

ЭНЕРГЕТИКА

УДК 62-503.54

В. А. Морозов, кандидат технических наук, доцент
В. А. Стародубцева, кандидат технических наук, профессор
А. В. Морозов, старший преподаватель
ИжГТУ имени М. Т. Калашникова

АНАЛИЗ ПУТЕЙ ОПТИМИЗАЦИИ ЭЛЕКТРОПРИВОДА БОЛЬШОЙ МОЩНОСТИ С НЕСТАНДАРТНОЙ ЧАСТОТОЙ ВРАЩЕНИЯ

В данной статье рассмотрены вопросы определения оптимальных характеристик электропривода при различных соотношениях КПД, массогабаритных, виброшумовых и технико-экономических параметров. Приведено моделирование системы автоматического управления электропривода средствами Simulink для программирования контроллеров с помощью ПО Matlab.

Ключевые слова: электрический привод, обращенный асинхронный двигатель, система управления электроприводом.

Проведенное исследование выполнено на кафедре «Электротехника» в соответствии с договорами № 65-1-74 от 29 мая 2015 г. «Проработка электроприводов для подводного аппарата» и № 97/259 от 27.07.2015 г. «Проведение комплекса научно-исследовательских, опытно-конструкторских и технологических работ по разработке унифицированной машины технологического электротранспорта (УМ-ТЭТ)», заключенными с ОАО «Сарапульский электрогенераторный завод».

Электрический привод (ЭП) представляет собой электромеханическую систему, обеспечивающую реализацию различных технологических и производственных процессов в промышленности с использованием механической энергии. Назначение электропривода состоит в обеспечении движения исполнительных органов производственных машин и механизмов и управления этим движением. Электропривод, являясь энергетической основой реализации технологических и производственных процессов, во многом определяет их качество, энергетические и технико-экономические показатели производственного механизма. Для реализации разнообразных технологических процессов используются различные типы электрических машин. При выборе электродвигателя для определенного производственного механизма необходимо не только согласование механических свойств двигателя с механической характеристикой производственного механизма, но и обеспечение надежности работы.

Задачей проводимых исследований является определение оптимальных характеристик электропривода с различными соотношениями КПД, массогабаритными, виброшумовыми и технико-экономическими параметрами. Электропривод представляет собой электродвигатель с блоком управления, в состав электропривода при необходимости может входить дополнительное оборудование (например: редуктор и т. д.). Выбранный электродвигатель должен обеспечивать требуемый

вращающий момент и частоту вращения, поэтому также требуется разработать систему управления электроприводом.

В результате анализа, проведенного с учетом всех требований, предложено использовать обращенный асинхронный двигатель. Он обладает жесткой механической характеристикой и позволяет при регулировании частотным методом получить плавное и стабильное регулирование на всех регулировочных характеристиках одновременно с высокими технико-экономическими показателями.

Обращенным называют такой асинхронный двигатель, у которого питание подводится к статору, закрепленному на неподвижном валу, а исполнительный механизм крепится непосредственно к корпусу ротора. Обычно у машин небольшой мощности ротор изготавливается литым, из немагнитного материала. В настоящей работе рассмотрены особенности конструкции и расчета крупных обращенных асинхронных машин мощностью от 80 до 108 кВт. С целью получения значительного вращающего момента в роторе выполняется короткозамкнутая обмотка. Конструкция обращенного электродвигателя (рис. 1) подобна конструкции обычного асинхронного электродвигателя. Обращенный асинхронный двигатель состоит из шихтованного сердечника статора, собранного на втулке, которая напрессована на стальную не вращающуюся ось. Внешний ротор состоит из шихтованного сердечника, в пазах которого расположены стержни обмотки, замкнутые с двух сторон кольцами.

Обращенный асинхронный двигатель работает следующим образом. При подаче трехфазного напряжения на первичную обмотку статора создается вращающееся магнитное поле, которое наводит в короткозамкнутой обмотке внешнего ротора ЭДС и токи, которые, взаимодействуя с магнитным полем, создают вращающий момент. Внешний ротор приходит в движение. Путь замыкания магнитного потока следующий: возникающий

в трехфазной обмотке статора магнитный поток через зубцовую зону проходит в воздушный зазор, входит в зубцы внешнего ротора и замыкается через внешний магнитопровод ротора. Поток проходит по спинке последнего и через зазоры, стенку

ротора и зубцы, возвращается во внутренний магнитопровод статора. С целью получения информации для объективного анализа были рассчитаны различные варианты обращенных двигателей (табл. 1) [1].

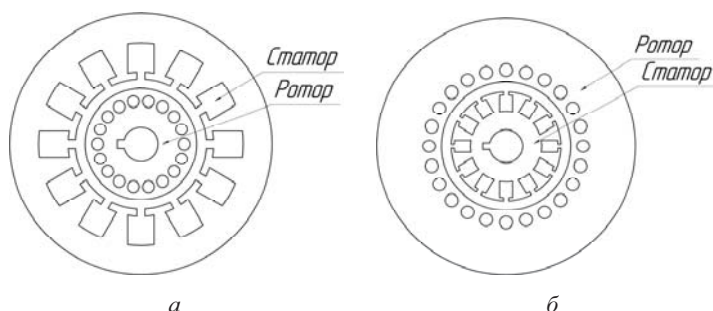


Рис. 1. Геометрия магнитопровода асинхронного двигателя: а – общепромышленный; б – обращенный

Таблица 1. Исходные данные для расчета обращенных двигателей

Диапазон напряжения U , В	Диапазон мощности подводимой к ЭП, кВт	Диапазон мощности на валу, кВт, не менее	Диапазон моментов на валу, Н·м	Диапазон частоты вращения вала, об./мин
87–122–240–330	80–180	56–126	1500–2700–4300	230–350–440

Два основных габарита обращенного двигателя: внутренний диаметр статора и длина железа статора – связаны между собой:

1. Внутренний диаметр статора определяется двумя параметрами заданной скоростью вращения (число пар полюсов) и максимально допустимой индукцией в зубцах для выбранной электротехнической стали.

2. Длина железа статора определяется в зависимости от выбранного внутреннего диаметра, электромагнитных нагрузок и требуемой подводимой мощности.

Для оптимально спроектированной машины отношение длины к полюсному делению должно лежать в пределах от 0,5 до 3,0 в зависимости от скорости вращения и способа охлаждения. Учитывая, что изначально заданы и полезная, и подводимая мощности, изменить длины в зависимости от электромагнитных нагрузок нельзя. Тем не менее соотношения длины воздушного зазора к полюсному делению для всех вариантов лежат в пределах оптимального диапазона (табл. 2).

Таблица 2. Расчетные параметры оптимальности проектирования

№ вар.	1	2	3	4	5	6	7	8
$\lambda = \ell_{\delta} / \tau$	0,94	2,77	0,94	2,77	1,49	2,29	1,49	2,29

Обмотка статора выполнена из проводников круглого сечения (всыпная), короткозамкнутая обмотка ротора – литая из алюминия. Для того чтобы получить как можно больший момент на валу двигателя, необходимо получить максимальное сопротивление обмотки ротора. С этой целью выбираем как можно большее число пазов ротора. Единственное, что ограничивает их количество, – это допустимая индукция в зубцах ротора. Предварительные расчеты проведены на стандартную частоту питающей сети 50 Гц [2].

Экономические показатели двигателя связаны с потерями. Увеличение потерь сказывается, во-первых, на повышении температуры обмотки и, во-вторых, на КПД двигателя. Проведенные исследования показали, что потери у обращенного асинхронного двигателя меньше, чем у стандартного. Это свя-

зано с тем, что размеры магнитопровода статора обращенного двигателя меньше.

Что касается тока холостого хода, он у обращенного двигателя больше. Объясняется это тем, что ротор такого двигателя больше, если сравнивать с ротором стандартного, и требуется больше энергии, чтобы привести его в движение. С точки зрения повышения эффективности использования активных материалов плотность тока должна быть выбрана как можно большей, но при этом возрастают потери в обмотках. Существенно влияют на сечение эффективного проводника, а соответственно, и на площадь паза можно, изменяя число пар параллельных ветвей [3].

В результате сравнения проведенных расчетов, выполненных на стандартную частоту 50 Гц, выявлено: для вариантов с низкими частотами вращения

номинальное скольжение либо больше критического, либо лежит на линейной части механической характеристики, но вблизи критического скольжения, это значит, что при незначительном увеличении нагрузки, двигатель перейдет в зону неустойчивой работы. Если точка номинального скольжения находится на нелинейной части механической характеристики, то получить требуемое номинальное скольжение можно, если согласно формуле $\omega_0 = \frac{2\pi f}{p}$ при том же

числе пар полюсов уменьшить начальную расчетную частоту. Единственным приемлемым вариантом является снижение начальной частоты питающего напряжения. С целью определения влияния начальной частоты питающего напряжения выполнен расчет геометрии магнитной цепи обратимого асинхронного двигателя на пониженную исходную частоту питания. Был выбран вариант, у которого при частоте 50 Гц номинальное скольжение больше критического. Геометрические размеры зубцов статора и ротора не изменились. Изменилась длина воздушного зазора, и увеличился магнитный поток. Одновременное изменение длины воздушного зазора и магнитного потока привело к тому, что индукция в воздушном зазоре не изменилась, а следовательно, и индукция в зубцах статора и ротора, как и индукция в ярмах, осталась прежней. Учитывая, что регулирование частоты вращения осуществляется путем изменения частоты питающего напряжения, уменьшить начальную частоту не составит труда.

Система автоматического регулирования (САР) положения исполнительного механизма представляет собой следящую систему регулирования по отклонению, для построения которой необходим датчик положения (ДП) – абсолютный энкодер углового положения исполнительного органа, регулятор положения (РП) и командное устройство (КУ), которое вырабатывает сигнал задания положения φ^* . Регулятор положения формирует задание ω^* для подчиненной ему САР по скорости. Таким образом, для регулирования положения используется трехконтурная

структура, содержащая внутренний контур регулирования моментобразующего тока, промежуточный контур регулирования скорости (РС) и внешний контур регулирования положения. В зависимости от вида САР положения, в ее структуру может входить датчик интенсивности (ЗИ), устанавливаемый на выходе (РП), и датчик положения (ЗП), устанавливаемый после КУ. Каждый регулятор в общем случае содержит ПИД-структуру и ограничитель выходного сигнала, предназначенный для удержания в допустимых пределах величины задания для подчиненного контура. Ограничитель РП осуществляет контроль максимальной скорости вращения, ограничитель РС – контроль максимального тока двигателя. Датчик интенсивности формирует линейно изменяющийся с заданным ускорением выходной сигнал контура положения.

В большинстве промышленных электроприводов, оснащенных позиционными системами, наилучшим считается такой процесс обработки среднего (большого) перемещения, при котором скорость изменяется по треугольному (трапецеидальному) графику. Это позволяет в полной мере использовать перегрузочную способность двигателя и исключает возникновение перерегулирования по положению [4]. Перемещения и скорость ограничены условиями технического задания (ТЗ), поэтому механическая трансмиссия должна содержать редуктор, который должен ограничивать максимальный момент на валу двигателя на уровне номинального. Как показало моделирование, работа данного привода осуществляется как в режиме малых, так и в режиме больших (средних) перемещений в зависимости от изменения задающего сигнала. Вариант САР с использованием датчика положения (рис. 2) позволяет отказаться от датчика интенсивности (ускорения), так как требуемый закон изменения положения формируется на входе системы. Данный вариант САР позволяет контролировать производную ускорения – рывок для обеспечения малошумности и исключения ударов трансмиссии.

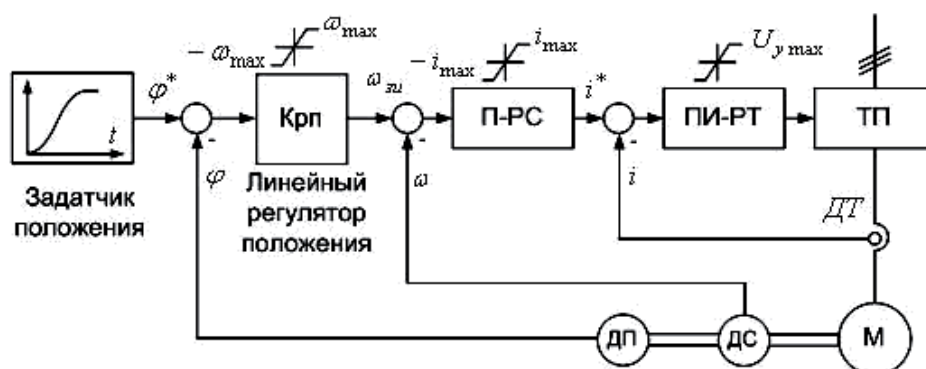


Рис. 2. Структурная схема позиционной системы с датчиком положения

Демонстрационное моделирование САР положения произведено средствами Simulink [5]. В качестве подчиненных контуров использована система (FOC) Field-Oriented Control Induction Motor Drive из биб-

лиотеки Sim Power Systems. Внутренняя структура блока (рис. 3) содержит частотный преобразователь с векторным управлением по принципу FOC. Simulink схема САР приведена на рис. 4. Схема содержит

формирователь задающего сигнала положения 1, работающий за счет элементов «ступенька» и «линейное нарастание», узел вычитания сигнала ОС 2, линейный регулятор положения 3, блок ограничения сигнала этого регулятора 4, систему векторного управления 5, редуктор механической трансмиссии 6 на выходе перемещения и формирователь нагрузочного момента 7 по закону синуса от угла поворота исполнительного органа.

Параметры настройки модели приближены к ТЗ: асинхронный двигатель мощностью до 5 кВт с 2 парами полюсов на фазу, напряжение на шине постоянного тока 310 В, инвертер на IGBT с обратными диодами.

Результаты экспериментов при оптимальном значении коэффициента РП представлены на рис. 5.

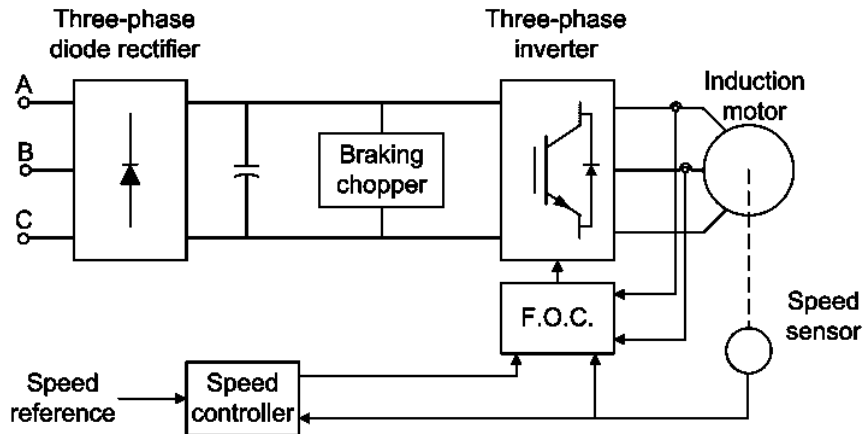


Рис. 3. Структура частотного преобразователя

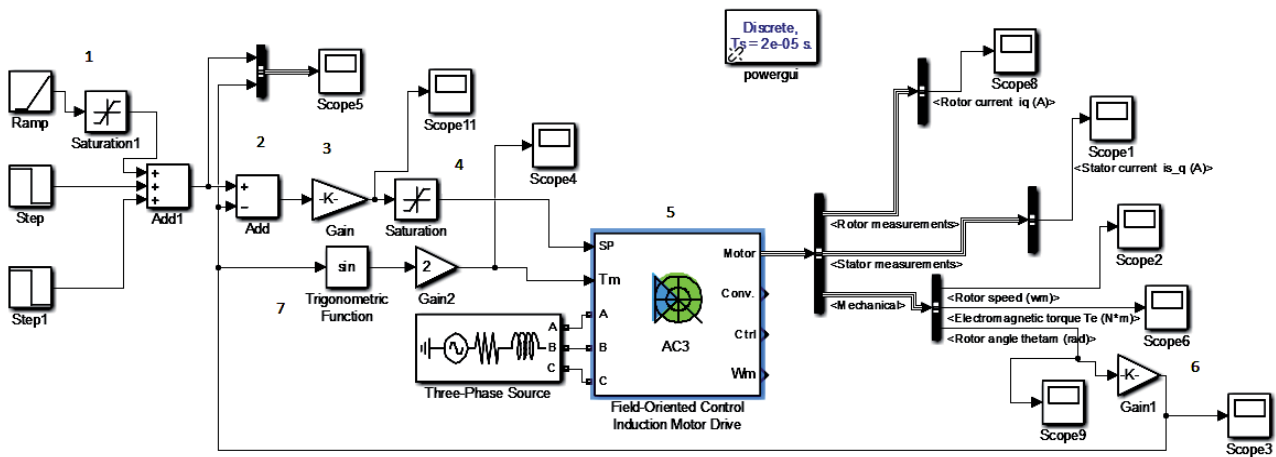


Рис. 4. Модель САР положения

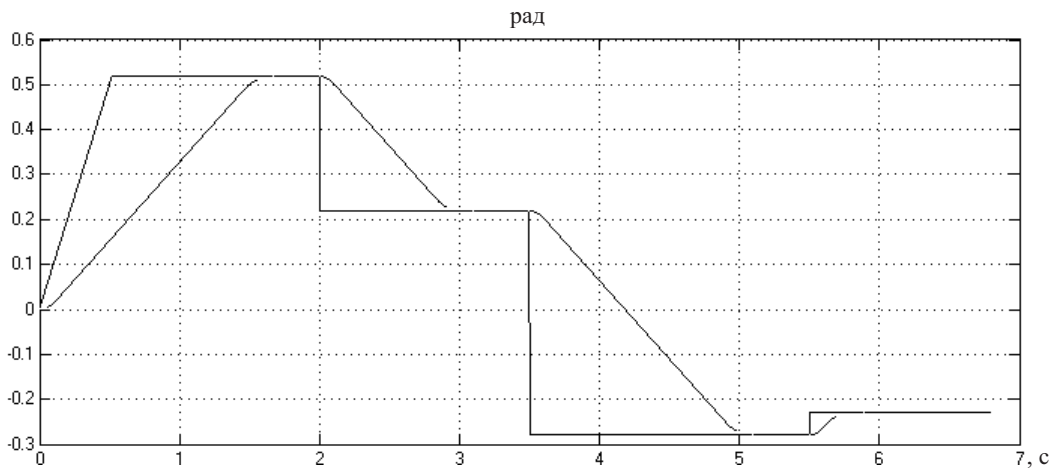


Рис. 5. Оптимальное регулирование $K_{PP} = 7000$

Исследованы изменения углового положения исполнительного механизма (рад) при одном и том же сигнале задания в зависимости от настроек регулятора РП. Линейное изменение угла означает работу

ограничителя РС и наблюдается при относительно больших перемещениях исполнительного механизма.

График изменения частоты вращения вала в зависимости от настроек $K_{РП}$ приведен на рис. 6.

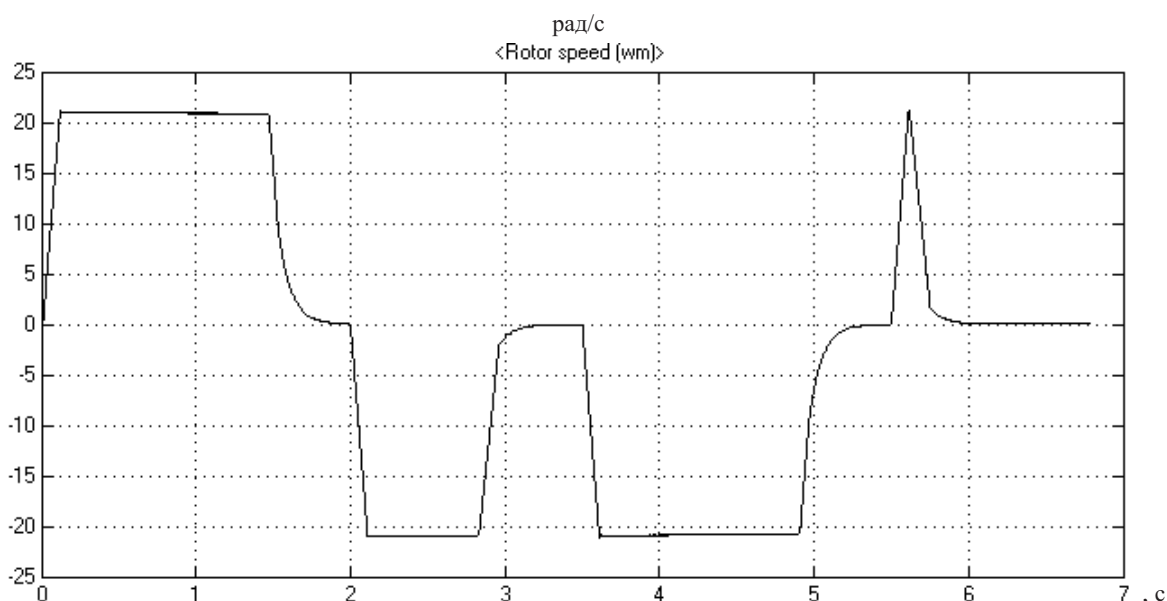


Рис. 6. Частота вращения вала при $K_{РП} = 7000$

Два внутренних контура САР (скорости и тока) являются элементами (FOC) системы управления асинхронным двигателем. Управление скоростью осуществляется посредством изменения момента на валу, который является производной от скорости. Момент задает РС, а структура контура регулирования тока обеспечивает его обработку. Векторное управление асинхронным двигателем является самым прогрессивным решением для регулируемого электропривода. Средства аппаратной реализации векторной СУ представлены высокопроизводительными вычислительными системами: ПЛИС, микропроцессорами общего назначения. Относительно недорогая реализация векторной системы управления выполнена с использованием отладочной платы STM32F4DISCOVERY, включающей контроллер на основе процессора STM32F407. Плата поддерживает компилятор KEIL uVision, который позволяет настроить регистры, отвечающие за работу периферии микроконтроллера и встроить в проект С-код, сгенерированный из MATLAB. С помощью ПО Matlab выполнено программирование контроллера за счет инструмента EmbeddedCoder. С-код генерируется из Simulink-модели системы управления. Модель САР, рис. 7, содержит контур регулирования скорости виртуальной модели АД, а также подчиненные контуры регулирования токов (систему векторного управления).

Модель позволяет реализовать также режим скалярного управления АД по принципу $U/f = \text{const}$, используемый в качестве отладочного. Переключение между режимами осуществляется с помощью входа Enable модели. Модель САР содержит следующие основные элементы: 1 – подсистема векторного управления по принципу полеориентированного регулирования FOC; 2 – подсистема преобразования координат по уравнениям Парка; 3 – подсистема вычисления скольжения; 4 – силовая часть преобразователя – инвертор, питающий двигатель; 5 – виртуальная модель асинхронного двигателя. Для передачи информации внутри одного файла создаются локальные переменные, доступные как для чтения 7, так и для записи 6. Входными сигналами модели в режиме векторного управления являются: theta – угловое положение ротора (электрический угол); I_a, I_b – токи фаз А и В с датчиков (А); omega_ref – задание частоты для векторного режима (рад/с); i_sd_ref – задание тока намагничивания для векторного режима (А). Выходные сигналы в скалярном режиме: scalar_freq – задание частоты для скалярного режима (в Гц); scalar_ampl – амплитуда выходного напряжения для скалярного режима (нормированное значение от 0 до 1).

Подсистема FOC модели САР (рис. 8) содержит контуры регулирования скорости продольной и поперечной составляющих токов статора.

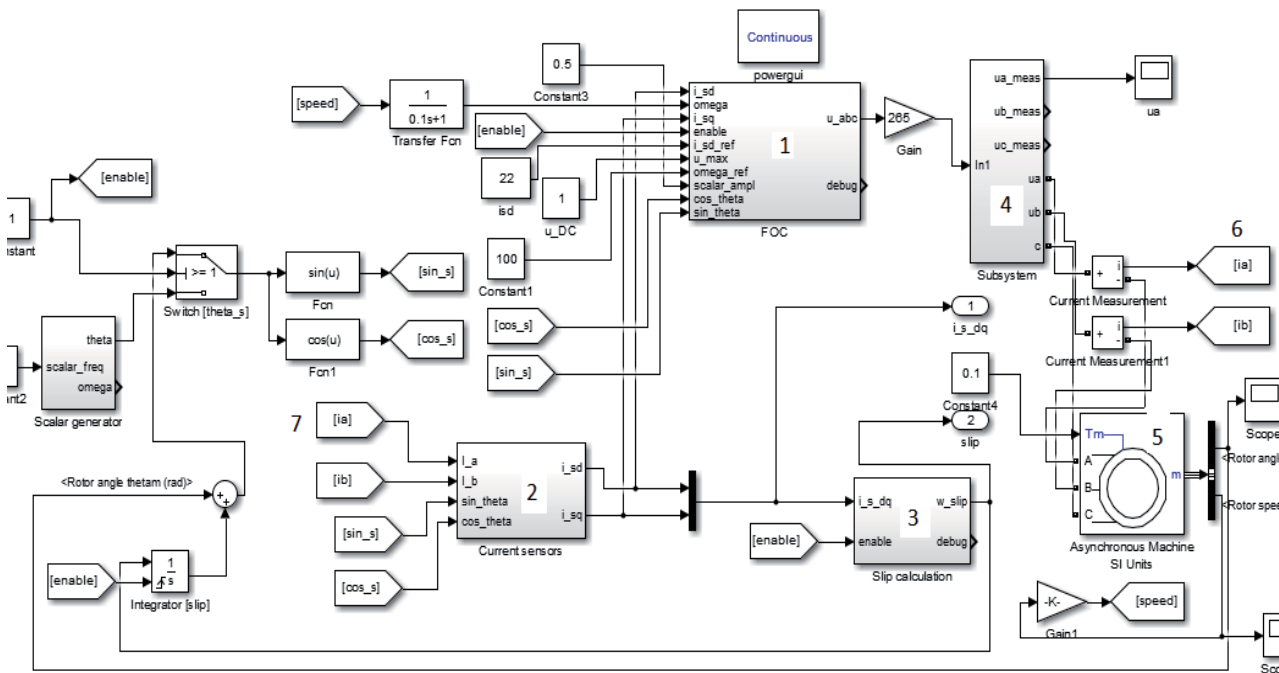


Рис. 7. Simulink-модель CAP

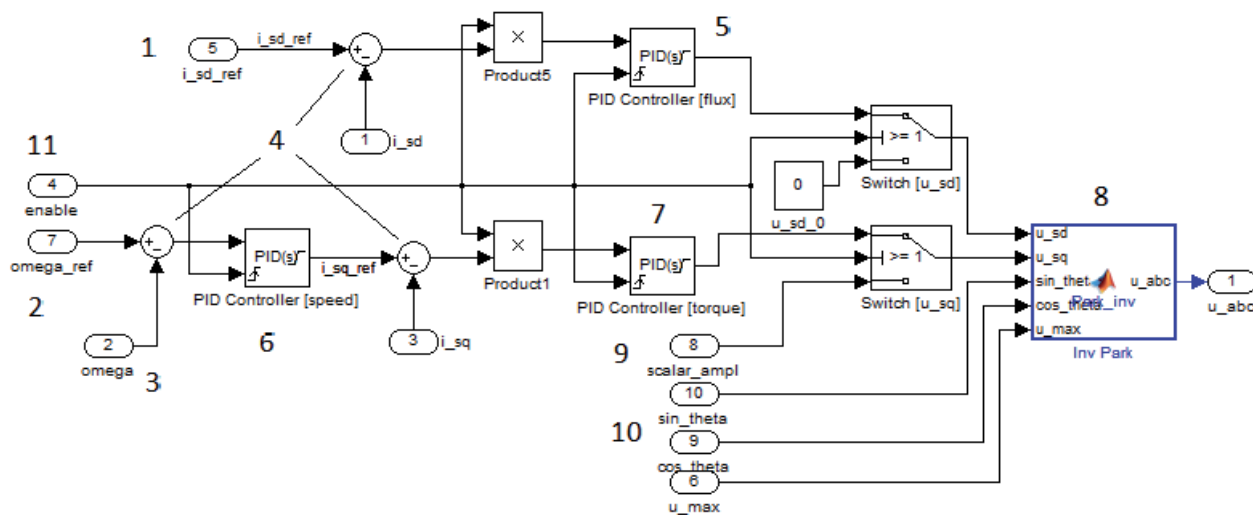


Рис. 8. Подсистема FOC

На Simulink-модели подсистемы FOC расположены: 1, 2, 3 – входы задания продольной составляющей тока статора, скорости вращения, текущего значения угла поворота магнитного поля машины; 4 – узлы вычитания сигналов обратной связи; 5, 6, 7 – ПИД-регуляторы магнитного потока, скорости и момента соответственно; 8 – преобразователь сигналов управления инвертором по уравнениям Парка (dq-ABC); 9 – вход задания амплитуды напряжения в скалярном режиме работы; 10 – значения sin и cos угла поворота поля для осуществления обратного преобразования Парка; 11 – переключатель скалярного и векторного режимов работы системы. Блок InvPark подсистемы FOC, осуществляющий преобразование координат выходных сигналов модели dq-ABC, является функцией, написанной на языке MATLAB. Соз-

данная модель тестируется на виртуальном асинхронном двигателе. Параметры АД приближены к реальному двигателю, что позволяет настроить все необходимые узлы системы управления перед испытаниями. Результаты запуска модели подтверждают ее работоспособность и представляют из себя типовые графики изменения величин при работе двигателя. После верификации модели инструментом EmbeddedCoder сгенерированы исходные (.c) и заголовочные файлы (.h) кода, которые с помощью компилятора Keiluvision встраиваются в проект, настроенный под контроллер STM32F407. Силовая схема преобразователя частоты содержит трехфазный инвертор напряжения и реализована на отечественных силовых модулях производства ЗАО «Протон-Импульс», г. Орел, марки 5П64GD-80-12-Д62.

Библиографические ссылки

1. Мельников А. В., Стародубцева В. А. Особенности расчета обращенного асинхронного двигателя // Приборостроение в XXI веке – 2014. Интеграция науки, образования и производства : сб. материалов X Всерос. науч.-техн. конф. с междунар. участием (Ижевск, 25–27 нояб. 2015 г.).

2. Стародубцева В. А. Расчет и проектирование электрических машин. Асинхронные машины : учебное пособие для вузов. – Ижевск : Изд-во ИжГТУ, 2005.

3. Красноперов Р. Н., Стародубцева В. А. Анализ рабочих характеристик стандартного и обращенного асинхронного двигателя // Молодые ученые – ускорению научно-технического прогресса в XXI веке [Электронный ресурс]:

электронное научное издание: сборник трудов II Всероссийской научно-технической конференции аспирантов, магистрантов и молодых ученых с международным участием, Ижевск, 22–23 апреля 2015 года.

4. Морозов А. В., Барсуков В. К., Морозов В. А. Моделирование работы матричного преобразователя частоты в среде графического программирования LabView // Федоровские чтения – 2014 : XLIV Международная научно-практическая конференция. – Издательство МЭИ, 2014.

5. Морозов А. В., Барсуков В. К., Морозов В. А. Моделирование матричного преобразователя частоты в SIMULINK // Интеллектуальные системы в производстве». – 2014. – № 2. – С. 140–144.

V. A. Morozov, PhD in Engineering, Associate Professor, Kalashnikov ISTU

V. A. Starodubtseva, PhD in Engineering, Professor, Kalashnikov ISTU

A. V. Morozov, Senior Lecturer, Kalashnikov ISTU

Analysis of optimization of the high power actuator with non-standard low frequency stator voltage

This article describes how to find the optimal characteristics of an actuator when considering various combinations of efficiency ratios, weight and size, vibration and technical and economic parameters. Modeling of the electric control system in Simulink for programming of high performance controllers using Matlab software is presented.

Keywords: electric drive, induction motor, electric control system.

Получено: 04.04.16