постоянная времени цепи ОБ, $T_f = \frac{L_f}{R_f}, \text{с}$; $\bar{\Psi}_f$ – потокосцепление, пронизывающее ОБ, о.е.; $\bar{L}_{sd}$ и $\bar{L}_{sq}$ – индуктивности обмоток статора, расположенных на d и q оси соответственно, о.е.; μ – коэффициент магнитной связи между обмоткой статора, расположенной на оси d и ОБ, $\mu = \frac{3}{2} \frac{M_{df}^2}{L_{sd} L_{sq}}$; M_{df} – коэффициент взаимной индукции между обмоткой статора на прямой оси и ОБ, Гн.

Одночлены, стоящие в конце первого и второго уравнения системы (4), образуют внутренние перекрестные обратные связи (ВПОС) по проекциям ЭДС вращения на прямую $\bar{e}_{sd}$ и квадратурную ось $\bar{e}_{sq}$:

$$\bar{e}_{sd} = \bar{\omega}_{эл} \bar{\Psi}_{sd}, \quad (5)$$

$$\bar{e}_{sq} = \bar{\omega}_{эл} \bar{\Psi}_{sq}, \quad (6)$$

$$\bar{E}_s = \sqrt{\bar{e}_{sd}^2 + \bar{e}_{sq}^2} = \sqrt{(\bar{\omega}_{эл} \bar{\Psi}_{sd})^2 + (\bar{\omega}_{эл} \bar{\Psi}_{sq})^2} = \bar{\Psi}_s \bar{\omega}_{эл}, \quad (7)$$

где $\bar{E}_s$ – модуль вектора ЭДС обмоток статора (ЭДС вращения), о.е.

Основное уравнение движения одномассовой системы электропривода, выраженное в о.е.:

$$\bar{M} - \bar{M}_c = p T_M \bar{\omega}, \quad (8)$$

где $\bar{M}_c$ – статическая нагрузка, приложенная к валу СД, о.е.; T_M – механическая постоянная времени

ЭП, $T_M = J \frac{\omega_6}{M_6}$, с; J – момент инерции ЭП, кг·м²; ω_6 – базовая скорость вращения ротора,

$\omega_6 = \frac{2\pi f}{Z_p}$, рад/с; Z_p – число пар полюсов синхронной машины; M_6 – базовый механический момент

на валу двигателя, $M_6 = \frac{P_6}{\omega_{эл.6}}$, Н·м; P_6 – базовая электромагнитная активная мощность статора

численно равная полной мощности в номинальном режиме работы, Вт.

При построении математической модели ОУ за регулируемые переменные принимаются проекции вектора тока, протекающего в фазных обмотках статора, на прямую $\bar{i}_{sd}$ и квадратурную $\bar{i}_{sq}$ ось; потокосцепление, пронизывающее ОВ $\bar{\Psi}_f$, и скорость вращения ротора $\bar{\omega}$. Входными координатами математической модели синхронного двигателя являются проекции вектора напряжения статора на прямую $\bar{u}_{sd}$ и квадратурную $\bar{u}_{sq}$ ось, а также напряжение на зажимах ОВ $\bar{U}_f$. Преобразуем систему уравнений (4) в удобный для дальнейшего синтеза САР вид в соответствии с выбранными регулируемыми и входными координатами:

$$\left\{ \begin{array}{l} \bar{i}_{sd} = \frac{1/\bar{R}_s}{1 + pT'_{sd}} \cdot \left[\bar{u}_{sd} - \frac{1}{T_f \omega_{эл.6}} \cdot (\bar{U}_f - \bar{I}_f) + \bar{\omega}_{эл} \bar{\Psi}_{sq} \right]; \\ \bar{i}_{sq} = \frac{1/\bar{R}_s}{1 + pT'_{sq}} \cdot (\bar{u}_{sq} - \bar{\omega}_{эл} \bar{\Psi}_{sd}); \\ \bar{I}_f = \bar{\Psi}_f - \mu \bar{L}_{sd} \bar{i}_{sd}; \\ \bar{\Psi}_{sd} = \bar{\Psi}_f + \bar{L}'_{sd} \bar{i}_{sd}; \\ \bar{\Psi}_{sq} = \bar{L}'_{sq} \bar{i}_{sq}; \\ \bar{\Psi}_f = \frac{1}{1 + pT_f} \cdot (\bar{U}_f + \mu \bar{L}_{sd} \bar{i}_{sd}), \end{array} \right. \quad (9)$$

где T'_{sd} – ЭМ постоянная времени обмотки статора, расположенной на оси d, в переходном режиме,

$T'_{sd} = \frac{\bar{L}'_{sd}}{\bar{R}_s}$, с; $\bar{L}'_{sd}$ – переходная индуктивность обмотки статора, расположенной на оси d,

$\bar{L}'_{sd} = \bar{L}_{sd}(1 - \mu)$, Гн; T'_{sq} – ЭМ постоянная времени обмотки статора, расположенной на оси q, в пе-

реходном режиме, $T'_{sq} = \frac{\bar{L}'_{sq}}{\bar{R}_s}$, с; $\bar{L}'_{sd}$ – переходная индуктивность обмотки статора, расположенной на

оси d, выраженная в о.е., $\bar{L}'_{sd} = \bar{L}_{sd}(1 - \mu)$.

Система уравнений (9) вместе с уравнениями (1), (5) – (8) составляют математическую модель ОУ. Структурная схема математической модели синхронной машины представлена на рис. 1.

Теоретическое описание метода построения САР с переменной структурой. СД является сложным динамическим нелинейным многомерным объектом [12]. Традиционный синтез САР в соответствии с принципом подчиненного регулирования для СД с ПОУ имеет существенные отличия от такового для ДПТ. При синтезе такой САР необходимо скомпенсировать ВПОС по проекциям ЭДС вращения, а также обеспечить функциональную связь между сигналом ЭМ момента $\bar{M}$ с сигналами проекций век-

тора тока статора $\bar{i}_{sd}$, $\bar{i}_{sq}$ и потокоцепления, пронизывающего ОВ $\bar{\Psi}_f$. Такая связь между координатами реализуется за счет внедрения в структуру САУ блоков нелинейности (БН). Совокупность БН, их общий вход, а также три независимых друг от друга выхода формируют нерегулируемый многомерный контур момента (МКМ). МКМ является ключевым звеном САУ СД с ПОУ, поскольку именно благодаря той или иной реализации нелинейных статических зависимостей происходит настройка на требуемый закон управления магнитным полем [12].

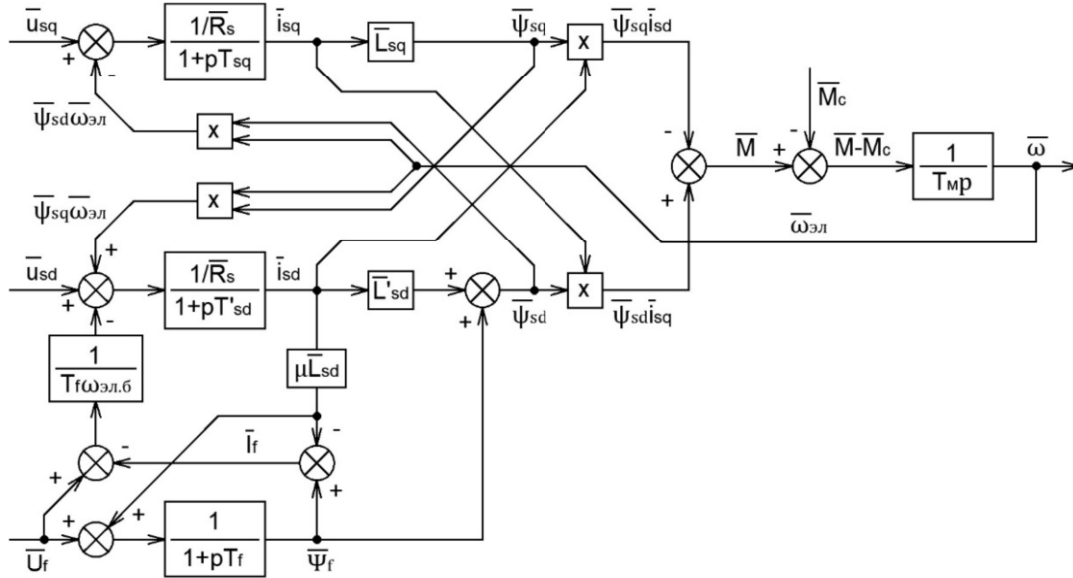


Рис. 1. Структурная схема синхронного двигателя удобная для синтеза «частотно-напряженческой» САУ

Обычно при получении формул функциональных зависимостей рассматривают частные случаи работы СД в соответствии с условиями системы уравнений (3) [12, 13]. Получив данные зависимости, можно осуществить построение САУ с переменной структурой, введя в систему обратную связь (ОС) по возмущению, в зависимости от которой будет происходить переключение между двумя комплектами БН. Данный способ усложняет структуру САУ за счет введения дополнительных звеньев и реализации переключения между ними. Способ построения САУ с переменной структурой в данной работе основан на рассмотрении работы СД в общем случае без определенного закона управления полем и выведении формул связи $\bar{i}_{sd} = f(\bar{M})$, $\bar{i}_{sq} = f(\bar{M})$, $\bar{\Psi}_f = f(\bar{M})$ для данного случая. Рассмотрим векторную диаграмму, представленную на рис. 2.

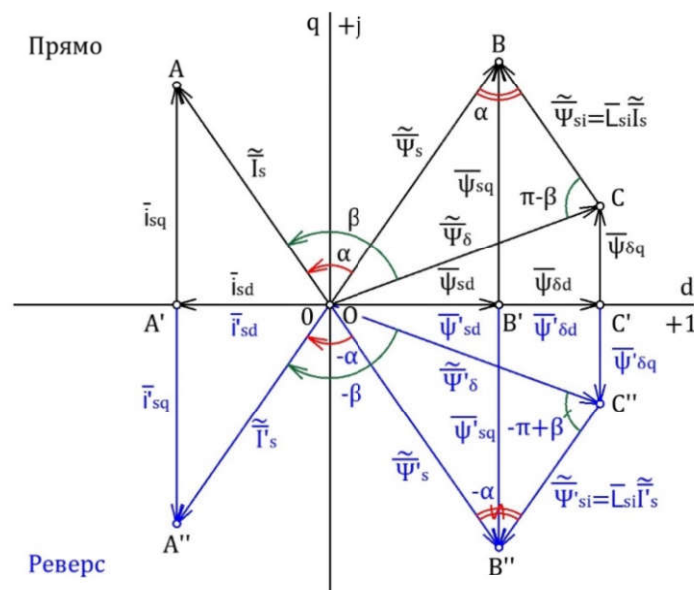


Рис. 2. Векторная диаграмма установившегося режима работы СД в отсутствии какого-либо закона управления магнитным полем

Рассматривая треугольники ОАА' и ОВВ', характеризующие прямой ход двигателя, и используя уравнение (1), а также выражения, входящие в состав систем уравнений (4) и (9), можно получить следующие формулы для функциональных зависимостей БН:

$$\bar{i}_{sq}(\bar{M}) = \frac{\bar{M}}{\sqrt{1 - 2 \frac{\bar{L}_{sq}}{\bar{\Psi}_s} \cdot \frac{\bar{M}}{\bar{\Psi}_s} \operatorname{ctg} \alpha + \frac{\bar{L}_{sq}^2}{\bar{\Psi}_s^2} \cdot \frac{\bar{M}^2}{\bar{\Psi}_s^2} (1 + \operatorname{ctg}^2 \alpha)}}, \quad (10)$$

$$\bar{i}_{sd}(\bar{M}) = \frac{\bar{M} \operatorname{ctg} \alpha - \bar{L}_{sq} \cdot \frac{\bar{M}^2}{\bar{\Psi}_s^2} \cdot (1 + \operatorname{ctg}^2 \alpha)}{\bar{\Psi}_s \sqrt{1 - 2 \frac{\bar{L}_{sq}}{\bar{\Psi}_s} \cdot \frac{\bar{M}}{\bar{\Psi}_s} \operatorname{ctg} \alpha + \frac{\bar{L}_{sq}^2}{\bar{\Psi}_s^2} \cdot \frac{\bar{M}^2}{\bar{\Psi}_s^2} (1 + \operatorname{ctg}^2 \alpha)}}, \quad (11)$$

$$\bar{\Psi}_f(\bar{M}) = \frac{\bar{\Psi}_s^2 - (\bar{L}_{sq} + \bar{L}_{sd}) \bar{M} \operatorname{ctg} \alpha + \bar{L}_{sq} \bar{L}_{sd} \cdot \frac{\bar{M}^2}{\bar{\Psi}_s^2} \cdot (1 + \operatorname{ctg}^2 \alpha)}{\bar{\Psi}_s \sqrt{1 - 2 \frac{\bar{L}_{sq}}{\bar{\Psi}_s} \cdot \frac{\bar{M}}{\bar{\Psi}_s} \operatorname{ctg} \alpha + \frac{\bar{L}_{sq}^2}{\bar{\Psi}_s^2} \cdot \frac{\bar{M}^2}{\bar{\Psi}_s^2} (1 + \operatorname{ctg}^2 \alpha)}}. \quad (12)$$

В общем случае переменные, стоящие в левой части уравнений (10) – (12), помимо ЭМ момента зависят также от величины потокоцепления, пронизывающего статорные обмотки $\bar{\Psi}_s$ и угла между потокоцеплением и током статора α . Приравняв левые части уравнений (1) и (2), можно получить следующее соотношение между потокоцеплениями $\bar{\Psi}_s$ и $\bar{\Psi}_\delta$:

$$\bar{\Psi}_s \sin \alpha = \bar{\Psi}_\delta \sin \beta = \bar{\Psi}_\delta. \quad (13)$$

Из уравнения (13) легко математически сформулировать условия для получения величины потокоцепления статора необходимой для настройки на тот или иной закон управления магнитным полем:

$$\begin{cases} \bar{\Psi}_s = \bar{\Psi}_\delta, \text{ при } \alpha = \frac{\pi}{2}; \\ \bar{\Psi}_s = \frac{\bar{\Psi}_\delta}{\sin \alpha} = \frac{\bar{\Psi}_\delta}{\sin \alpha}, \text{ при } \beta = \frac{\pi}{2}. \end{cases} \quad (14)$$

Величина базового потокоцепления (в о.е.), входящего в состав условий (14), при необходимости двухзонного регулирования скорости определяется следующими условиями:

$$\begin{cases} \bar{\Psi}_\delta = 1, \text{ при } 0 \leq \bar{\omega} \leq 1; \\ \bar{\Psi}_\delta = \frac{1}{\bar{\omega}}, \text{ при } \bar{\omega} > 1. \end{cases} \quad (15)$$

Наконец, определимся с формированием угла α , входящего в состав уравнений (10) – (12). В первом случае, когда нагрузка на валу СД не превышает номинальный ЭМ момент в два раза для реализации ПОУ по магнитному полю статора данный угол поддерживается равным 90 градусов. В ином случае угол α определяется расчетным путем в реальном времени. Формула расчета данного угла может быть получена с помощью треугольника ОВС, приведенного на векторной диаграмме рис. 2.

$$\begin{cases} \alpha = \pm \frac{\pi}{2}, \text{ при } 0 \leq |\bar{M}| \leq 2; \\ \alpha = \pm \arcsin \frac{1}{\sqrt{1 + \frac{\bar{L}_{si}^2 \bar{L}_s^2}{\bar{\Psi}_\delta^2}}}, \text{ при } |\bar{M}| > 2 \text{ и } \beta = \frac{\pi}{2}, \end{cases} \quad (16)$$

где $\bar{L}_{si}$ – индуктивность рассеяния фазной обмотки статора, о.е.

Знак «+» в обоих условиях системы уравнений (16) соответствует прямому ходу двигателя, знак «-» – реверсивному.

Математическое моделирование САР. Система автоуправления синхронной машиной включает в себя: три внутренних регулируемых контура – два для проекций тока статора $\bar{i}_{sd}$, $\bar{i}_{sq}$ и один для потокоцепления ОВ $\bar{\Psi}_f$; промежуточный нерегулируемый МКМ; внешний регулируемый контур ско-

рости $\bar{\omega}$; блок компенсации ВПОС; блок формирования базового потокосцепления $\bar{\Psi}_\delta$; блок формирования угла α ; блок формирования потокосцепления статора $\bar{\Psi}_s$; блоки ограничения величин скорости и потокосцепления ОВ, а также задатчик интенсивности необходимый для формирования сигнала скорости определенной формы.

Математическая модель МКМ представлена уравнениями (10) – (12), блок формирования базового потокосцепления – системой уравнений (15), блок формирования угла α – системой уравнений (16) и, наконец, блок формирования потокосцепления статора – системой уравнений (14).

Все внутренние контуры САУ настраиваются на модульный оптимум с помощью ПИ-регуляторов, внешний контур скорости – на симметричный оптимум (СО), также с применением ПИ-регулятора. При выводе передаточных функций (ПФ) звеньев пренебрегаем малой некомпенсируемой постоянной времени ПЧ $T_{\mu i}$. Ниже приводятся ПФ регуляторов:

$$\left\{ \begin{array}{l} \bar{W}_{\text{пт}q}(p) = \frac{T_{sq}p + 1}{2T_{\mu i} \cdot \frac{1}{R_s} p}; \\ \bar{W}_{\text{пт}d}(p) = \frac{T_{sd}'p + 1}{2T_{\mu i} \cdot \frac{1}{R_s} p}; \\ \bar{W}_{\text{рпв}}(p) = \frac{T_f p + 1}{2T_{\mu f} p}; \\ \bar{W}_{\text{рс}}(p) = \frac{T_m}{16T_{\mu i}} \cdot \frac{k_{\text{нс}} T_{\mu i} p + 1}{k_{\text{нс}} T_{\mu i} p}, \end{array} \right. \quad (17)$$

где $\bar{W}_{\text{пт}q}$ и $\bar{W}_{\text{пт}d}$ – ПФ регуляторов проекций вектора тока статора ось y и d соответственно, о.е.; $T_{\mu i}$ – некомпенсируемая постоянная времени ПЧ, принимаем $T_{\mu i} = 5$ мс; $\bar{W}_{\text{рпв}}$ – ПФ регулятора потокосцепления ОВ, о.е.; $T_{\mu f}$ – некомпенсируемая постоянная времени тиристорного возбудителя, принимаем $T_{\mu f} = 10$ мс; $\bar{W}_{\text{рс}}$ – ПФ регулятора скорости, о.е.; $k_{\text{нс}}$ – подстроечный коэффициент, в имитационной модели принимается $k_{\text{нс}} = 28$.

На входе системы для оптимизации переходных процессов системы, настроенной на СО, устанавливается фильтр с ПФ $\bar{W}_\Phi$ [12]:

$$\bar{W}_\Phi(p) = \frac{1}{k_{\text{нс}} T_{\mu i} p + 1}. \quad (18)$$

Передаточные функции звеньев компенсации ВПОС имеют вид:

$$\left\{ \begin{array}{l} \bar{f}_{\text{к.}q} = \bar{\omega}_{\text{эл}} \bar{\Psi}_{sd}; \\ \bar{f}_{\text{к.}d} = \bar{\omega}_{\text{эл}} \bar{\Psi}_{sq}, \end{array} \right. \quad (19)$$

где $\bar{f}_{\text{к.}q}$ и $\bar{f}_{\text{к.}d}$ – передаточные функции звеньев компенсаций ВПОС по проекциям ЭДС вращения на ось q и d соответственно, о.е.

Имитационное моделирование. На основании уравнений (1), (5) – (8), (10) – (13), (18) и выражений, входящих в системы уравнений (9), (14) – (17), (19), осуществим построение модели частотно-регулируемого синхронного электропривода в графической среде программирования MATLAB Simulink. Имитационная модель привода представлена на рис. 3.

С целью проверки работоспособности и адекватности имитационной модели получим с ее помощью переходные процессы по координатам скорости $\bar{\omega}$, электромагнитного момента $\bar{M}$ и потокосцеплений статора $\bar{\Psi}_s$ и рассеяния $\bar{\Psi}_\delta$. Математическая модель синхронного ЭП, приведенная в данной статье, помимо переключения между законами управления магнитным полем, обеспечивает также обыкновенные типовые функции, которые могут потребоваться от приводов тех или иных установок, в частности, реверсирование и двухзонное регулирование скорости. В связи с этим становится целесообразным исследовать работу ЭП в прямом и реверсивном режимах при следующих условиях: приложение предельной нагрузки, номинальный режим работы, работа со скоростью выше основной. Работа в указанных условиях обычно характерна для главных ЭП станов горячей прокатки, когда при первых пропусках ме-

талла в момент захвата заготовки возникает большой ударный момент нагрузки, при средних пропусках осуществляется работа привода в режиме близком к номинальному, а при конечных пропусках с увеличением длины металла и одновременным уменьшением момента сопротивления деформации становится целесообразным увеличивать скорость сверх основной [3, 10]. Характеристики моделируемых в статье режимов работы ЭП приведены в таблице.

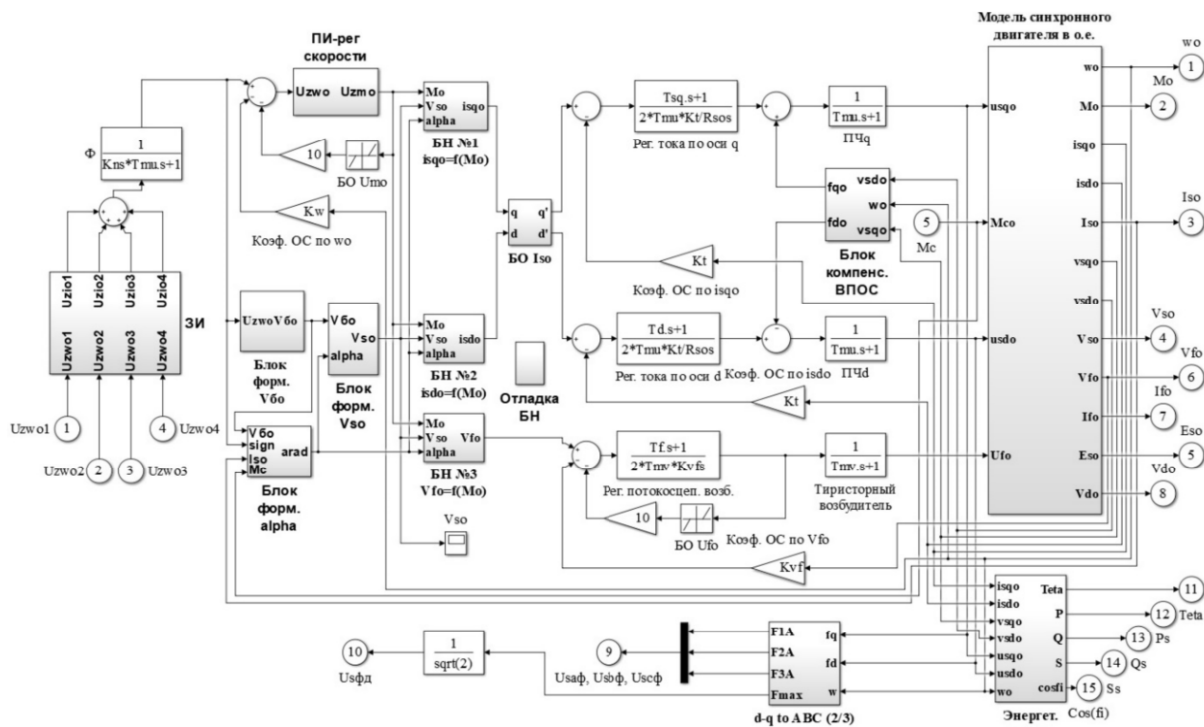


Рис. 3. Имитационная модель САУ частотно-регулируемого синхронного ЭП, построенная в виртуальной среде MATLAB Simulink

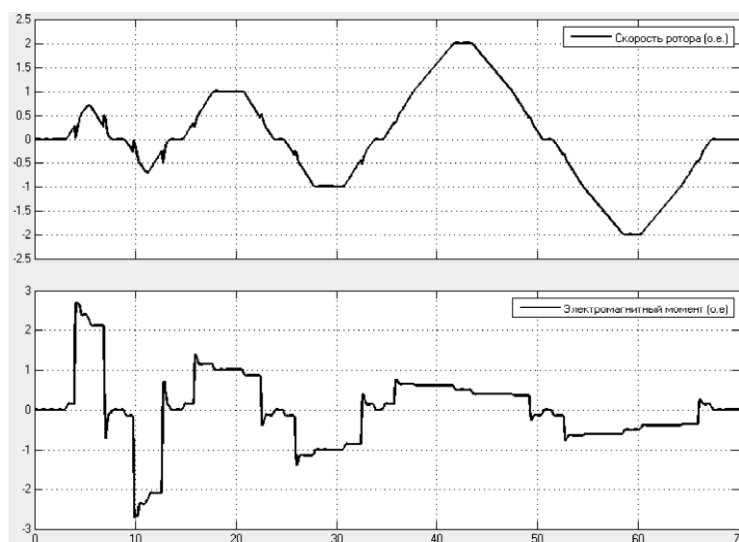


Рис. 4. Сигналы скорости и электромагнитного момента синхронного ЭП в моделируемых режимах работы

Характеристики моделируемых режимов работы электропривода

Участок	Направление	Задание по скорости $\bar{\omega}$, о.е.	Нагрузка M_c , о.е	Время разгона/торможения, с
I	Прямо	0,7	2,25	$\approx 1,8$
	Реверс	-0,7	-2,25	$\approx 1,8$
II	Прямо	1	1	3
	Реверс	-1	-1	3
III	Прямо	2	0,5	7
	Реверс	-2	-0,5	7

На рис. 4 приводятся переходные процессы по скорости и электромагнитному моменту при работе ЭП в соответствии с режимами таблицы.

На рис. 5 приводятся переходные процессы по потокоцеплению статора и рассеяния, а также изменение угла α в зависимости от нагрузки, прикладываемой к валу двигателя.

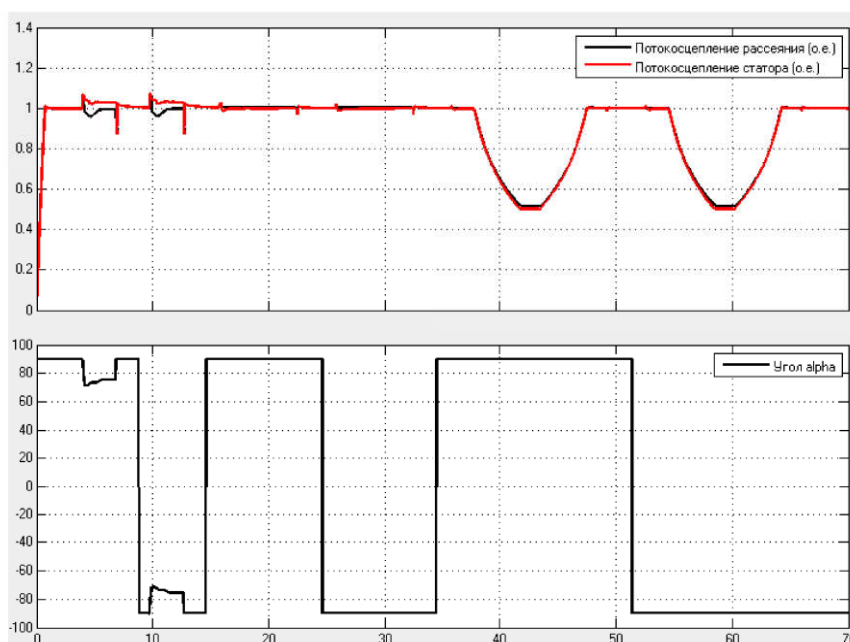


Рис. 5. Изменение закона управления магнитным полем машины в зависимости от нагрузки, прикладываемой к валу двигателя

Заключение. Адекватность разработанной математической модели САУ с переменной структурой подтверждается динамическими характеристиками частотно-регулируемого синхронного ЭП, полученными с помощью ее имитации в программе MATLAB Simulink. Характеристики, приведенные на рис. 4 соответствуют типовым скоростным и нагрузочным диаграммам для электропривода вращения валков реверсивных станов горячей прокатки [3, с. 286]. Перерегулирования по сигналам скорости и электромагнитного момента (см. Рис. 4) не превышают значений, характерных для настройки системы на симметричный оптимум [11, с. 86-95].

Из графиков переходных процессов по сигналам потокоцепления статора и рассеяния, а также угла α , представленных на рис 5, видно, что предлагаемый в работе способ построения САУ с переменной структурой обеспечивает четкое переключение между законами управления магнитным полем машины в зависимости от прикладываемой к валу нагрузки.

Приведенная в работе математическая и имитационная модель САУ с переменной структурой обеспечивает работу ЭП в различных типовых режимах – реверс, двухзонное регулирование скорости и т.д., в связи с чем способ построения САУ, предлагаемый в данной статье, может быть в дальнейшем использован при проектировании реальных частотно-регулируемых классических синхронных ЭП с векторным управлением, применяющихся в различных отраслях промышленности.

Для демонстрации полного потенциала САУ с переменной структурой авторским коллективом в дальнейшем предполагается введение в модель реальной кривой намагничивания машины и рассмотрение работы системы автоуправления с учетом реальных процессов насыщения магнитной цепи двигателя.

Список литературы

1. Алексеев А.К., Трамбовецкий В.Н., Савенко О.С. Перспективы развития частотно-регулируемого электропривода переменного тока // Вестник Приазовского государственного технического университета. Серия: Технические науки. 2009. №19. С. 242-246.
2. Козырев С.К., Ладыгин А.Н., Сергиевский Ю.Н. Основные вехи становления электропривода как отрасли науки и техники // Электропривод и развитие техники: доклады научно-методического семинара. Москва. 2012. С. 32-37.
3. Белов М.П., Новиков В.А., Рассудов Л.Н. Автоматизированный электропривод типовых производственных механизмов и технологических комплексов: учебник для студ. высш. учеб. заведений. Изд. 3-е испр. М.: Издательский центр «Академия», 2007. 576 с.
4. Чернышев А.Ю., Дементьев И.А., Чернышев И.А. Электропривод переменного тока: учебное пособие. Томск: Изд-во Томского политехнического университета, 2011. 213 с.

5. Finch J.W., Giaouris D. Controlled AC electrical drives // IEEE Transactions on Industrial Electronics. 2018. V. 55 (2). P. 481-491.
6. Sarac V., Iliev D. Synchronous motor of permanent magnet compared to asynchronous induction motor // Electrotehnica, Electronica, Automatica (EEA). V. 65 (4). P. 51-58.
7. Островляничик О.В. Автоматический электропривод постоянного тока горно-металлургического производства: учебное пособие. Новокузнецк: Изд-во СибГИУ, 2004. 383 с.
8. Ягопольский А.Г., Комкова Т.Ю. Особенности применения современных электроприводов в оборудовании прокатных станов // Современные проблемы науки и образования. 2015. № 2-1. 6 с.
9. Кузнецов В.А., Зайцев Н.С., Кузнецова Е.С. Имитационное моделирование системы автоматического управления главным электроприводом прокатного толстолистого стана по системе «частотный преобразователь – синхронный двигатель» // Автоматизированный электропривод и промышленная электроника: сборник статей IX Всероссийской научно-практической конференции. Новокузнецк. 2020. С. 32-40.
10. Фединцев В.Е. Электрооборудования прокатных и трубных цехов. Ч. 2. Электропривод прокатных станов и вспомогательных механизмов ОМД: учебное пособие. М.: Metallurgiya, 1995. 256 с.
11. Высоковольтные приводы переменного тока. [Электронный ресурс] URL: <https://new.abb.com/drives/ru/BV-privody> (дата обращения: 02.02.2023).
12. Слежановский О.В., Дацковский Л.Х., Кузнецов И.С. Системы подчиненного регулирования электроприводов переменного тока с вентильными преобразователями. М.: Энергоатомиздат, 1983. 256 с.
13. Вейнгер А.М. Регулируемый синхронный электропривод. М.: Энергоатомиздат, 1985. 224 с.
14. Кузнецов В.А. Кузнецова Е.С. Зайцев Н.С. Модернизация системы управления синхронным электроприводом вращения валков прокатного стана // Моделирование и наукоемкие информационные технологии в технических и социально-экономических системах: труды V Международной научно-практической конференции. Новокузнецк. 2021. С. 315-321.
15. Гасияров В.Р. Совершенствование электротехнических систем реверсивной клетки толстолистого прокатного стана: дис. ... д-ра. техн. наук. Челябинск, 2020. 359 с.
16. Гасияров В.Р., Маклакова Е.А. Математическое описание главного электропривода толстолистого стана 5000 горячей прокатки // Электротехника: сетевой электронный научный журнал. 2015. Т. 2 (3). С. 62-66.
17. Кузнецов В.А., Чураков А.С. Маршев Д.А. Увеличение производительности прокатного стана путем оптимизации синхронного привода ACS 6000 // Автоматизированный электропривод и промышленная электроника: труды седьмой всероссийской научно-практической конференции. Новокузнецк. С. 94.100.
18. Wu B., Narimani M. High-Power Converters and AC Drives. 2nd ed. The Institute of Electrical and Electronics Engineers, Inc: Published by John Wiley & Sons, Inc, 2017. 480 p.
19. Bose K. B. Power Electronics and Motor Drives: Advances and trends. Boston: Academic Press is an imprint of Elsevier, 2006. 917 p.
20. Соколовский Г.Г. Электроприводы переменного тока с частотным регулированием: учебник. М.: Академия, 2006. 265 с.
21. Моделирование двухзонной системы автоматического управления частотно-регулируемого синхронного электродвигателя с демпферной обмоткой / В.Ю. Островляничик, В.А. Кубарев, Н.С. Зайцев, Д.Е. Модзелевский, Е.С. Кузнецова, Д.А. Маршев // Горное оборудование и электромеханика. 2022. № 5(163). С. 46-58.

Островляничик Виктор Юрьевич, д-р техн. наук, профессор, kafaep@sibsiu.ru, Россия, Новокузнецк, Сибирский государственный индустриальный университет,

Зайцев Никита Сергеевич, аспирант, ZaiTsevNiki@yandex.ru, Россия, Новокузнецк, Сибирский государственный индустриальный университет,

Кубарев Василий Анатольевич, канд. техн. наук, доцент, заведующий кафедрой, Kubarev.sibsiu@list.ru, Россия, Новокузнецк, Сибирский государственный индустриальный университет,

Кузнецова Елена Степановна, канд. техн. наук, доцент, kuzlenna00@yandex.ru, Россия, Новокузнецк, Сибирский государственный индустриальный университет,

Модзелевский Дмитрий Евгеньевич, канд. техн. наук, доцент, dima010@mail.ru, Россия, Новокузнецк, Сибирский государственный индустриальный университет

**THE METHOD FOR CONSTRUCTING AN AUTOMATIC CONTROL SYSTEM OF VARIABLE STRUCTRE
FOR A FREQUENCY-CONTROLLED SYNCHRONOUS ELECTRIC MOTOR**

V.Yu. Ostrovlyanchik, N.S. Zaitsev, V.A. Kubarev, E.S. Kuznetsova, D.E. Modzelevskiy

The article proposes a method for constructing an automatic control system (ACS) with a variable structure of a frequency-controlled electric drive (ED), which is based on a synchronous machine of classical design. The method is based on the calculation and a specific task, depending on the load, of the angle between the spatial vectors of the stator winding's flux linkage and the current flowing in windings. Mathematical and simulation modeling of ACS synchronous ED with vector control is carried out. The results of this work can be used in the design of automatic control systems of the frequency-controlled synchronous motor with field-oriented control.

Key words: automatic control system, variable structure, synchronous electric drive, vector control, electromagnetic moment, magnetic field control law, stator flow coupling, scattering flow coupling.

Ostrovlyanchik Victor Yurevich, doctor of technical sciences, professor, kafaep@sibsiu.ru, Russia, Novokuznetsk, Siberian State Industrial University,

Zaitsev Nikita Sergeevich, postgraduate, ZaiTsevNiki@yandex.ru, Russia, Novokuznetsk, Siberian State Industrial University,

Kubarev Vasilii Anatolevich, candidate of technical sciences, docent, head of chair, Kubarev.sibsiu@list.ru, Russia, Novokuznetsk, Siberian State Industrial University,

Kuznetsova Elena Stepanovna, candidate of technical sciences, docent, kuzlena00@yandex.ru, Russia, Novokuznetsk, Siberian State Industrial University,

Modzelevskiy Dmitriy Evgenevich, candidate of technical sciences, docent, dima010@mail.ru, Russia, Novokuznetsk, Siberian State Industrial University

УДК 656.078

DOI: 10.24412/2071-6168-2023-4-624-634

РАЗРАБОТКА АЛГОРИТМА АВТОМАТИЗАЦИИ ПРОГНОЗА ТРАНСПОРТНОЙ РАБОТЫ ПЕРЕВОЗЧИКОВ ТВЕРДЫХ КОММУНАЛЬНЫХ ОТХОДОВ

В.В. Рубинов, Н.Н. Майоров, А.А. Буцанец

Задачей исследования является разработка метода принятия решения, подпрограммы автоматизации о количестве и типе специализированной транспортной техники для работы с твердыми коммунальными и крупногабаритными отходами внутри существующей схемы потоков для любого региона, области, или транспортного участка. Для решения поставленной задачи и разработки подпрограммы автоматизации прогноза, в предлагаемом исследовании, был разработан новый подход к анализу системы транспортировки коммунальных отходов с точки зрения оценки необходимого перечня универсальных структурированных исходных данных, которые первично характеризуют работу в том или ином регионе. В статье была предложена классификация специализированной техники, позволяющая проводить подобный анализ без большого количества технологических данных. Для работы с данными был разработан новый алгоритм определения количественных показателей мест накопления и определения необходимого количества транспорта для обслуживания определённого участка в зоне деятельности. Разработанный новый алгоритм, позволил исследовать регион используя автоматизированную подпрограмму для определения расстояний от групп контейнерных площадок до «узловой» точки, определения необходимого количества специализированного транспорта. Разработанный алгоритм был реализован на платформе «ИС:Комплексная автоматизация» для удобства интеграции как с городскими информационными системами, так и информационными системами транспортных компаний. Для решения поставленной задачи выполнен анализ объемов перевозок, сформирован набор данных, который необходимо использовать для исследования территории обслуживания, и данные позволяющие принимать решения по выбору типа и количества транспортных средств для последующего построения моделей в имитационных программных системах для прогнозной оценки загруженности, мощности и совокупных транспортных издержек. На основе полученных результатов были определены области дальнейших исследований для повышения точности и расширения возможной области решения задач для разработанного алгоритма и подпрограммы автоматизации. Представленное автоматизированное решение можно интегрировать в существующие информационные системы и, за счет универсальности решения, внедрить в другие компании и регионы.

Ключевые слова: твердые коммунальные отходы, система обращения отходов, регионы, реформа, транспортное предприятие, переработка, анализ, прогноз, алгоритм принятия решения, система транспортировки отходов, специализированный транспорт, мусоровозы.

Система обеспечения нормальной эксплуатации жизненного пространства городов и поселков городского типа формируется органами жилищного коммунального хозяйства. Одним из основных видов их деятельности является вывоз твердых коммунальных отходов (далее ТКО) из зон накопления, расположенных вблизи жилого фонда [1].

АВТОМАТИЗАЦИЯ И УПРАВЛЕНИЕ ТЕХНОЛОГИЧЕСКИМИ ПРОЦЕССАМИ И ПРОИЗВОДСТВАМИ

<i>Островляничик В.Ю., Зайцев Н.С., Кубарев В.А., Кузнецова Е.С., Модзелевский Д.Е.</i> Способ построения системы автоуправления переменной структуры для частотно-регулируемого синхронного электропривода	614
--	-----

<i>Рубинов В.В., Майоров Н.Н., Буцанец А.А.</i> Разработка алгоритма автоматизации прогноза транспортной работы перевозчиков твердых коммунальных отходов	624
--	-----

НАЗЕМНЫЕ ТРАНСПОРТНО-ТЕХНОЛОГИЧЕСКИЕ СРЕДСТВА И КОМПЛЕКСЫ

<i>Витчук П.В., Витчук Н.А., Демидов Р.В., Аракелян А.С., Шафорост А.Н.</i> Разработка конструкции балансирного устройства для выравнивания растягивающей нагрузки в тяговых лентах лифта	634
--	-----

<i>Шубин А.А., Миронов Д.С., Шафорост А.Н., Анцев В.Ю.</i> Способ перевозки пассажиров с использованием канатно-транспортного средства	638
---	-----

МАШИНЫ, АГРЕГАТЫ И ТЕХНОЛОГИЧЕСКИЕ ПРОЦЕССЫ

<i>Короткий А.А., Панфилов А.В., Юсупов А.Р.</i> Детекция и классификация дефектов стальных канатов лифтов с использованием компьютерного зрения	643
---	-----

<i>Кондратьев А.В., Лысенко Т.И., Анцев В.Ю., Анцев А.В.</i> Обоснование параметров желобообразной валковой сортировки с подвижными фартуками	649
--	-----

<i>Житный М.В., Синельников Э.Г., Апевалов И.В.</i> Численное моделирование ударного взаимодействия стального ударника и тонкой пластины, выполненной из сплава АМгб	654
---	-----

Научное издание

ИЗВЕСТИЯ
ТУЛЬСКОГО ГОСУДАРСТВЕННОГО УНИВЕРСИТЕТА
ТЕХНИЧЕСКИЕ НАУКИ

Выпуск 4

Редактор О.И. Борискин

Компьютерная правка и верстка – Б.С. Яковлев

Учредитель:

ФГБОУ ВО «Тульский государственный университет»
300012, г. Тула, просп. Ленина, 92

Изд. лиц. ЛР № 020300 от 12.02.97

Подписано в печать 22.05.23. Дата выхода в свет 29.05.23

Формат бумаги 70×100 1/16. Бумага офсетная

Усл.-печ. л. 108,39

Тираж 500 экз. Заказ 075

Цена свободная

Адрес редакции и издателя:

300012, г. Тула, просп. Ленина, 95

Отпечатано в Издательстве ТулГУ

300012, г. Тула, просп. Ленина, 95