

ISSN 2220-3699



Институт информационных технологий
и автоматизированных систем

Кафедра электротехники, электропривода
и промышленной электроники

АВТОМАТИЗИРОВАННЫЙ ЭЛЕКТРОПРИВОД И ПРОМЫШЛЕННАЯ ЭЛЕКТРОНИКА

*ТРУДЫ СЕДЬМОЙ ВСЕРОССИЙСКОЙ
НАУЧНО-ПРАКТИЧЕСКОЙ КОНФЕРЕНЦИИ*

**НОВОКУЗНЕЦК
23-24 НОЯБРЯ 2016 г.**

ISSN 2220-3699

**СИБИРСКИЙ ГОСУДАРСТВЕННЫЙ
ИНДУСТРИАЛЬНЫЙ УНИВЕРСИТЕТ**

**АВТОМАТИЗИРОВАННЫЙ ЭЛЕКТРОПРИВОД
И ПРОМЫШЛЕННАЯ ЭЛЕКТРОНИКА**

*ТРУДЫ СЕДЬМОЙ ВСЕРОССИЙСКОЙ
НАУЧНО-ПРАКТИЧЕСКОЙ КОНФЕРЕНЦИИ*

**НОВОКУЗНЕЦК
23-24 НОЯБРЯ 2016 г.**

УДК 621.34.001.2 (0758)

А 18

Автоматизированный электропривод и промышленная электроника: Труды Седьмой Всероссийской научно-практической конференции / Под общей редакцией В.Ю. Островляничка. — Новокузнецк: изд-во СибГИУ, 2016 г. — 317 с., ил.

ISSN 2220-3699

Сборник содержит труды VII Всероссийской научно-практической конференции. В докладах представлены результаты научных исследований и практических приложений по проектированию, созданию математических моделей, теоретических основ энергосберегающего автоматизированного электропривода с традиционным и микропроцессорным управлением, решению проблем электроснабжения электрических установок и учета электрической энергии. Рассматриваются решения, ориентированные на применение в производстве и учебном процессе.

Сборник предназначен для научных работников, инженерно-технических работников предприятий, преподавателей вузов, аспирантов и студентов.

Под общей редакцией: д.т.н., проф. Островляничка В.Ю.

ISSN 2220-3699

© Сибирский государственный
индустриальный университет, 2016

ВВЕДЕНИЕ

Непрерывное развитие и совершенствование технологических процессов, требование повышения их технико-экономических показателей и безопасности труда вызывают необходимость совершенствования и систем электропривода. Существенную роль при этом приобретает, построенный с применением микропроцессорных средств управления, электропривод как энергетическая основа и инструмент совершенствования традиционных и современных технологий. Современный электропривод — сложнейший электромеханический комплекс, выход из строя которого приводит к нарушению рабочего процесса и может быть причиной несчастных случаев. Поэтому дальнейшее совершенствование систем электропривода невозможно без прогресса в области силовой и слаботочной электроники, вычислительной техники. Возможность использования микропроцессорной техники в системах управления является предпосылкой создания принципиально новых электромеханических систем, с новым более высоким уровнем автоматизации электропривода на основе микропроцессорного управления, эффективного как для его потребителей, так и для проектировщиков и изготовителей, и пока, к сожалению, не достигнутая в полной мере отечественной наукой.

Поэтому особое внимание уделяется не только прикладным применениям, но и также решениям, ориентированным на применение в учебном процессе.

Конференция привлекла внимание специалистов из различных городов России и ближнего зарубежья, в частности, Абакана, Брянска, Караганды, Кемерово, Новокузнецка, Новосибирска, Новочеркасска, Саратова, Санкт-Петербурга и иных городов.

Реквизиты оргкомитета: 654007 г. Новокузнецк Кемеровской области, ул. Кирова, 42. Телефоны: (3843) 78-44-14, (3843)74-89-87, факс (3843) 46-31-74, (3843)74-89-87; e-mail: confaep2016@mail.ru

СЕКЦИЯ 1

Теоретические аспекты и методология построения
современного электропривода

УДК 681.586

ИМИТАЦИОННАЯ МОДЕЛЬ ПРОЦЕССА РЕКУПЕРАТИВНОГО ТОРМОЖЕНИЯ СОСТАВА МЕТРОПОЛИТЕНА С РЕКУПЕРАТОРОМ ЭНЕРГИИ

В.Н. Аносов, В.М. Кавешников

*Новосибирский государственный технический университе,
г. Новосибирск*

В работе приводятся результаты разработки модели и имитационного моделирования процесса торможения состава метрополитена с рекуператором энергии. Подтверждена перспектива применения рекуператоров без использования накопителей энергии.

Ключевые слова: имитационное моделирование, рекуператор, энергоэффективность, транзисторный инвертор

Система рекуперации энергии торможения электропоезда в сеть на метрополитене без применения каких-либо накопителей энергии имеет перспективы вследствие значительного повышения энергоэффективности, безопасности, долговечности и надежности [1]. Такая система может быть создана на базе рекуператора, основой которого служит современный транзисторный инвертор, ведомый сетью. В настоящее время эти инверторы получили широкое распространение, имеют высокую надежность и сравнительно небольшую стоимость.

Такая система описывается десятками нелинейных дифференциальных, алгебраических и логических уравнений, поэтому ее аналитическое исследование практически невозможно, что приводит к следующей постановке задачи.

Необходимо создать имитационную модель для исследования и дальнейшей разработки системы рекуперации энергии торможения электропоезда для метрополитена, адекватно отражающую электрические, электромеханические и энергетические процессы в различных элементах системы.

Система рекуперации содержит электрические, электромеханические и электронные элементы, работа которых носит как аналоговый, так и дискретный характер и имеет широкий диапазон частотных свойств.

Поэтому для разработки модели выбрана инструментальная среда Simulink, которая реализует имитационное моделирование сложных динамических объектов. Simulink обладает обширной библиотекой готовых моделей элементов, относящихся к области энергетики, электромеханики и силовой электроники, необходимых для создания модели системы рекуперации.

Поскольку Simulink является хорошо апробированной системой, имитационная модель, построенная на его основе, обладает надежной адекватностью. В дальнейшем используется одна из последних версий системы моделирования Matlab.

Результаты моделирования дают возможность сделать следующие выводы.

1. Разработанная имитационная модель предлагаемой системы рекуперации энергии торможения с высокой степенью вероятности обладает адекватностью, что подтверждается:

- построением в среде Simulink, использующей готовые модели блоков, многократно апробированные в различных научно-технических областях для широкого круга задач;

- результатами, полученными в ходе проведенных модельных экспериментов, полностью соответствующим физическим представлениям о работе подобных систем;

- анализом баланса мощностей в моделируемой системе.

2. Эффективность рекуперации энергии в сеть определяется качеством системы управления рекуператором. В частности, применяемый в данной работе простейший пропорциональный регулятор напряжения в звене постоянного тока не может дать требуемого качества системы при рекуперации энергии в сеть.

Список использованной литературы

1. В.М.Кавешников, Е.А.Ливанова. Анализ возможных путей использования энергии рекуперации на метрополитене // Сб. науч. трудов НГТУ. – 2016. - №7. Электроэнергетика, электромеханика и электротехнологии.

УДК 621.31-83-52

МОДЕЛЬ ВОЛНОВЫХ ПРОЦЕССОВ В СИСТЕМАХ ДЛИННЫЙ ВАЛ И КАНАТ ПОДЪЁМНЫХ УСТАНОВОК ГЛУБОКИХ ШАХТ

М. Ю. Борщинский

*Сибирский государственный индустриальный университет
г. Новокузнецк*

Предложено математическое описание колебательных и волновых процессов в упругом вале на основе струны с точки зрения последствий, приводящих к фреттинг-износу и возникновению трещин в местах неподвижных соединений с подшипниками и барабаном.

Ключевые слова: колебательные и волновые процессы, фреттинг-износ, собственные колебания, упругий вал, поперечные колебания вала.

Колебательные процессы в длинных валах и канатах приводят к резкому возрастанию динамических нагрузок и к интенсивному износу механических соединений валов, канатов, силового электромеханического оборудования, к аварийному выходу из строя подъемных сосудов, разгрузочных направляющих, электродвигателей. Увеличиваются деформации проволок каната и снижается их прочность, возрастает вероятность возникновения аварий технологического оборудования с вынужденной остановкой производственного процесса. Колебательные процессы [1, 2, 9, 10] сопровождаются фреттинг-износом [1] и провоцируемой им коррозией в местах неподвижных соединения упругого вала с подшипниками и барабаном, возникновению трещин, приводящих к ускоренному износу барабана и подшипников.

Упругий вал и канат в шахтной подъёмной установке (ШПУ) работают не изолировано, а в составе электромеханической системы, обеспечивающей перемещение сосудов с грузом. Наиболее полное обобщение ранее накопленного опыта по разработке моделей электромеханической части ШПУ при учёте упругих и волновых свойств длинных канатов в системе “канат – механическая часть” практически впервые выполнено в работах [2, 3, 9]. В этих работах предпринята попытка создания модели механической части ШПУ с распределёнными массами с учётом волновых динамических свойств канатов.

Длинный канат ШПУ глубокой шахты в совокупности с упругим валом и электромеханической частью представляет собой сложную систему с распределёнными массами, в том числе и по длине каната. Абсолютно точное моделирование такой системы вряд ли возможно, так что неизбежны определённые упрощающие допущения, существенно не искажающие характер процессов, но облегчающие их моделирование.

Поперечные колебания упругого вала, закреплённого в подшипниках аналогичны поперечным колебаниям закреплённой на обоих концах струны, поэтому построение теории колебаний вала выполним на базе теории колебаний струны, которые описываются волновым уравнением

$$\frac{\partial^2 h(x,t)}{\partial t^2} = v_k \frac{\partial^2 h(x,t)}{\partial x^2} + \frac{f_k(x,t)}{m_k}, \quad v_k = \sqrt{\frac{T_k}{r}}, \quad f_k(x,t) = 0 \quad (1)$$

соответственно при граничных и начальных условиях

$$h(x,t)|_{x=0} = 0, \quad h(x,t)|_{x=L_k} = 0, \quad (2)$$

$$h(x,0)|_{t=0} = f(x,0), \quad \frac{\partial h(x,t)}{\partial t}|_{t=0} = F(x,0), \quad (0 \leq x \leq L_k), \quad (3)$$

где t – время; $h(x, t)$ – поперечное перемещение сечения струны с произвольной координатой x ; L_k – длина струны; r – линейная плотность материала струны T_k – натяжение струны, f_k – внешняя сила, m_k – масса струны. Этим же волновым уравнением и начальными условиями в [2, 3, 4] описываются поперечные колебания и волновые процессы в стержне со свободными обоими концами, а также с одним закреплённым концом.

В электромеханических системах ШПУ для намотки каната используются барабан. Схема горизонтально расположенного вала с барабаном приведена на рисунке 1. Вал совершает волновые колебания на закручивание вдоль оси и кроме того совершает высокочастотные колебания в поперечном направлении от радиального воздействия каната на барабан, направленного перпендикулярно к оси вращения вала. Разрушительное воздействие фреттинга на подшипники, шестерни редукторов, соединительные муфты, барабаны, в которых развиваются коррозия и появляются трещины. Негативные действия усугубляются неизбежными зазорами в ряде подвижных соединений редукторов, соединительных муфт.

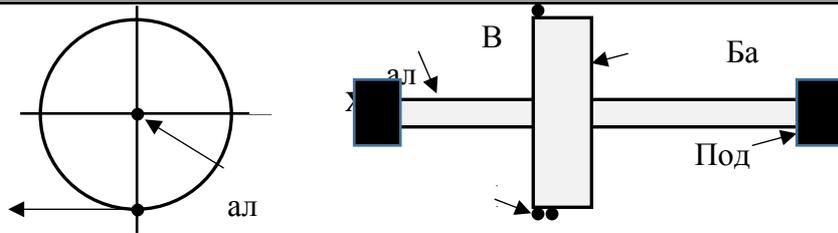


Рисунок 1 – Вал с барабаном, сила натяжения каната f_b
закручивает и изгибает вал

Согласно исследованиям М. Ф. Глушко *продольные, крутильные и поперечные колебания протекают независимо и существенно взаимного влияния не оказывают* и могут исследоваться независимо. Если ось переменной x расположить горизонтально и перпендикулярно оси вала, то проекция силы инерции на ось x определит составляющую пространственных поперечных синусоидальных колебания вала в горизонтальной плоскости в направлении оси x перпендикулярно оси вала (рисунок 1). Малая амплитуда колебаний оставляет неподвижными концы вала длиной L_b , закрепленные в подшипниках не исключая разрушающих колебательных изгибающих усилий.

Наиболее близкой к задаче поперечных колебаний упругого вала является задача поперечных колебаний струны, закреплённой с обоих концов, которая послужила основой для построения теории продольных и крутильных волновых процессов, и колебаний. Анализируя процессы в струне выявим компоненты теории, которые препятствуют ее применению для исследования поперечных колебаний упругих валов, а в последующем и для исследования крутильных волновых колебаний валов и продольных колебаний длинных канатов.

Исследование свободных (собственных) поперечных колебаний струны выполним на основе широко применяемого метода Фурье. Эта задача авторами [2, 4, 5, 6, 7] и современных изданий сводится к решению уравнения (1) при граничных (2) и универсальных начальных условиях (3), причём искомую переменную $h(x,t)$ представляют в виде произведения двух вспомогательных переменных

$$h(x,t) = T(t)X(x), \quad (0 \leq x \leq L_b, 0 \leq t \leq \infty) \quad (4)$$

благодаря чему волновое уравнение (1) преобразуют в два однородных обыкновенных дифференциальных уравнения второго

порядка:

$$X(x) + IX(x) = 0, \quad (0 \leq x \leq L_b), \quad (5,a)$$

$$T(t) + v_b^2 IT(t) = 0, \quad (0 \leq t \leq \infty), \quad (5,b)$$

общие решения (общие интегралы) которых имеют соответственно вид

$$X(x) = C_1 \cos(\sqrt{I} x) + C_2 \sin(\sqrt{I} x), \quad (6,a)$$

$$T(t) = C_3 \cos(v_b \sqrt{I} t) + C_4 \sin(v_b \sqrt{I} t), \quad (6,b)$$

Переход к вспомогательным переменным $X(x)$ и $T(t)$ привел к необходимости преобразования граничных условий (3) для переменной $h(x,t)$ к граничным условиям вспомогательной переменной $X(x)$. В источниках [2, 4, 6] без обоснования принимается

$$X(0) = 0, \quad X(L_b) = 0, \quad (6,c)$$

хотя изучение источников [2, 4, 5, 6, 8] (особенно источника [4], ориентированного на прикладные технические задачи) показало, что эта операция далеко не всегда очевидная.

С учётом нулевых граничных условий (1.9) и общего решения (6,a) уравнения (5,a) получают $C_1 \cdot 1 + C_2 \cdot 0 = 0$, $C_1 \cos(\sqrt{I} L_b) + C_2 \sin(\sqrt{I} L_b) = 0$ из которых следует, что $C_1 = 0$ и кроме того $C_2 \sin(\sqrt{I} L_b) = 0$. Поскольку выражение $\sin(\sqrt{I} L_b)$ не равно тождественно нулю, то имеют $C_2 = 0$ и $X(x) = 0$. Получили тривиальное нулевое решение по отношению к вспомогательной переменной $X(x)$. Если подставить в (4), то получим $h(x,t) = T(t) X(x) \equiv 0$, а также нулевое тривиальное решение и для волнового уравнения (1), откуда следует, что струна находится в состоянии покоя и в силу тривиальности решения удовлетворяются и граничные условия (2). Но решение $X(x) \equiv 0$, - решение задачи с нулевыми начальными условиями и не соответствует решаемой задаче с ненулевыми начальными условиями (3).

Подстановка $X(t)$ и $T(t)$ из (6) в (4) даёт общее решение волнового уравнения (1) с граничными условиями (2) и начальными условиями (3)

$$h(x,t) = [C_1 \cos(\sqrt{I} x) + C_2 \sin(\sqrt{I} x)] \cdot [C_3 \cos(v_b \sqrt{I} t) + C_4 \sin(v_b \sqrt{I} t)]. \quad (7)$$

Причина возникшей проблемы состоит в том, что

вспомогательное уравнение (5,а), является составной частью общего решения (7) волнового уравнения (1). И как маятник не начнёт колебаться, если его грузик не отклонить в сторону от линии покоя, так и струна не начнёт колебаться, если её не оттянуть в сторону, создав тем самым ненулевые начальные условия, а затем отпустить. В результате начнутся свободные (собственные) колебания - следствие прекращения внешнего воздействия. Но учесть не нулевые начальные условия вспомогательного уравнения (5, а) не в состоянии, у него отсутствует механизм учёта ненулевых начальных условий.

Создатели метода Фурье и авторы источников [2, 4, 6, 7, 8] возникшую проблему решают без использования начальных условий (3). Поскольку в то время теория дифференциальных уравнений находилась на стадии становления, естественным образом их внимание привлекла задача на собственные числа Штурма-Лиувилля [8], применяемая к дифференциальным уравнениям с параметром. В решении задачи внушает недоверие её трактовка в работе [4] и во всех последующих источниках. Показав, что граничному условию $X(0)$ соответствует $C_1 = 0$ и чтобы избежать тривиального решения $X(x) \equiv 0$, авторы [4] используют следующее доказательство - “мы должны считать $C_2 \neq 0$, ибо в противном случае $X(x) \equiv 0$,” звучит как “поскольку нас не устраивает нулевое тривиальное решение, будем считать что $C_2 \neq 0$ ”.

Доказательность теории достигается в следующем изложении. Приравняв общее решение (6,а) граничному условию $X(0)=0$, получим $C_1=0$, а уравнение (6,а) при этом примет вид

$$X(x) = C_2 \sin(\sqrt{I} x), \quad (8,а)$$

решение которого в соответствии с (7) удовлетворяет граничному условию $X(0)=0$, но не удовлетворяет граничному условию $X(L_b) = 0$. Удовлетворение граничному условию $X(L_b)=0$ в соответствии с задачей на собственные числа достигается выполнением соотношения

$$\sqrt{I} = kp / L_b, \quad (k = 1, 2, 3, \dots), \quad (8, b)$$

в результате функция (1.9,а) принимает вид

$$X(x) = C_2 \sin\left(\frac{kp}{L_b} x\right), \quad C_2 \neq 0, \quad (k = 1, 2, 3, \dots). \quad (8,с)$$

Функция $X(x)$ в (7,а) удовлетворяя граничным условиям (7),

одновременно неявным образом учитывает пока неизвестные ненулевые начальные условия (3), поскольку в интервале $0 < x < L_b$ в соответствии с функцией синус имеет не нулевые значения.

Подставив выражение для $X(x)$ из (8,с), а выражение для $T(t)$ из (6,b) в функцию (4), авторы [2, 4, 5, 6, 7] получают решение волнового уравнения (1), определяемое гармоникой с номером k

$$h(x,t) = \left[C_{32} \cos\left(\frac{v_b k p}{L_b} t\right) + C_{42} \sin\left(\frac{v_b k p}{L_b} t\right) \right] \sin\left(\frac{k p}{L_b} x\right) \\ (k = 1, 2, 3, \dots), \quad C_{32} = C_3 C_2, \quad C_{42} = C_4 C_2.$$

Суммируя решения по всем гармоникам получают бесконечный ряд Фурье

$$h(x,t) = \sum_{k=1}^{\infty} \left[C_{32} \cos\left(\frac{v_b k p}{L_b} t\right) + C_{42} \sin\left(\frac{v_b k p}{L_b} t\right) \right] \sin\left(\frac{k p}{L_b} x\right). \quad (9)$$

Решение безукоризненное, удовлетворяет как поставленной задаче, так и задаче на собственные числа Штурма-Лиувилля, но при любых значениях постоянных C_{32} и C_{42} . Чтобы удовлетворить начальным условиям (3) ряд (9) дифференцируют по t , а полагая в обоих рядах $t=0$ получают выражения для начальных условий

$$h(x,0) = f(x) = \sum_{k=1}^{\infty} C_{32} \sin\left(\frac{k p}{L_b} x\right), \\ \frac{d}{dt} h(x,t) |_{t=0} = F(x) = \sum_{k=1}^{\infty} \frac{v_b k p}{L_b} C_{42} \sin\left(\frac{k p}{L_b} x\right) \quad (10)$$

Начальные условия из (10) должны совпадать с заданными начальными условиями (3), после сравнения рядов получают формулы для определения постоянных C_{32} и C_{42} .

$$C_{32} = \frac{2}{L_b} \int_0^{L_b} f(x) \sin\left(\frac{k p}{L_b} x\right) dx, \quad C_{42} = \frac{2}{k p v_b} \int_0^{L_b} F(x) \sin\left(\frac{k p}{L_b} x\right) dx. \quad (11)$$

Вывод формул (11) в работе [8] и других последующих источниках вызывает серьёзные опасения в корректности. Дело в том, что значения коэффициентов ряда Фурье функции начальных условий (3) присвоены коэффициентам решению (6,b) вспомогательного уравнения (5,b), зависящего от t и входящего сомножителем в результирующее решение (9).

В сложных электромеханических системах начальные и текущие условия формируются системой и изменяются в процессе работы системы и по своей сути являются организующим началом,

и в связи с их изменением динамически изменяются коэффициенты C_3 и C_4 . В методе Фурье такая возможность отсутствует. Поскольку начальные условия являются продуктом завершения внешнего воздействия, напрашивается вывод, что исследования следовало начать с формирования начальных условий и их использования. Но проблема в том, что в методе Фурье этот подход реализовать невозможно, поскольку процесс исследования начинается с использования решения (6,а) вспомогательного уравнения (5,а) без учёта влияния решения (6,б) вспомогательного уравнения (5,б), функционально с ним связанного зависимостью (4). Это вызывает необходимость исключить локальное исследование вспомогательного уравнения (5,а), а начинать исследования с функции общего решения (7) волнового уравнения (1).

Список источников

1. Степанов А.Г.. Динамика машин [Текст] / Степанов А.Г. - Екатеринбург: УрО РАН, 1999. - 304 с.
2. Католиков В.Е. Автоматизированный электропривод подъемных установок глубоких шахт [Текст] / В.Е. Католиков, А.Д. Динкель, А.М. Седунин. – М.: Недра, 1983. – 270 с.
3. Кошляков Н.С. Уравнения в частных производных математической физики [Текст]: учеб. пособие для мех.-мат.ун-тов / Н.С. Кошляков, Э.Б. Глинер, М.М. Смирнов. – М.: Высшая школа, 1970. – 712 с.
4. Кузнецов А.В. Методы математической физики: Учеб. пособие [Текст] / А.В. Кузнецов – Яросл. гос. ун-т. Ярославль, 2004. – 200 с.
5. Пискунов Н.С. Дифференциальное и интегральное исчисления [Текст] / Н.С. Пискунов, т.2. Учебник для вузов. – М.: Интеграл-Пресс, 2001. – 544 с.
6. Ремонт барабана шахтной подъемной машины ЦШ 5x8 скиповая, ствол главный, шахта “Соколовская” АО “ССГПО”, Рудный [Электронный ресурс] / <http://www.sabaros.ru/docs/remont-barabana-shpm-csh-5x8-ssgpo.pdf>, 2011. – 3 с.
7. Фарлоу С. Уравнения с частными производными для научных работников и инженеров [Текст] / С. Фарлоу, пер. с англ.- Мир, 1985. – 384 с.

8. Тихонов А.Н. Дифференциальные уравнения [Текст] / А.Н. Тихонов, А.Б. Васильева, А.Г. Свешников, Москва “Наука”, гл. ред. физико-математической литературы. 1980. – 232 с.

9. Борщинский М.Ю. Обзор источников по динамическим процессам в канатах глубоких шахт [Текст] / М.Ю. Борщинский, П.Н. Кунин, Новокузнецк, Сибирский государственный индустриальный университет, Труды Четвертой Всероссийской научно-практической конференции, 2010, с. 193-201.

10. Борщинский М.Ю. К исследованию трёхмассовых электромеханических систем шахтных подъёмных установок [Текст] / М.Ю. Борщинский, В.Ю. Островляничик, Новокузнецк, Сибирский государственный индустриальный университет, Шестая всероссийская научно-практическая конференция "Автоматизированный электропривод и промышленная электроника", 2014, с. 6-12.

УДК 681.5

НЕЙРОСЕТЕВОЙ ПРЕДИКТОР ДЛЯ ОБЪЕКТА С ПЕРЕМЕННЫМ ЗАПАЗДЫВАНИЕМ

М.В. Бураков

*Санкт-Петербургский государственный университет
аэрокосмического приборостроения*

Рассматривается нейросетевая модернизация предиктора Смита для систем электропривода с переменным запаздыванием. Приводятся примеры моделирования в *MatLab Simulink*, подтверждающие работоспособность предлагаемой схемы.

Ключевые слова: нейронная сеть, ПИД-регулятор, предиктор Смита, электропривод.

Системы с запаздыванием образуют важный класс систем автоматического управления, поскольку звено запаздывания вносит отрицательный сдвиг фазы, способный привести к потере устойчивости.

В системах управления с запаздыванием может использоваться предиктор Смита [1], цель которого – предсказать, какой сигнал

должен появиться на выходе до того, как он там появится на самом деле. Обычно используется комбинация ПИД-регулятора и предиктора Смита [2]. Для предсказания используется модель объекта управления, состоящая из передаточной функции $W_m(s)$ и транспортной задержки Δ (рис. 1).

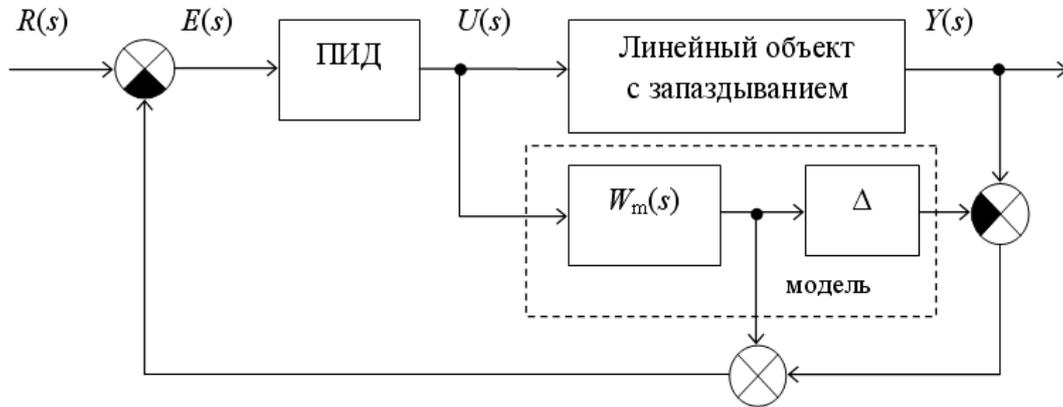


Рисунок 1 – Вариант описания предиктора Смита

Можно считать, что звено с транспортной задержкой не входит в контур обратной связи и не влияет на устойчивость и быстродействие системы, то есть происходит регулирование в контуре с моделью без запаздывания, а транспортная задержка прибавляется к полученному результату.

Однако предиктор Смита требует точного знания всех параметров системы, что на практике часто невозможно. Кроме того, задержка на выходе системы может быть переменной, что не позволяет настроить задержку модели.

Рассмотрим пример системы управления с ПИД-регулятором (рис. 2).

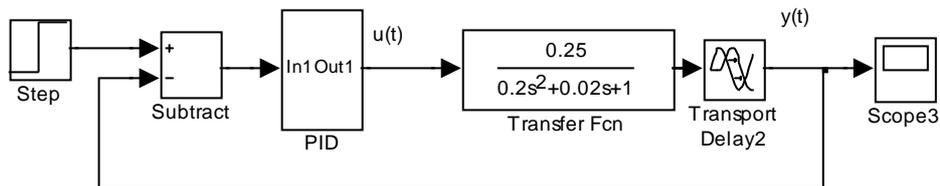


Рисунок 2 - Блок-схема системы управления в *MatLab*.

На рис. 3 приведены переходные процессы в системе.

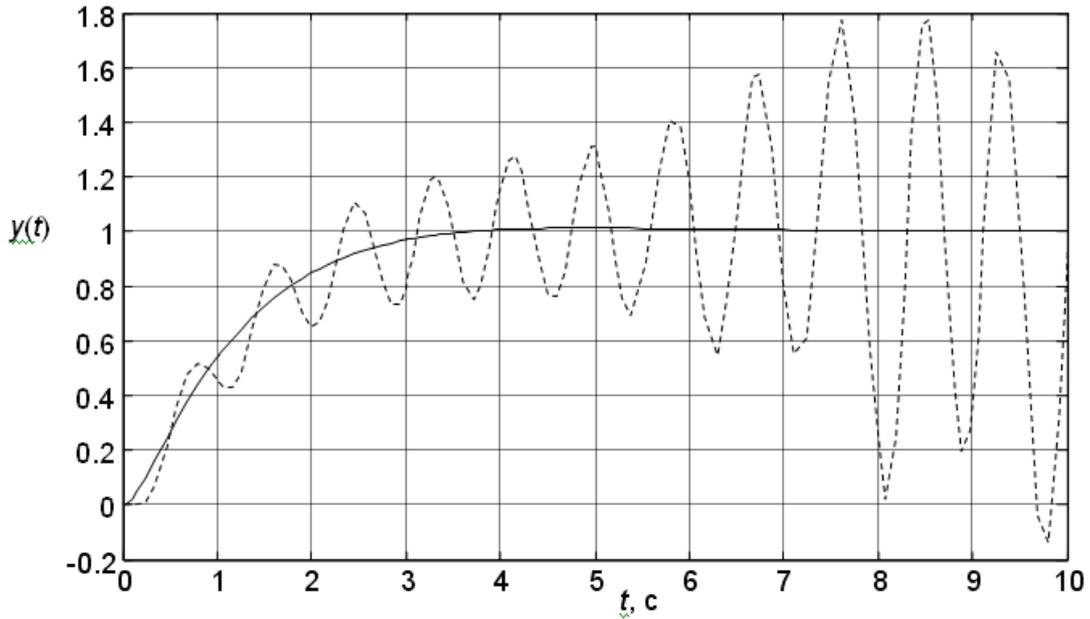


Рисунок 3 - Реакция системы на единичный скачок при $\Delta = 0$ (сплошная) и при $\Delta = 0.18$ с (пунктир).

Таким образом, система теряет устойчивость при $\Delta \geq 0.18$ с. Использование предиктора Смита (рис. 4) позволяет сохранить вид переходного процесса.

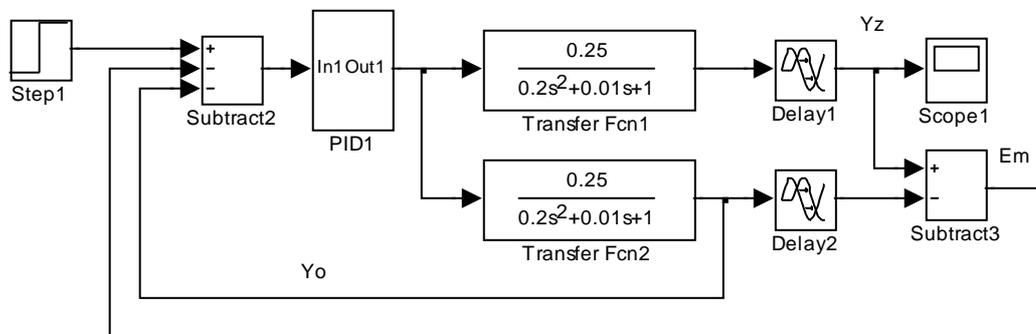


Рисунок 4 - Блок-схема системы с предиктором.

Однако, как показывает рис. 5, качество работы системы быстро ухудшается, если $Delay1 \neq Delay2$.

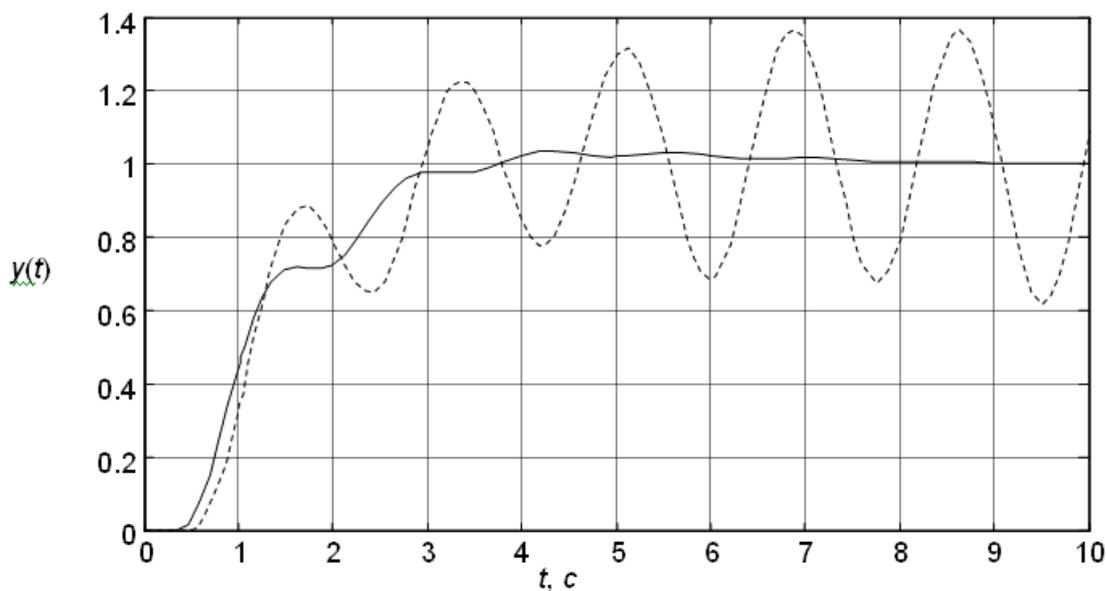


Рисунок 5 - Переходные процессы в схеме с предиктором: Delay1 = 0.2с, Delay2 = 0.38с. (сплошная) и Delay1 = 0.2с, Delay2 = 0.5 с (пунктир).

Для обеспечения работоспособности системы в широком диапазоне изменения задержки предлагается схема с искусственной нейронной сетью (ИНС) прямого распространения. Поскольку обратная связь содержит два слагаемых (рис. 1 и 4), одно из которых от задержки не зависит, то ИНС должна вырабатывать корректирующий сигнал как функцию ошибки выхода системы (рис. 6).

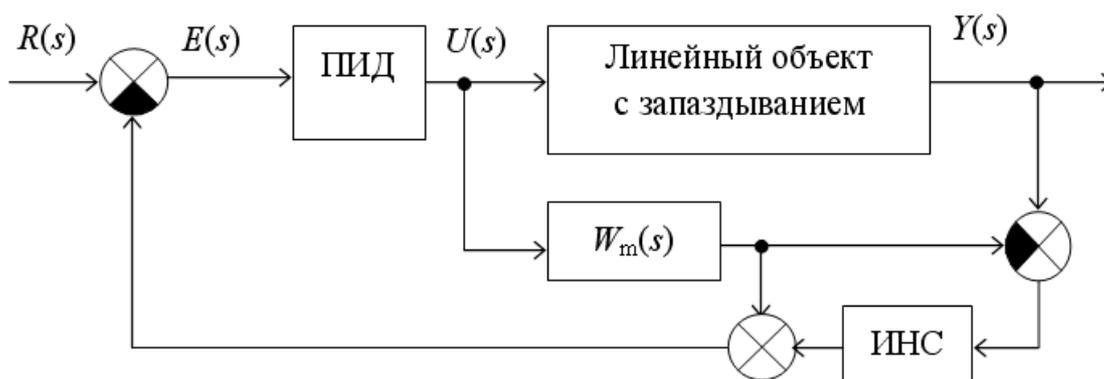


Рисунок 6 – Предиктор для объекта с переменным запаздыванием

Обучающая выборка для ИНС с одним входом и одним выходом формировалась путем нескольких запусков схемы предиктора Смита (рис. 4) с различными значениями задержки. Полученные массивы Y_z и E_m рассматривались как вход и

желаемый выход ИНС. Включение обученной ИНС показано на рис. 7.

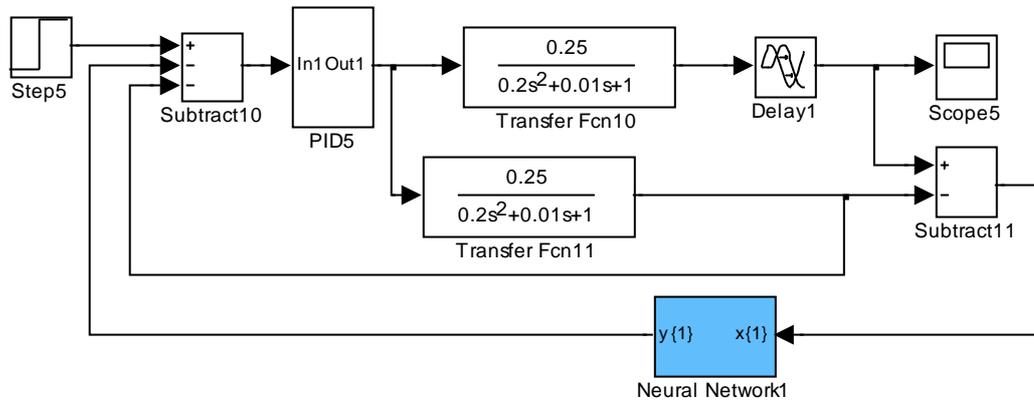


Рисунок 7 – Реализация предиктора в *MatLab*

Для обучения ИНС был применен алгоритм обратного распространения ошибки, реализованный в *MatLab* [3].

Как показали вычислительные эксперименты, достаточным оказывается использование 2-х слойной ИНС с пятью нейронами скрытого слоя и одним нейроном выходного слоя.

На рис. 8 приведены результаты моделирования предиктора с однократно обученной ИНС для различных значений задержки на выходе объекта.

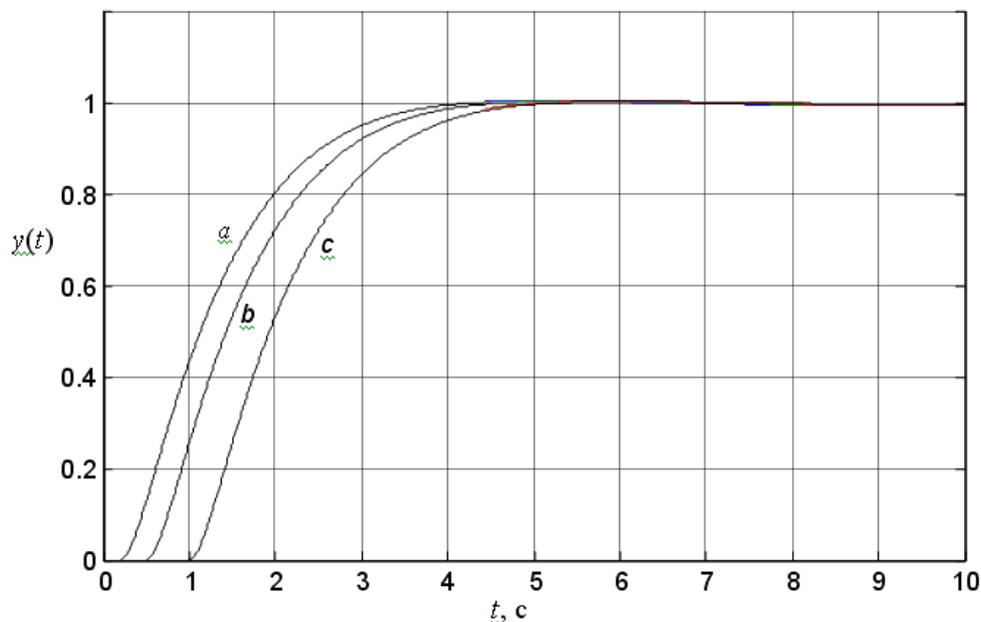


Рисунок 8 – Переходные процессы в системе с переменной задержкой: $a - 0,2$ с.; $b - 0,5$ с.; $c - 1$ с.

Таким образом, проведенные эксперименты подтверждают практическую значимость предлагаемой схемы модификации предиктора Смита с помощью ИНС. Обеспечивается устойчивость и заданная форма переходного процесса при вариации задержки в широком диапазоне значений. Реализация нейронной сети функций не может вызывать существенных трудностей при использовании современной микропроцессорной техники.

СПИСОК ИСТОЧНИКОВ

1. Smith J. M. Closer control of loops with dead time // Chem.Eng. Prog. 1959. №53. P. 217–219.
2. Денисенко В. В. ПИД - регуляторы: принципы построения и модификации // Современные технологии автоматизации. 2007. № 1. с. 78 - 88.
3. Бураков М.В. Нейронные сети и нейроконтроллеры // СПб: ГУАП, 2013г. 284с.

УДК 62-837

ОБЗОР ВЕНТИЛЬНОГО ЭЛЕКТРОПРИВОДА

А.С. Иванов, И.Ю. Каланчин

*Сибирский государственный индустриальный университет,
г. Новокузнецк*

В настоящее время все чаще начали выделять такой тип электрического привода, как вентильный электропривод. В зарубежной литературе вентильным электроприводом называют привод, основанный на электрических машинах не имеющих щеточно-коллекторного узла. Помимо традиционных асинхронных двигателей переменного тока к вентильным двигателям относят синхронные двигатели переменного тока, бесщеточные двигатели постоянного тока, синхронные реактивные двигатели и вентильно-реактивные двигатели.

Ключевые слова: электропривод, электродвигатель, частотный преобразователь, датчик положения ротора, вентильный электропривод.

С развитием микропроцессорной техники и электроники появляются передовые методы и алгоритмы управления

электрическими машинами. Современные технологии позволили обеспечить посредством использования силовых транзисторных ключей и микропроцессорной техники вентильный режим работы электрической машины. Подобный подход позволил по-новому взглянуть на многие типы электродвигателей, управление которыми невозможно было обеспечить до недавнего времени.

Наиболее широкое распространение получил электропривод, основанный на асинхронных двигателях переменного тока с короткозамкнутым ротором. Данный тип электропривода благодаря надежности конструкции и простоте эксплуатации получил признание почти во всех сферах производства.

В настоящее время в промышленности нашли применение электроприводы на основе бесколлекторных вентильных электродвигателей, таких как синхронные двигатели переменного тока с постоянными магнитами (Permanent magnet synchronous motors), бесколлекторные двигатели постоянного тока (Brushless direct current motors), синхронные реактивные двигатели (Synchronous reluctance motor), вентильно-реактивные двигатели (switched reluctance motor) и другие.

Конструкции электродвигателей представлены на рисунках 1 и 2.

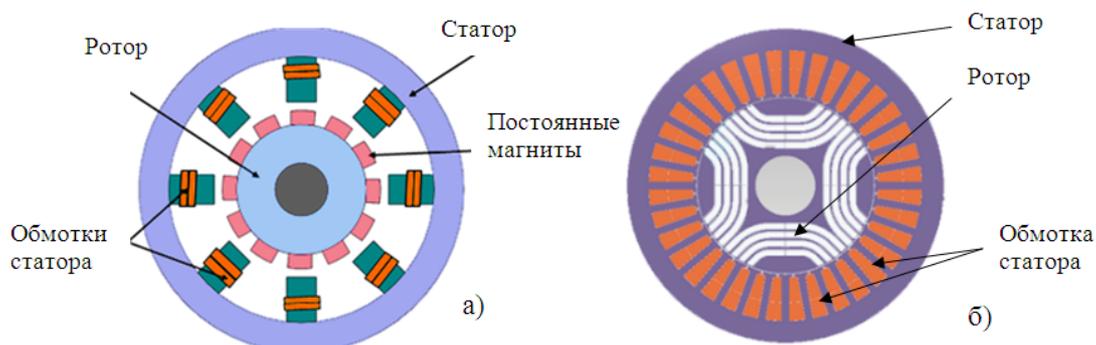


Рисунок 1 – Конструкция электродвигателей: а) синхронного с постоянными магнитами; б) синхронного реактивного двигателя

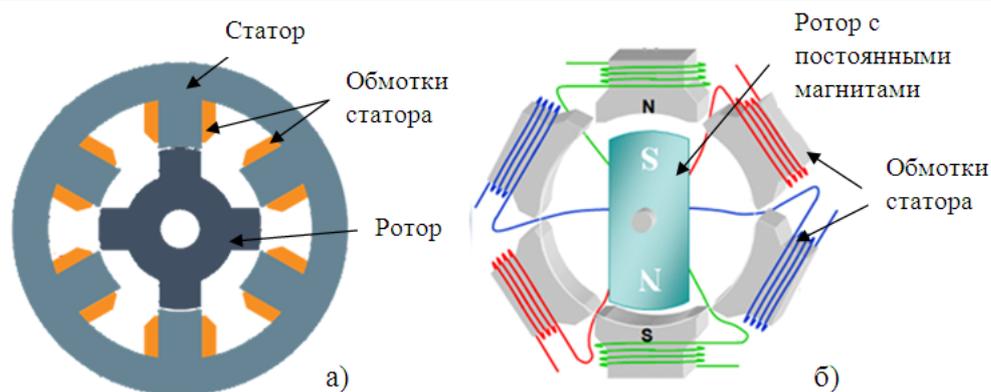


Рисунок 2 – Конструкция электродвигателей: а) вентильно-реактивного двигателя; б) бесколлекторного двигателя постоянного тока

У бесколлекторных двигателей постоянного тока возбуждение происходит за счет мощных магнитов, установленных на роторе. Электронный регулятор с определенной последовательностью попарно подает импульсы постоянного тока на обмотки статора, создавая вращающееся магнитное поле, которое взаимодействует с магнитным полем постоянных магнитов, установленных на роторе электродвигателя. Для определения последовательности включения катушек статора, электроника должна определять точное положение ротора относительно статора.

Синхронные двигатели с постоянными магнитами имеют схожую конструкцию статора с асинхронными двигателями переменного тока, а ротор выполнен с использованием постоянных магнитов. Конструкция ротора может иметь явно выраженные и неявно выраженные полюса. Кроме того, в зависимости от установки магнитов, ротор синхронных электродвигателей может быть выполнен с внутренней или с поверхностной установкой постоянных магнитов. Принцип действия таких двигателей состоит в том, что магнитное поле ротора всегда ориентируется по переменному магнитному полю статора, создается крутящий момент, который заставляет вращаться ротор.

Для нормальной работы синхронного двигателя переменного тока с постоянными магнитами требуется частотный преобразователь или сервопривод для обеспечения пуска машины с малых оборотов. Существует несколько методов управления

таким электроприводом. Например, синусоидальное векторное полеориентированное управление двигателем может осуществляться как с датчиком положения ротора, так и без него, однако последнее подходит только для машин с явновыраженными полюсами на роторе. Обе эти методики требуют наличия системы управления, обеспечивающие широкий диапазон регулирования скорости.

При трапецеидальном управлении с обратной связью посредством использования датчика Холла применяется более простая схема управления, но при таком способе появляются пульсации момента. Не используя датчик магнитного поля, схема управления усложняется и, помимо пульсаций, двигатель некорректно работает при низких значениях скорости вращения.

Преимущество бесколлекторных электродвигателей заключается в отсутствии скользящих контактов, тем самым упрощается конструкция и снижаются коммутационные потери. Такие машины имеют высокий диапазон регулировки скорости, высокий коэффициент полезного действия, а также бесколлекторные двигатели переносят высокую нагрузку по моменту.

К основным недостаткам можно отнести сложность обслуживания, высокие затраты на изготовление электронных систем управления и использование дорогостоящих постоянных магнитов в конструкции электродвигателя.

Бесколлекторные машины применяются для привода железнодорожного транспорта, гибридных автомобилей и электрокаров, а также в качестве генераторов электрической энергии.

Синхронные реактивные двигатели не имеют собственного магнитного поля ротора. Отличительная особенность этой машины – ротор специальной конструкции, который имеет сквозные полости. У электродвигателей прямого пуска полости заполнены немагнитизирующимся материалом (подобно беличьей клетке), образуя короткозамкнутую обмотку ротора. Существуют три основные конструктивные формы ротора: ротор с явновыраженными полюсами, поперечно-расслоенный ротор и аксиально-расслоенный ротор. Вращающий момент в таком двигателе возникает из-за различных магнитных проводимостей по

поперечной и продольной осям. Ротор электрической машины стремится ориентироваться относительно вращающегося магнитного поля статора с минимальным магнитным сопротивлением в магнитной цепи, а тангенциальные силы образуют вращающий момент.

Так как скорость вращения ротора таких двигателей напрямую зависит от частоты питающей сети, то для управления оборотами применяется частотный преобразователь.

Основные преимущества такого рода двигателей: низкая стоимость, за счет отсутствия редкоземельных металлов в составе конструкции, простота обслуживания и низкий момент инерции ротора. Недостатком синхронного реактивного двигателя является низкий коэффициент мощности, так как магнитный поток создается реактивным током.

Электроприводы, основанные на применении синхронных реактивных двигателей, используются на следующих механизмах: насосы, вентиляторы, компрессоры, экструдеры, конвейеры и на многих других.

Вентильный реактивный двигатель (Switched reluctance motor) имеет простейшую конструкцию среди всех существующих электрических машин. Статор машины набирается из шихтованного магнитомягкого материала, в пазы которого укладываются независимые катушки возбуждения. Ротор имеет явно выраженные полюса и так же, как и статор набирается из листового материала с большой магнитной проницаемостью без каких-либо обмоток, щеточно-коллекторного механизма и редкоземельных магнитных материалов. Статор трехфазного вентильно-реактивного двигателя базового исполнения имеет 6 явно выраженных полюсов, а ротор имеет 4 явно выраженных полюса. Обмотки статора, диаметрально расположенные напротив друг друга, подключены последовательно или параллельно к одной из фаз, питающих двигатель. Подобно бесколлекторным электродвигателям постоянного тока последовательное намагничивание катушек статора создает вращающее магнитное поле и, благодаря стремлению магнитной системы ротора принять положение с минимальной энергией, возникает крутящий момент.

Главными недостатками этих электрических машин является характер момента и магнитного поля. После анализа вентильных

СЕКЦИЯ 1. Теоретические аспекты и методология
построения современного электропривода

реактивных двигателей можно сделать вывод, что магнитное поле имеет дискретно-пульсирующий характер, что вызывает толчки и вибрации при работе двигателя. Также одной из основных проблем таких машин являются высокие пульсации момента, которые необходимо снизить путем разработки новых методов и алгоритмов управления, и возможно, разработкой усовершенствованной конструкции вращающейся части электродвигателя.

Таблица 1. Основные параметры представленных
электродвигателей.

	Мощность, кВт	Напряжение, В	Ток, А	Скорость, об/мин	КПД, %
Вентильно-реактивный двигатель	32	380	85	1800	93
Бесколлекторный двигатель постоянного тока	28	480	57	5000	92
Синхронный двигатель на постоянных магнитах	30	380	78	3000	90
Синхронный реактивный двигатель	30	400	66,7	1500	94,9

Вентильные реактивные двигатели могут применяться для механизмов мельниц, насосов, вентиляторов, дробилок, дымососов, для привода на судах, автомобилях, тракторах, шахтных подъемных машин, а также в качестве ветрогенераторов.

В таблице 1 приведены основные параметры вентильных электродвигателей.

Вентильный электропривод имеет большой потенциал. Снижение стоимости электронных компонентов управления и увеличение объемов производства позволит широко внедрять такой тип привода во многие технологические процессы. Упрощение конструкции позволит снизить общие затраты на производство и облегчить обслуживание вентильных электрических машин.

Список литературы

1. ГОСТ 27471-87 Машины электрические вращающиеся. Термины и определения.
2. Саввинов П. В. Обзор вентильно-реактивных двигателей / Саввинов П. В., Семёнов А.С. // Современные наукоемкие технологии. – 2013. – № 8-2. – С. 342-343.
3. Михайлов Д.Д. Пути повышения эффективности управления бесколлекторным двигателем / Михайлов Д.Д. // Вестник Казанского технологического университета. – 2015. – № 2-18. – С. 368-369.
4. Радимов И.Н. Исследования вентильного двигателя с внутренними постоянными магнитами при двух способах соединения фаз обмотки статора / Радимов И.Н, Рымша В.В, Гулый М.В, Кравченко П.А. // Электротехника и электромеханика. – 2010. – №6. – С. 35-38.

УДК 621.65:62-83

ПРЯМОЕ УПРАВЛЕНИЕ МОМЕНТОМ В АСИНХРОННОМ
ЭЛЕКТРОПРИВОДЕ ШГНУ

С.А.Кассем, Н.К. Андреев, Р.Т. Ахметгаряев.
*Казанский Государственный Энергетический
Университет, г.Казань*

Предложена система «бездатчикового» управления штанговым глубинным насосом на основе прямого управления моментом электропривода, которая за счет пробных изменений скорости хода находит и поддерживает режим добычи с минимальным расходом электроэнергии.

Ключевые слова: бездатчиковая, датчики, штанговый глубинный насос (ШГН), момент, электропривод.

Современный подход к автоматизации процессов нефтедобычи диктует жесткие требования к программно-аппаратным комплексам контроля и управления штанговыми глубинными насосами (ШГН). Это обусловлено истощением ресурсов нефтяных пластов, высокой стоимостью

электроэнергии, стремлением нефтяных компаний снизить затраты на ремонт скважин и более эффективно использовать свой персонал.

В настоящее время используются в той или иной степени автоматизированные станции управления (СУ), позволяющие проводить непрерывный контроль технологических параметров на скважинах и автоматически управлять процессом добычи. Применительно к скважинам, оборудованным штанговыми глубинными насосами, это означает проведение комплекса измерений: измерение динамограмм (зависимость усилия на полированном штоке от перемещения точки подвеса штанг), динамического уровня, ваттметрограмм (зависимость потребляемой мощности от перемещения точки подвеса штанг), влияния газового фактора, давления на устье скважины, суточной производительности скважины и других. Для выполнения этих функций некоторые из них оборудованы контроллерами, датчиками положения и нагрузки, блоками питания, дисками с программами, а также связью с центральным диспетчерским пунктом через канал Ethernet UTP-4. Такие станции управления обеспечивают также дистанционное включение и отключение приводного электродвигателя, аварийное отключение установки, периодический режим эксплуатации, плавное регулирование скорости вращения при помощи преобразователя частоты.

В альтернативных системах, работающих с приводами для ШГН установок в режиме прямого управления моментом, используются так называемые бездатчиковые системы, которые позволяют выполнять те же функции с меньшим количеством оборудования. Ниже приводятся характеристики СУ, описанные в работе.

Станция управления смонтирована внутри металлического электротехнического шкафа, снабжена панелью управления и сигнализации, системой поддержания температуры в шкафу в диапазоне от +5 до +35°C с аварийным отключением, если температура не попадает в этот диапазон, а также датчиком положения балансира станка-качалки (СК) ШГН.

СУ имеет следующие основные параметры:

- номинальное напряжение питающей сети
- номинальная частота питающей сети $f=50\pm 1$ Гц;

- климатическое исполнение УХЛ1 по ГОСТ 15150-69 (температура окружающей среды от -60 до +50 °С, относительная влажность воздуха 100% при температуре +25 °С;

- степень защиты IP31.

Функциональные возможности СУ:

- включение и отключение электродвигателя;
- выбор режимов работы «ручного» и «автоматического» управления;

- сохранение в памяти кодов аварий.

В ручном режиме:

- изменение числа качаний СК ШГН;

в автоматическом режиме:

- регулирование числа качаний СК ШГН в зависимости от заполняемости насоса и динамического уровня;

- функция двойной скорости с разными скоростями при ходе штока вверх и вниз, с сохранением средней заданной скорости;

- самозапуск электродвигателя при восстановлении напряжения сети после перерыва снабжения электроэнергией;

Должна обеспечить защиту:

- при обрыве штанг;
- при поступлении газа в насос;
- от опустошения насоса;
- температурная защита электродвигателя (с датчиком и без него);

- защиту электродвигателя по крутящему моменту;

- от короткого замыкания;

- при обрыве входной фазы;

- по току;

- по напряжению.

Станция управления (рис. 1) включает в себя шкаф управления 8, в котором расположены: преобразователь частоты 1, питающийся от трехфазной сети переменного тока, со встроенным контроллером, Ethernet-выход которого соединен с блоком радиоканала 2; силовой вход преобразователя частоты соединен с выходом магнитного пускателя 4, вход которого соединен с

выходом автоматического выключателя 7, соединенным с трехфазной сетью 380 В; катушка магнитного пускателя 4 соединена с релейным выходом блоком микроклимата 5, силовой вход которого соединен с автоматическим выключателем 6, соединенным с сетью напряжением 220 В; дискретный вход преобразователя частоты соединен с электромагнитным датчиком положения 3, который устанавливается под балансиром УШГН.

Станция управления состоит из преобразователя частоты со встроенным контроллером ACS800, питающимся от трехфазной сети переменного тока, трехфазного автоматического выключателя QF1, однофазного автоматического выключателя SF1, магнитного пускателя KM1, обогревателя с датчиком температуры R1, терморегулятора TP1 с датчиком температуры R2, вентилятора M, радиомодема, датчика положения, переключателя «Пуск/Стоп» SA1, кнопки «Сброс аварии» SB1, светодиодной индикационной лампы HL1.

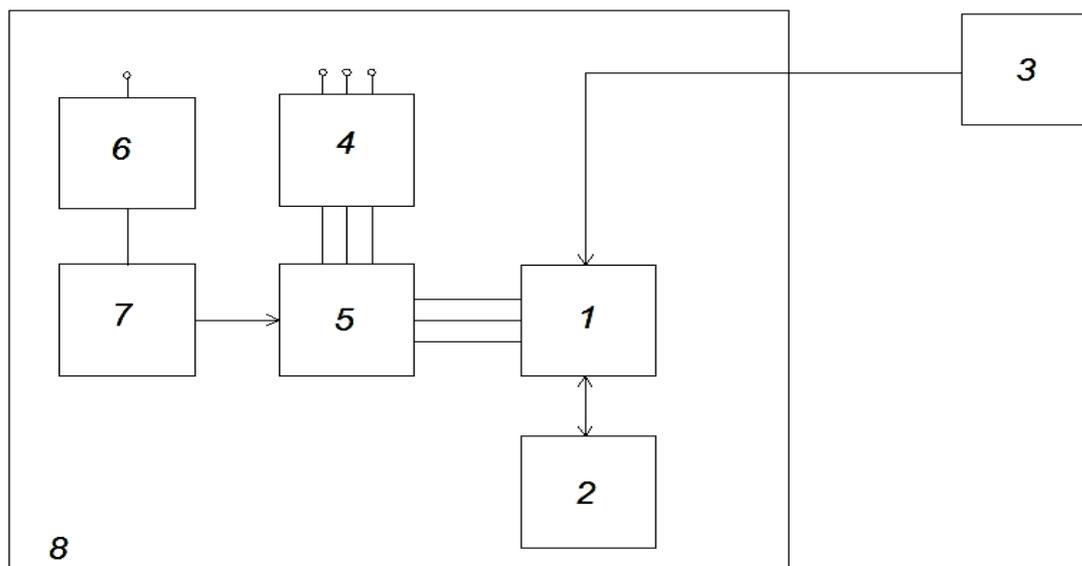


Рисунок 1 – Функциональная схема станции управления

Ниже в таблице приведены сводные данные показателей работы 11 скважин в НГДУ «Бавлынефть» и в НГДУ «Джалильнефть» до и после внедрения СУ «НКУ «СРН-1-ПЧ-К-ХХ». Для уменьшения объема таблицы в ней показаны только средние значения показателей по этим 11 скважинам, вычисленные по стандартным формулам.

Анализ данных таблицы показал, что:

СЕКЦИЯ 1. Теоретические аспекты и методология
построения современного электропривода

1. В результате внедрения разработанных станций управления в целом в расчете на одну скважину в 1,46 раза повысилась добыча водонефтяной эмульсии.
2. Средние значения суточного дебита нефти после внедрения СУ выросли в 1,75 раза по сравнению с предыдущими значениями.
3. Средние значения обводненности (содержания воды в нефти) после внедрения СУ сократились с 23,09% до 11,95%, то есть сократились 1,92 раза.
4. Напротив, средние значения расхода электроэнергии выросли в 1,19 раз.
5. Однако, как показал расчет, удельный расход электроэнергии на тонну добываемой нефти сократился в 1,57 раз.

Таблица 1. Сводные данные показателей работы скважин в НГДУ «Бавлынефть» и в НГДУ «Джалильнефть» до и после внедрения СУ «НКУ «СРН-1-ПЧ-К-ХХ»

№ пп	Наименование показателей	Значения показателей	Отношение показателей после внедрения к показателям до внедрения
1	Средние значения дебита жидкости до внедрения СУ, м ³ /сут	1,56	-
2	Средние значения дебита жидкости после внедрения СУ, м ³ /сут	2,27	1,46
3	Средние значения дебита нефти до внедрения СУ, т/сут	1,01	-
4	Средние значения дебита нефти после внедрения СУ, т/сут	1,75	1,75
5	Средние значения обводненности до внедрения СУ, %	23,09	-
6	Средние значения обводненности после внедрения СУ, %	11,95	0,52

СЕКЦИЯ 1. Теоретические аспекты и методология
построения современного электропривода

№ пп	Наименование показателей	Значения показателей	Отношение показателей после внедрения к показателям до внедрения
7	Средние значения расхода электроэнергии до внедрения СУ, кВт*час/сут	44,6	-
8	Средние значения расхода электроэнергии после внедрения СУ, кВт*час/сут	53,0	1,19
9	Средние значения удельного потребления электроэнергии до внедрения СУ, кВт*час/т	48,5	-
10	Средние значения удельного потребления электроэнергии после внедрения СУ, кВт*час/т	29,04	0,6

Итоговые отличительные особенности разработанной системы: применение прямого управления моментом электропривода и «бездатчикового» принципа управления. Система автоматически рассчитывает средний расход электроэнергии за цикл хода плунжера насоса вверх-вниз, делает пробные изменения скорости хода и находит условия, близкие к минимальному расходу электроэнергии, а затем поддерживает этот режим добычи, и, следовательно, поддерживается рациональный динамический уровень добываемой скважинной жидкости. Для повышения точности контроля расхода электроэнергии и регулирования момента и скорости в систему дополнительно введен датчик положения штока. За счет «сверхбыстрой» реакции ПУМ на изменения момента сопротивления и непрерывного режима добычи сокращаются ударные для механизмов и скважины режимы работы, удлиняется межремонтный период, сокращаются расходы на ремонт, сокращается удельный расход электроэнергии на добычу нефти. Структура системы упрощена по сравнению с другими аналогичными системами, за счет этого повышена надежность функционирования. Для повышения надежности в СУ доработана схема климат-контроля, так что обеспечен бесперебойный режим функционирования в условиях климата РТ и прилегающих территорий страны.

УДК 621.31-83-52

РЕКУПЕРИРУЮЩИЙ АСИНХРОННЫЙ ЭЛЕКТРОПРИВОД С
ОБРАТИМЫМ ПРЕОБРАЗОВАТЕЛЕМ СИНУСОИДАЛЬНОГО
ТОКА И УПРАВЛЯЕМЫМ КОЭФФИЦИЕНТОМ МОЩНОСТИ

П.Н. Кунин А.И. Рыбаков

*Сибирский государственный индустриальный университет
г. Новокузнецк*

Предложена теория и практическое решение рекуперированного электропривода с обратимым преобразователем, настройкой которого обеспечивается чисто активный, или индуктивный или емкостной синусоидальный ток как при управлении, так и при рекуперации энергии в сеть.

Ключевые слова: рекуперированный электропривод, обратимый преобразователь, синусоидальный ток, активная, индуктивная и емкостная мощности.

В настоящее время широкое распространение получил рекуперированный асинхронный электропривод с двухзвенным преобразователем частоты, выполненным по схеме управляемый мостовой выпрямитель, силовой конденсатор и инвертора напряжения [1]. Рекуперацию электрической энергии в сеть в режиме генераторного торможения выполняет управляемый выпрямитель из шести диодно-транзисторных пар. Недостатком электропривода является возможность рекуперации электрической энергии в сеть только при условии, когда напряжение на конденсаторе превосходит линейное напряжение сети.

Свободным от указанных недостатков является электропривод [2]. В этом рекуперированном электроприводе использован новый тип преобразователя, названный активным (обратимым), который может работать как в режиме управляемого выпрямителя, так и в режиме инвертора. В сочетании с дросселем (реактором) и синусоидальной широтно-импульсной модуляцией обеспечивается синусоидальный ток как при управлении, так и при рекуперации энергии в сеть, причем в зависимости от настройки ток совпадает по фазе с напряжением, отстает или опережает. Как и синхронный

двигатель электропривод может генерировать емкостную реактивную мощность. Рекуперация обеспечивается во всем диапазоне за счет сдвига тока на девяносто электрических градусов по отношению к напряжению.

Недостаток электропривода состоит в том, что в выпрямительном режиме при открывании любого транзистора происходит междуфазное замыкание через дополнительно включенную индуктивность. Ток с конечным темпом нарастает до допустимой величины, после чего транзистор выключается. Индуктивность с одной стороны исключает режим короткого замыкания, но с другой стороны снижет темп нарастания фронта и спадания среза прямоугольных импульсов широтно-импульсной модуляции, увеличивая тем самым время нахождения транзисторных ключей преобразователя в опасном активном состоянии.

В данной работе предлагается рекуперирующий асинхронный электропривод свободный от указанного недостатка. Его принципиальная электрическая схема приведена на рисунке 1.

Предложенный рекуперирующий асинхронный электропривод переменного тока состоит из двух обратимых (активных) преобразователей: сетевого, подключенного к питающей сети, и приводного, подключенного к асинхронному электродвигателю. При потоке электрической энергии от питающей сети к электродвигателю сетевой преобразователь работает как управляемый преобразователь трехфазного напряжения в управляемое постоянное, а приводной преобразователь постоянное напряжение преобразует в трехфазное управляемой частоты. В рекуперативном режиме роли обратимых преобразователей меняются, приводной преобразователь работает трехфазным мостовым выпрямителем, а сетевой преобразователь работает в режиме инвертирования постоянного напряжения в трехфазное с частотой сети. Решение поставленной задачи - исключение из системы электропривода дорогостоящего дросселя (реактора) и улучшение формы широтно-модулированных импульсов - в предлагаемом электроприводе достигается добавляем транзисторно-диодных пар VT1, VT2 и VT3. Управляя шириной импульсов, открывающих транзисторы транзисторно-диодных пар, достигается плавное нарастание напряжения на конденсаторе С с

последующим управлением этого напряжения с помощью предлагаемой системы управления (рисунок 1).

Плавное нарастание напряжения необходимо потому, что подача высокого напряжения на разряженный конденсатор большой емкости эквивалентна подаче высокого напряжения на коротко замкнутую цепь. Процесс плавного заряда конденсатора C осуществляется с помощью плавного нарастания ширины прямоугольных импульсы управления транзисторами $VT1$, $VT2$ и $VT3$. По окончании процесса нарастания импульсов транзисторы $VT1$, $VT2$ и $VT3$ остаются открытыми, обеспечивая работу сетевого преобразователя в режиме управляемого выпрямителя с помощью изменения ширины прямоугольных импульсов транзисторов $VT4...VT9$. Приводной преобразователь работает в режиме штатного инвертора. Управление выполняется от системы управления также в штатном режиме.

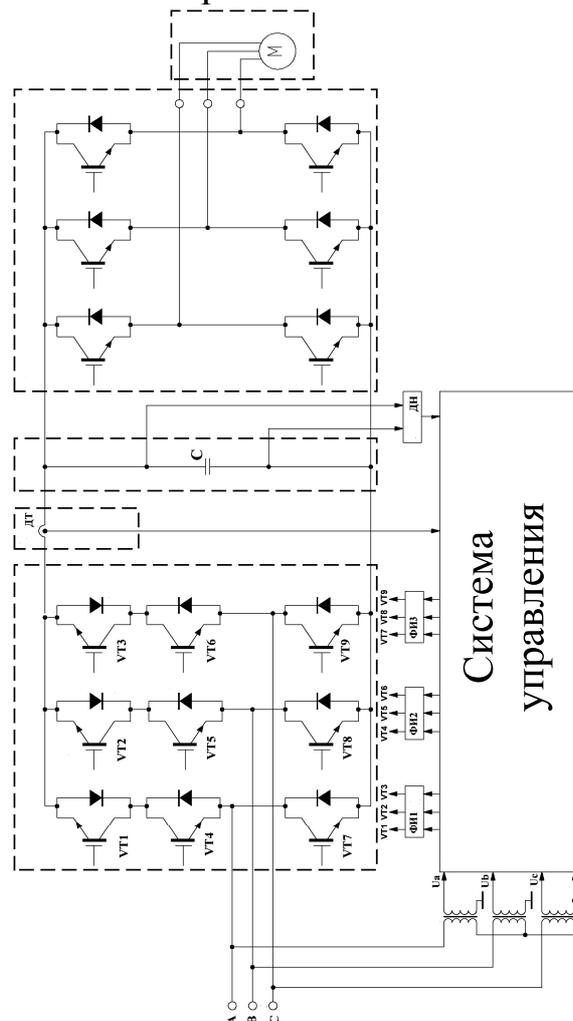


Рисунок 1 – Функциональная схема рекуперирующего асинхронного электропривода

В режиме рекуперативного торможения приводной преобразователь работает как трехфазный управляемый выпрямитель ЭДС асинхронного электродвигателя, которая подается на конденсатор С. Сетевой преобразователь, работая в режиме инвертора, постоянное напряжение конденсатора С преобразует в трехфазное напряжение и мощность торможения передает в сеть.

Управление сетевым и приводным преобразователями осуществляется с помощью системы управления, датчиков тока и напряжения, установленных в цепи постоянного тока и напряжения на конденсаторе по схеме на рисунке 2, а схема управления током рекуперации приведена на рисунке 3. В общем виде система управления на рисунке 1 представлена пустым прямоугольником без отображения содержательной части. Содержательная часть системы управления в развернутом виде приведена на рисунках 2 и 3. Схема на рисунке 2 формирует импульсы управления, которые через модули ФИ1...ФИ3 подаются на входные цепи транзисторно-диодных пар VT1...VT9 (рисунки 1 и 2).

Формирование управляющих импульсов осуществляется с помощью блок линейных напряжений БЛН, на входы которого подаются фазные напряжения U_A , U_B и U_C со вторичных обмоток однофазных измерительных трансформаторов (входы системы управления на рисунке 1). Модуль ФИ1 через генераторы пилообразных импульсов управляет транзисторами плавного изменения напряжения на конденсаторе С.

Полученные в блоке БЛН (рисунок 2) линейные напряжения подаются в узлы синхронизации сигналов УСС1 и УСС2. Из УСС1 сигналы передаются непосредственно в формирователь импульсов ФИ1, а из УСС2 - через логические схемы защиты от ложных срабатываний на формирователь импульсов ФИ2. Модуль БУТ осуществляет автоматическое управление в цепи постоянного тока с использованием сигнала обратной связи с датчика тока ДТ по стандартной схеме.

СЕКЦИЯ 1. Теоретические аспекты и методология построения современного электропривода

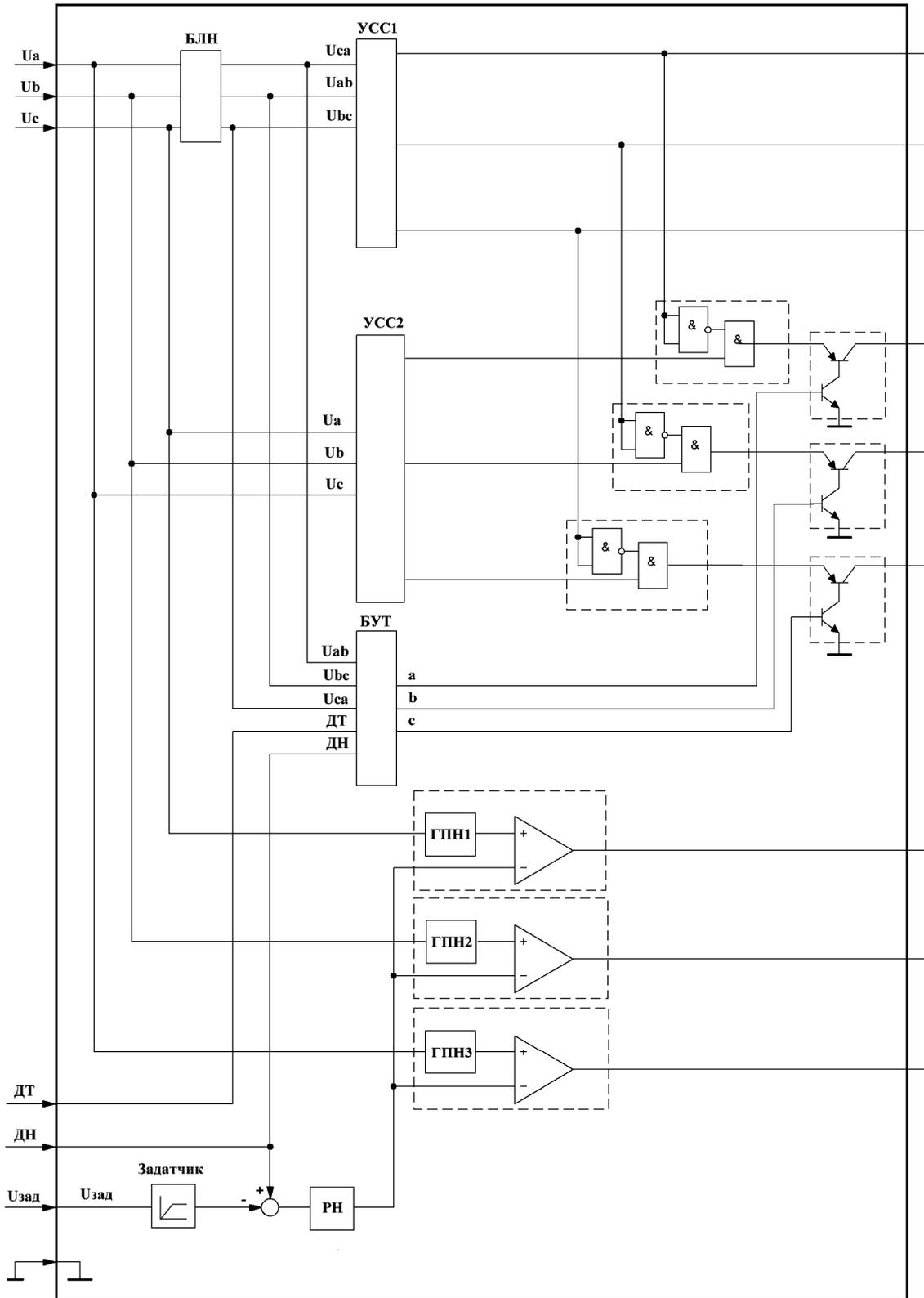


Рисунок 2 – Функциональная схема управления сетевым преобразователем

СЕКЦИЯ 1. Теоретические аспекты и методология построения современного электропривода

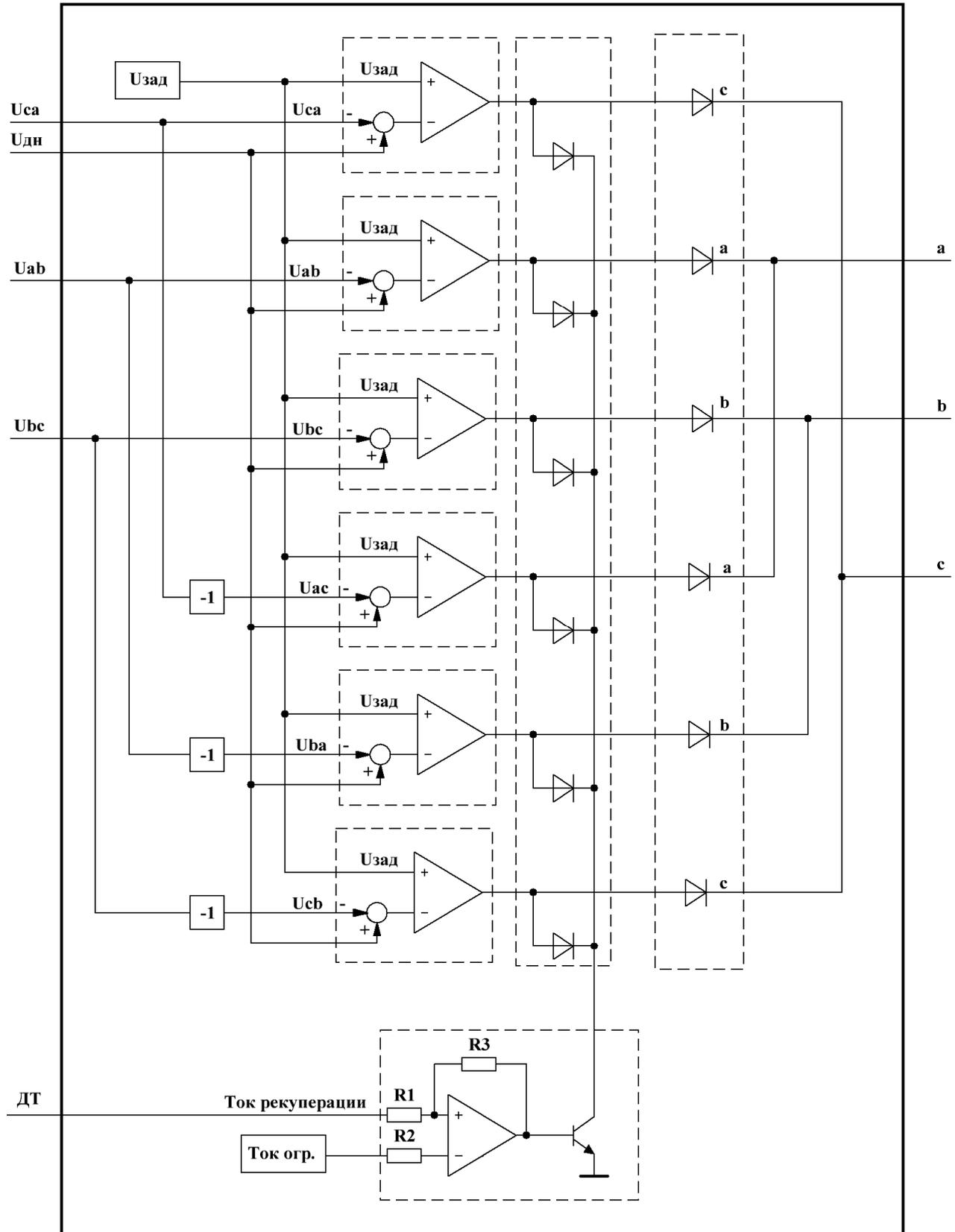


Рисунок 3 - Функциональная схема узла ограничения тока рекуперации

Линейное нарастание напряжения на конденсаторе С при пуске обеспечивается по сигналу задатчика интенсивности “Задатчик” (рисунок 2) с использованием сигнала обратной связи от датчика напряжения ДН.

Сигнал рассогласования, преобразованный регулятором РН, сравнивается с сигналами генераторов линейного напряжения фаз ГПН1...ГПН3, а результат направляются на формирователь импульсов ФИ1 (рисунки 2 и 1).

На рисунке 3 представлена схема регулирования тока рекуперации. Регулирование выполняется по стандартной схеме систем подчиненного регулирования по заданию максимального значения тока, которое сравнивается с сигналом датчика тока ДТ. Чтобы исключить возможный вибрационный режим работы регулятора в верхней части рисунка 3 приведена схема предотвращающая возникновение вибраций введением зоны нечувствительности.

Таким образом решена задача плавного нарастания напряжения на конденсаторе в силовой цепи с исключением дорогостоящего фильтрующего дросселя, дано схемное решение задачи управления током рекуперации, а также управления напряжением на конденсаторе в силовой цепи. Решена задача уменьшения времени нахождения транзисторных ключей в активном состоянии.

Список источников

1. SINAMICS S120 Справочник по оборудованию (GH3), силовые части конструкции типа «шасси» выпуск 01.13, с.105-135.

2. Семенов Б.Ю. Силовая электроника: профессиональные решения / Б.Ю. Семенов, М.: СОЛОН-ПРЕСС, 2011, с. 41-43.

УДК 621.31-83-52

СИНТЕЗ АСИНХРОННОГО МНОГОДВИГАТЕЛЬНОГО
ЭЛЕКТРОПРИВОДА С ВЫРАВНИВАНИЕМ ТОКОВ
ЭЛЕКТРОДВИГАТЕЛЕЙ

П.Н. Кунин, А.И. Рыбаков

*Сибирский государственный индустриальный университет
г. Новокузнецк*

Дана методика синтеза регуляторов, обеспечивающих выравнивание токов асинхронных электродвигателей многодвигательного электропривода в переходных и установившихся режимах. Двигатели соединены параллельно при работе на общий вал исполнительного органа.

Ключевые слова: многодвигательный асинхронный электропривод, выравнивание токов, синтез регуляторов, структура регуляторов, параметры регуляторов.

Однодвигательный электропривод постоянного тока интенсивно вытесняется развивающимся более дешевым и надежным асинхронным электроприводом, в то время как в многодвигательном асинхронном электроприводе наблюдается затянувшееся затишье. В этом отношении обращают на себя внимание работы [1, 2, 3, 4], в которых выдвигаются идеи, достойные переосмыслению с целью определения возможности их развития для выравнивания распределения нагрузки двигателей.

Так в источнике [1] сделана попытка применения методов градиента [2, 3] и скоростного градиента [3] к многодвигательному асинхронному электроприводу с групповым питанием для управления результирующим моментом. Авторы работы [1] рассматривают многодвигательный асинхронный электропривод с замыканием обратных связей по переменным всех электродвигателей применяя метод градиентного управления [2, 3]

$$\begin{aligned} u_{1\alpha} &= \gamma \int \sum_{i=1}^n h_i \left(\frac{M - M^*}{M_H} \psi_{1\beta} - \frac{\psi_1^2 - \psi_1^{*2}}{\psi_{1H}} \psi_{1\alpha} \right) dt, \\ u_{1\beta} &= \gamma \int \sum_{i=1}^n h_i \left(\frac{M - M^*}{M_H} \psi_{1\alpha} - \frac{\psi_1^2 - \psi_1^{*2}}{\psi_{1H}} \psi_{1\beta} \right) dt \gg. \end{aligned} \quad (1)$$

где n -число электродвигателей, h_i – весовые коэффициенты.

По мнению авторов работы, [1] «*весовые коэффициенты, определяющие важность регулирования электромагнитного момента i -го электродвигателя*», не раскрывая смысла понятия важности и методики задания весовых коэффициентов. Не раскрывается методика определения весовых коэффициентов.

Казалось бы, при одинаковой «важности» всех электродвигателей должно быть $h_i=1$. Но в этом случае рассчитанное напряжение равно сумме результатов вычислений правых частей функций (1). Это удовлетворяло бы последовательному соединению электродвигателей. Но в рассматриваемом электроприводе двигатели соединены параллельно. В связи с этим необходимо вычисление среднего значения напряжения преобразователя частоты (ПЧ), о чем речи в методе не ведется.

Вероятно, при моделировании применен метод подбор весовых коэффициентов, естественно, добиться нулевой статической ошибки и равенства моментов двигателей не удалось даже для двухдвигательного электропривода. При количестве двигателей больше двух настройка с приемлемой ошибкой вряд ли окажется успешной. Кроме того, метод не решает проблемы распределения нагрузки между электродвигателями.

Казалось бы, что все проблемы асинхронного многодвигательного электропривода решены в источнике [4], в котором применяют индивидуальные ПЧ, контуры управления током и моментом, используются измерители скорости вращения роторов всех электродвигателей.

Расхождение скоростей при работе электродвигателей на один вал и физически невозможно. Поэтому применение датчиков скорости для всех двигателей дополнительного положительного эффекта не дает. Среднее арифметическое датчиков дает ту же скорость, что и все датчики.

Точность распределения нагрузки между двигателями определяется точностью расчета моментов по углу поворота вала, оценить которую не представляется возможным поскольку алгоритм преобразования угла поворота вала в момент электродвигателя не раскрывается. Авторы [4] позитивные выводы делают умозрительно, не выполняя ни теоретических, ни

модельных, ни экспериментальных исследований, так что негативные результаты более чем вероятные.

Не вызывает сомнения, что для повышения качественных показателей выравнивания нагрузки между электродвигателями в установившихся и в динамических режимах целесообразно применение индивидуальных систем управления для каждого электродвигателя. Но вряд ли обосновано выравнивание моментов электродвигателей с обратной связью по моменту с промежуточным внутренним контуром тока. Это приводит к потере быстродействия.

Кроме того, теория векторного управления построена для работы при ненасыщенной магнитной системе электродвигателя, а в линейной системе магнитный поток пропорционален намагничивающему току. В силу этого нет необходимости в дополнительном контуре момента, замыкаемого к тому же не по моменту, а по углу поворота вала двигателя, что не только снижает точность управления из-за отсутствия датчиков момента требуемой точности, но введенный дополнительно внутренний контур тока снижает быстродействие системы.

На асинхронные электродвигатели накладываются определяющие ограничения по нагреву изоляции проводников обмоток и прочностью механических соединений. Поскольку пусковой ток в несколько раз превышает пусковой момент, основной ограничивающей переменной является полный ток статора. Кроме того, в отличие от датчиков моменты промышленность производит высокоточные датчики тока. Так что целесообразно выравнивать не моменты, а токи, потребляемые из питающей сети.

Согласно источникам [5, 6] асинхронный двигатель во вращающейся системе координат на линейном участке кривой намагничивания подобен двигателю постоянного тока независимого возбуждения. Это дает возможность типовой контур тока представить в виде структурной схемы на рисунке 1.

На рисунке 1 ПЧ представлен апериодическим звеном. В действительности T это время запаздывания на один период ШИМ. В электроприводах $T=0.0005-0.0002$ с и в силу малости времени относительно полосы пропускания контура тока с достаточной точностью аппроксимируется инерционным звеном.

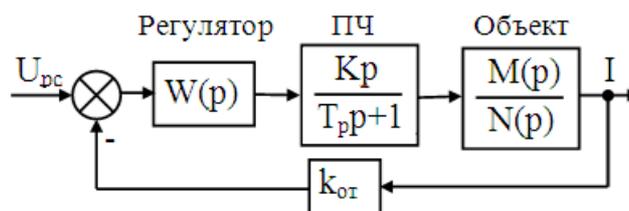


Рисунок 1 – Обобщенная структурная схема контура тока
ПЧ - преобразователь частоты, k_{oc} – коэффициент обратной связи.

В данной работе в основу положим асинхронный многодвигательный электропривод [4], исключив из него датчики скорости двигателей кроме одного, который установим на вал механизма. Исключим также контуры управления моментом, а контуры тока электродвигателей реализуем по проекциям тока статоров, обеспечивая распределение полных токов электродвигателей.

Синтез регулятор проще всего выполнить методами систем подчиненного регулирования. Но тогда теряется возможность настраивать динамические свойства контура тока и управлять темпом нарастания тока якоря электродвигателя.

Чтобы синтезировать регулятор, обеспечивающий возможность настройки контура тока на любые желаемые динамические процессы и нулевую статическую ошибку составим передаточную функцию контура и приравняем ее желаемой. Полученное уравнения разрешим относительно передаточной функции регулятора. Желаемая передаточная функция должна быть простой и в тоже время обеспечивать любые переходные процессы как асимптотические, так и с желаемыми перерегулированием. Кроме того, должна быть простая связь коэффициентов с параметрами электродвигателей и предоставлять возможность ограничивать темп нарастания тока на допустимом уровне. Сформулированным требованием удовлетворяет передаточная функция второго порядка, которой должна удовлетворять передаточная функция контура тока в соответствии со следующим равенством

$$\frac{\frac{W(p)K_p M(p)}{(T_p p + 1)N(p)}}{1 + \frac{W(p)K_p M(p)k_{OT}}{(T_p p + 1)N(p)}} = \frac{K_t}{T^2 p^2 + 2\xi T p + 1},$$

где правая часть равенства - желаемая передаточная функция.

Второе слагаемое в знаменателе левой части вынесем за скобки, произведем сокращения. В результате получим

$$\frac{1/k_{OT}}{\left(\frac{(T_p p + 1)N(p)}{W(p)K_p M(p)k_{OT}} + 1 \right)} = \frac{K_t}{T^2 p^2 + 2\xi T p + 1}. \quad (3)$$

Сравнивая числители и знаменатели получим

$$K_t = 1/k_{OT}, \quad (4)$$

$$\frac{(T_p p + 1)N(p)}{W(p)K_p M(p)k_{OT}} = T^2 p^2 + 2\xi T p, \text{ откуда имеем}$$

$$W(p) = \frac{(T_p p + 1)N(p)}{K_p k_{OT} M(p)(T^2 p + 2\xi T)p}. \quad (5)$$

Из (5) следует, что регулятор имеет интегрирующую составляющую, благодаря которой интегрирование прекращается только тогда, когда сигнал обратной связи равен сигналу задания и, следовательно, статическая ошибка управления равна нулю.

В силу малости постоянной времени T_p по отношению к полосе пропускания контура тока, не внося заметной погрешности можно принять $T_p = 0$. При таком допущении передаточная функция регулятора упрощается и принимает следующий вид

$$W(p) = \frac{N(p)}{K_p k_{OT} M(p)(T^2 p + 2\xi T)p}. \quad (6)$$

Контур скорости в отличие от [2] содержит только один датчик скорости. Структурная схема трехдвигательного асинхронного электропривода с одним датчиком скорости приведена на рисунке 2. Она содержит три асинхронных электродвигателя, токи которых управляются через замкнутые контуры, задание которым формируется общим регулятором скорости $W_c(p)$. Общее задание, одинаковые передаточные функции контуров (правая часть равенства (3)), питаются от индивидуальных ПЧ обеспечивает точное выравнивание токов электродвигателей.

Двигатели соединены общим валом, поэтому маховые массы роторов электродвигателей и механизма на рисунке 2 отображены общим моментом инерции J . Поскольку система выравнивает токи, моменты двигателей не совпадают.

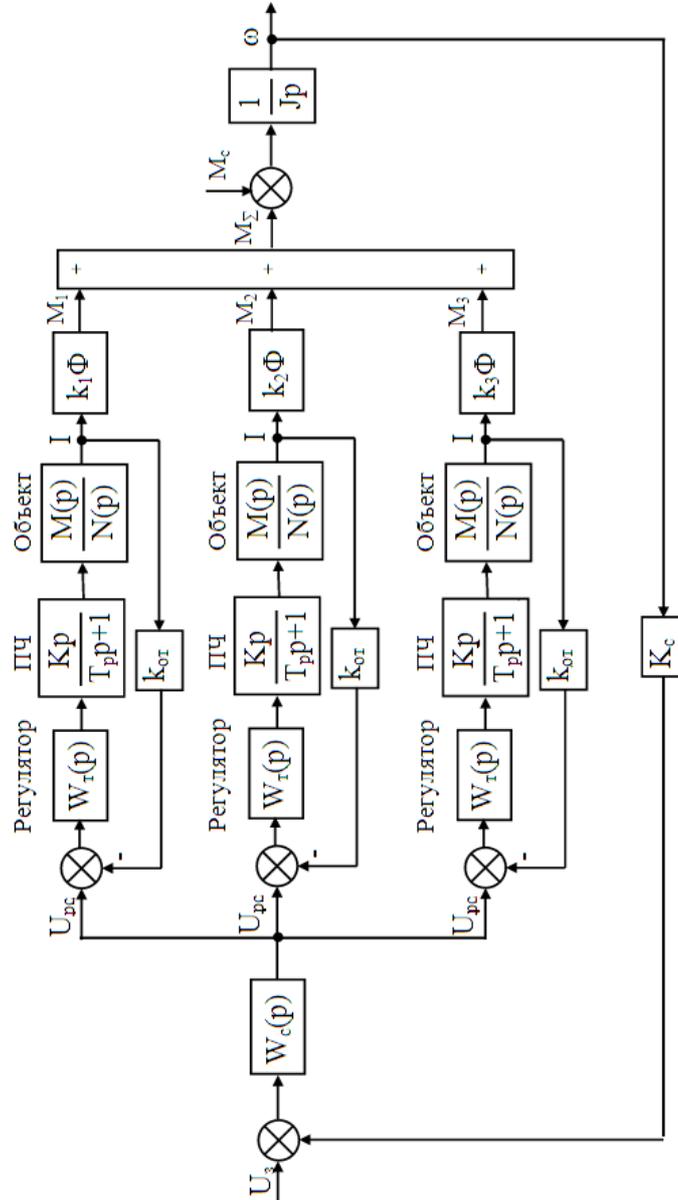


Рисунок 2 – Структурная схема трехдвигательного асинхронного электропривода

На структурной схеме (рисунке 2) не показаны контура стабилизации потокосцеплений электродвигателей. Поскольку значения потокосцеплений постоянные, они учтены символами k_i .

Вышеизложенное дает основание для следующих выводов:

Перегрузочная способность асинхронных электродвигателей определяется током статора. Предложена теория проектирования

многодвигательных асинхронных электроприводов с
выравниванием токов статоров повышенной точности.

Дополнительное повышение точности выравнивания токовой нагрузки электродвигателей достигнуто за счет обратных связей по току, потребляемому из сети и синтез контуров тока, параметры которых не зависят от параметров электродвигателей.

Список источников

1. Семькина И.Ю. Управление многодвигательным асинхронным электроприводом [Текст] / И.Ю. Семькина, В.М. Завьялов, М.А. Глазко: Известия Томского политехнического университета, энергетика, т. 315, №4. 2009. – с. 66-69.
2. Завьялов В. М. Снижение динамических нагрузок в трансмиссиях горных машин [Текст] / В.М. Завьялов: Кемерово: КузГТУ, 2008. – 172 с.
3. Фрадков А.Л. Кибернетическая физика: принципы и примеры [Текст] / А.Л. Фрадков: СПб.: Наука, 2003. – 208 с.
4. Пат. 2326488 Россия, МПК H02P5/48, H02P21/00. Многодвигательный частотнорегулируемый электропривод [Текст] / П.Г. Сидоров, Е.В. Александров, В.В. Лагун, Общество с ограниченной ответственностью «Инт-КЛАСС». – заявл; 006137608/09, 24.10.2006, опубл. 10.06.2008. – 14 с.; 3 ил.
5. Терехов В.М. Системы управления электроприводов: учебник для студ. высш. учеб. заведений / 2-е изд., стер. – М.: Издательский центр «Академия», 2006. – 304 с.
6. Соколовский Г.Г. Электроприводы переменного тока с частотным регулированием: учебник для студ. высш. учеб. Заведений / Г.Г. Соколовский. – М.: Издательский центр «Академия», 2006. – 272 с.

УДК 62-83-52:681.52

ПРОЕКТИРОВАНИЕ И МОДЕЛИРОВАНИЕ РАБОТЫ ЭЛЕКТРОПРИВОДА ШАХТНОЙ ПОДЪЕМНОЙ УСТАНОВКИ В СРЕДАХ РАЗРАБОТКИ MATLAB И MEHVIOS

Ю. Д. Лопарев¹, Д. Е. Модзелевский²

¹*Санкт-Петербургский государственный электротехнический университет «ЛЭТИ» им. В.И. Ульянова (Ленина) (СПбГЭТУ «ЛЭТИ»), Санкт-Петербург*

²*Сибирский государственный индустриальный университет (СибГИУ), Новокузнецк*

Описывается процесс разработки аппаратной части преобразователя частоты электропривода (ЭП) в среде разработки Matlab программного обеспечения в среде разработки MeHVIOS. Реализована скалярная и векторная системы управления (СУ).

Ключевые слова: преобразователь частоты, скалярное управление, векторное управление, электропривод.

Проектирование преобразователя частоты для электропривода требует глубоких знаний схемотехники, структуры микроконтроллеров, языков программирования, что затрудняет разработку преобразователя даже для команды высококвалифицированных специалистов. Для упрощения поставленной задачи возможно применить среду разработки, которая позволит разработать и смоделировать преобразователь частоты и объект управления, значительно сократив время и технические аспекты разработки.

Поставлена задача разработать преобразователь частоты, который бы позволял с заданной точностью управлять электроприводом шахтной подъемной установки как векторным, так и скалярным методами управления.

Объектом управления является электропривод шахтной подъемной установки. Особенностью такого привода является регулярная смена направления передаваемой мощности от сети к двигателю и обратно в тормозном режиме.

На рисунке 1 представлена структурная схема разработанного частотного преобразователя. Переменный ток сети подается на

вход активного выпрямителя, который преобразует его в постоянный. Активный выпрямитель обеспечивает заданный уровень напряжения на шине постоянного тока и формирование формы тока, потребляемого из сети, а также необходим для рекуперации электрической энергии в сеть при торможении двигателя. Инвертор преобразует постоянное напряжение в переменное заданной частоты [1].

По рассчитанным данным был смоделирован разработанный преобразователь частоты. Для упрощения процесса моделирования было произведено моделирование работы активного выпрямителя и непосредственно инвертора (аппаратная часть) и системы управления (программная часть) по отдельности. Моделирование выпрямителя и инвертора осуществлено в среде моделирования Matlab, а СУ – в среде MexBIOS.

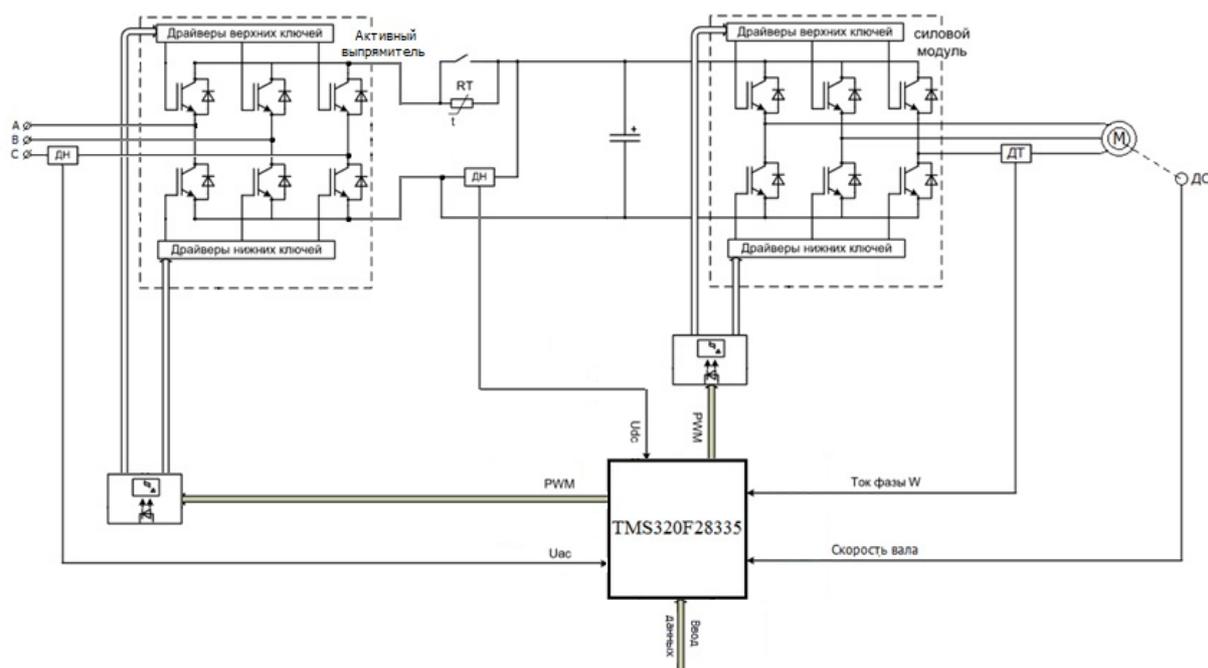


Рисунок 1 – Функциональная схема частотного преобразователя

На рисунке 2 представлена модель преобразователя частоты без активного выпрямителя. Схема питается от трехфазного источника переменного напряжения. Выпрямленное и отфильтрованное напряжение подается на вход инвертора, управление которым осуществляется регулятором напряжения через генератор ШИМ. Переменное напряжение с выходов инвертора подается на модель асинхронного двигателя [2].

СЕКЦИЯ 1. Теоретические аспекты и методология построения современного электропривода

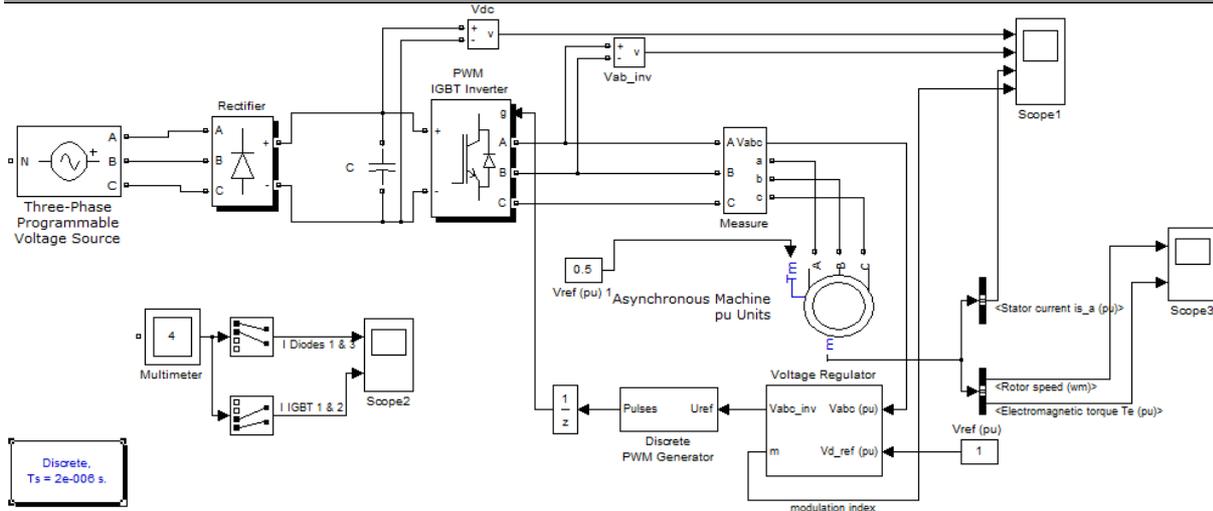


Рисунок 2 – Модель преобразователя частоты в среде разработки MATLAB

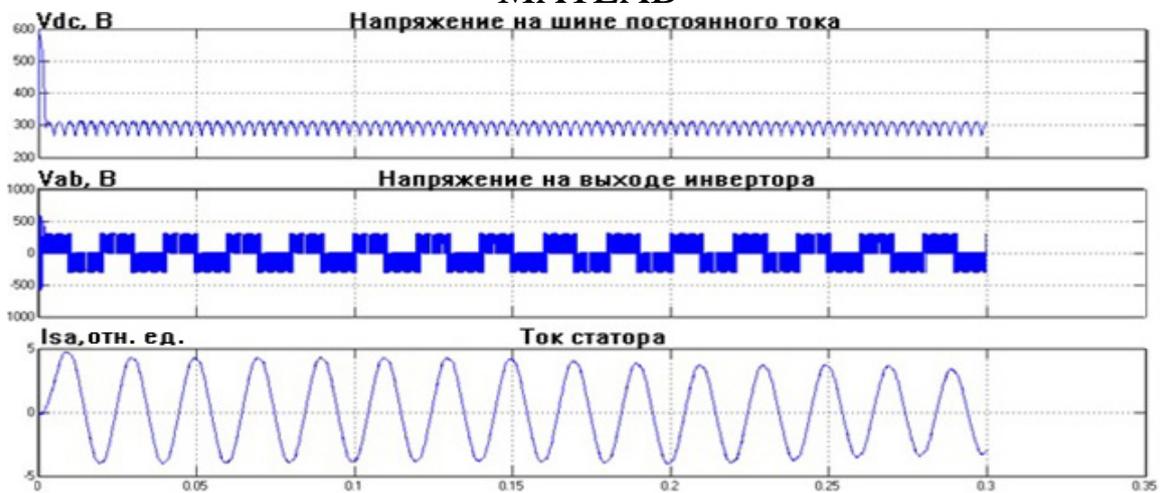


Рисунок 3 – Временные диаграммы токов и напряжений

В результате работы модели были получены графики напряжений (на шине постоянного тока, на выходе инвертора), тока статора и тока в ключах инвертора (рисунок 3).

На рисунке 4 представлена модель активного выпрямителя. Индуктивный фильтр установлен на входе IGBT моста, работающего на шину постоянного тока. Управление производится от подсистемы Regulator.

Система управления (рисунок 5) формирует опорную синусоиду, которая преобразуется в проекции на ортогональные оси d, q во вращающейся системе координат. Значение напряжения на шине постоянного тока U_{dc} вычитается из напряжения задания U_{dc_ref} и подается на вход ПИ-регулятора, который формирует на выходе заданное значение тока I_{d_ref} ; заданное значение I_{q_ref}

СЕКЦИЯ 1. Теоретические аспекты и методология
построения современного электропривода

принимается равным нулю. Далее проекции I_d , I_q вычитаются из заданных значений I_{d_ref} и I_{q_ref} и полученный сигнал подается на ПИД-регуляторы. Затем происходит обратное преобразование из ортогональной системы координат в АВС-систему координат, и полученный сигнал подается на генератор ШИМ, который формирует управляющие импульсы, подаваемые на управляющий вход транзисторного моста [3].

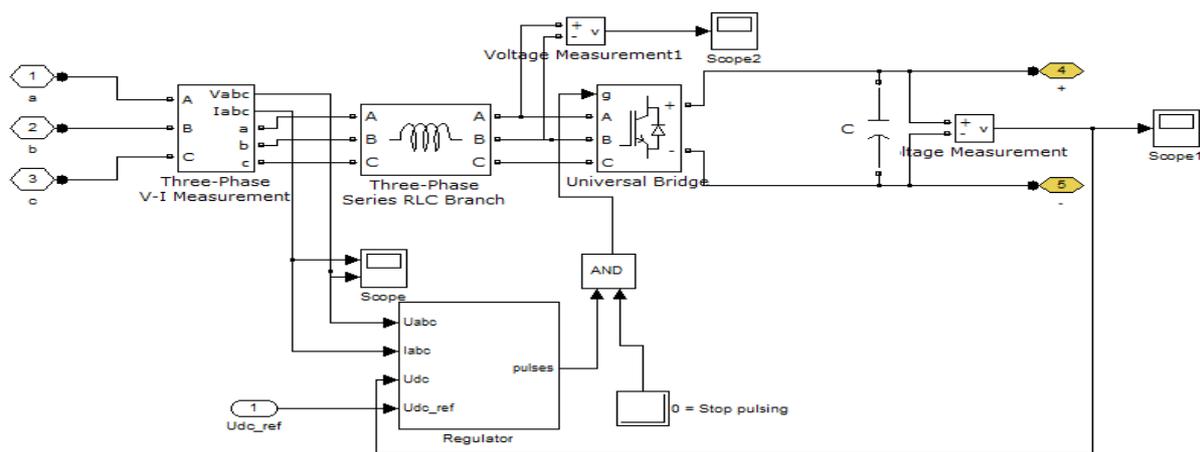


Рисунок 4 – Модель активного выпрямителя

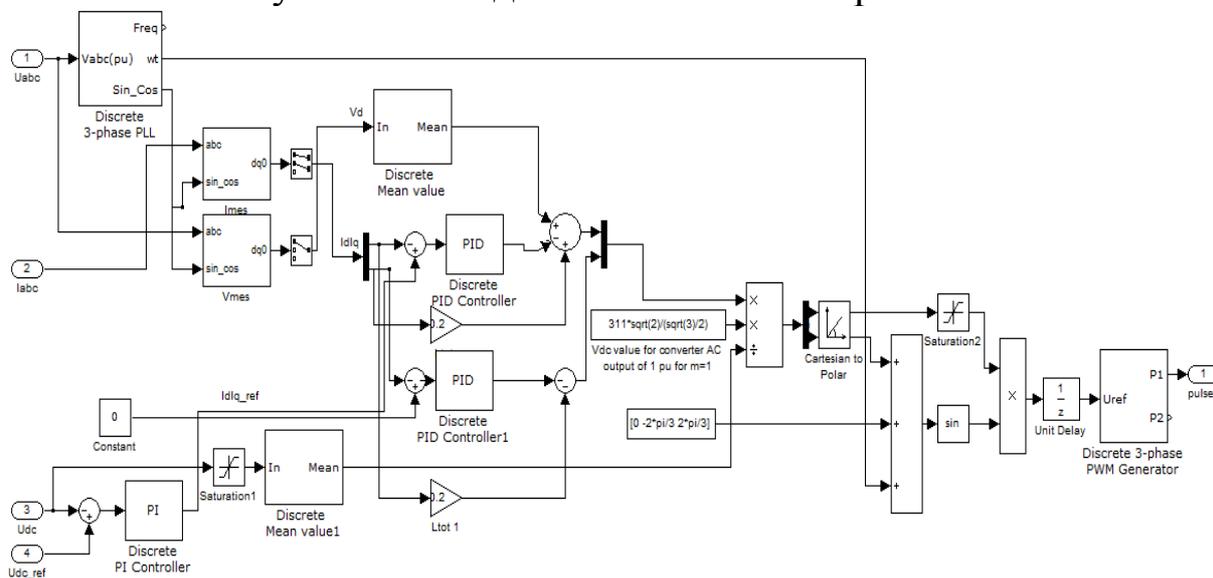


Рисунок 5 – Система управления активным выпрямителем

В результате работы модели были получены графики тока и напряжения сети и напряжения на нагрузке (рисунок б). Для наглядного подтверждения эффективности применения активного выпрямителя некоторое время (0,05 с) моделирование проводилось без его использования (с отключенным управляющим сигналом) –

режим пассивного выпрямителя. По истечении 0,05 секунды с начала моделирования управляющий сигнал был подключен к транзисторному мосту. Форма тока синусоидальная и совпадает по фазе с напряжением.

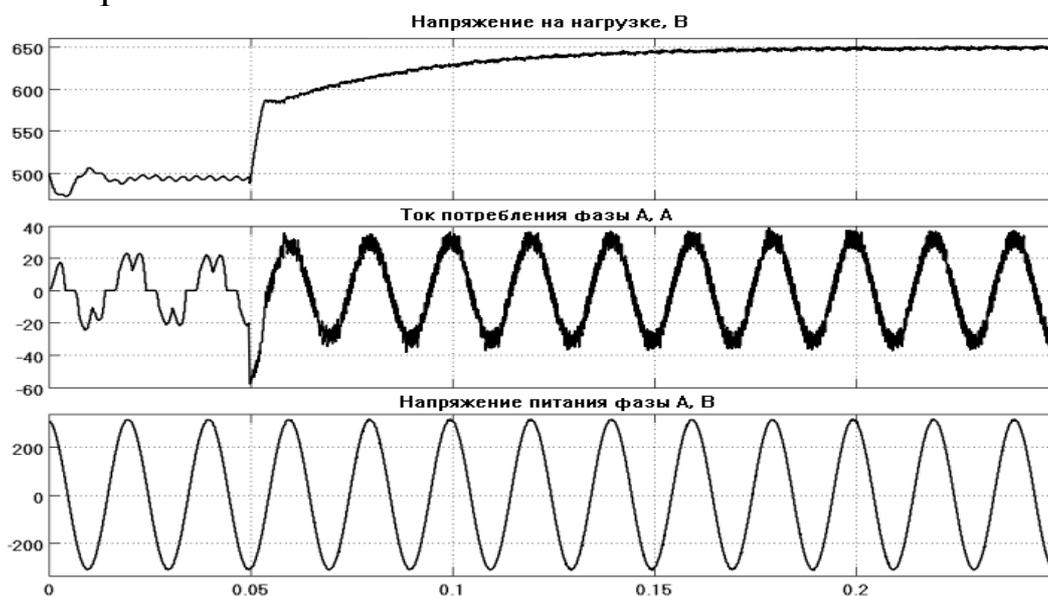


Рисунок 6 – Графики тока и напряжения сети и напряжения на нагрузке

Система управления электроприводом разработана в среде разработки MexBIOS. На рисунке 7 представлен алгоритм работы системы управления. Цикл основной программы выполняется по таймеру. Формируются сигналы с объекта управления (блок Drivers). Система защит (блок Protect). Происходит выбор способа управления – скалярная или векторная. Запускается скалярная СУ (блок SCALAR), или векторная СУ, состоящая из контуров скорости (блок Speed_loop) и тока (блок Current_loop). Далее блок VoltControl осуществляет управление напряжением с помощью формирования управляющих импульсов, подаваемых на ключи инвертора.

Векторная система управления состоит из контуров: контура тока и контура скорости. Токи управляются во вращающейся системе координат, которая ориентирована по вычисленному углу поворота вектора потокосцепления [4].

Контур скорости состоит из регулятора скорости и дополнительной схемы задержки на включение работы регулятора скорости. Задержка необходима для формирования тока I_d , который формирует потокосцепление двигателя (намагничивание).

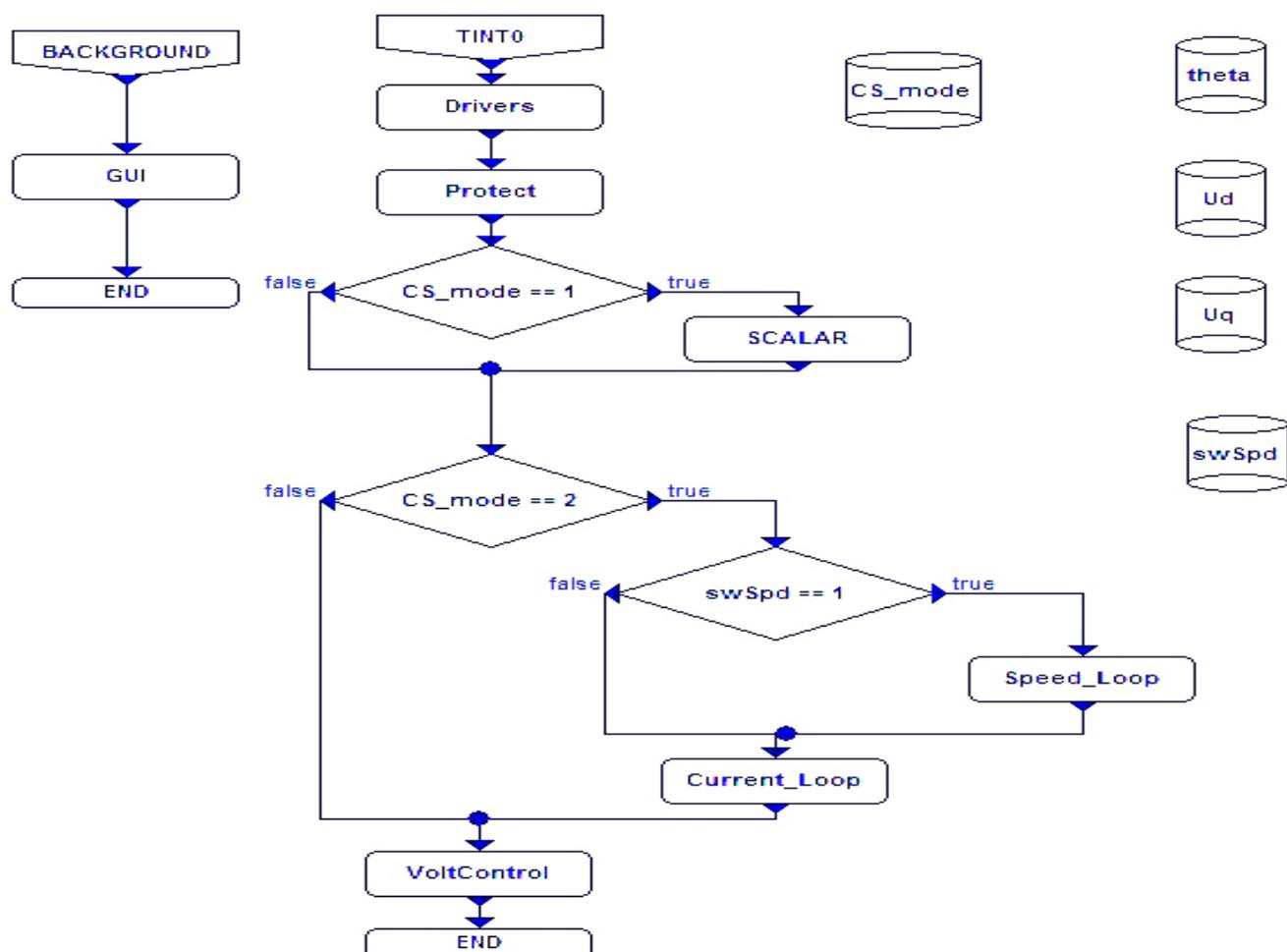


Рисунок 7 – Алгоритм работы векторной системы управления

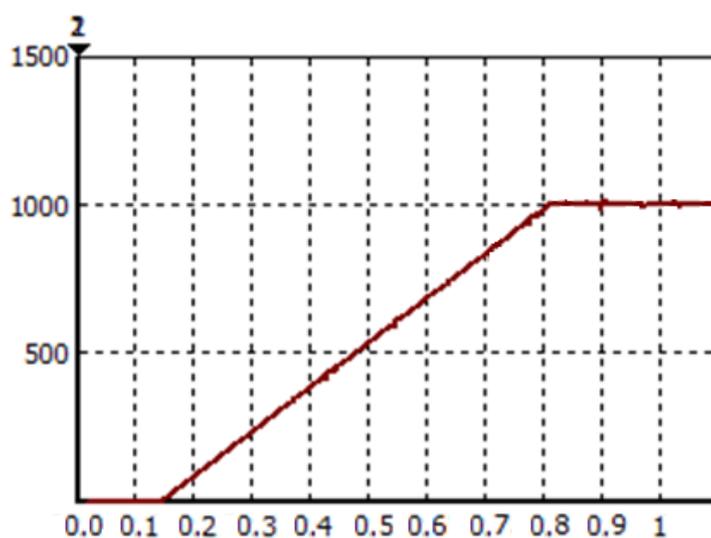


Рисунок 8 – Переходный процесс скорости при векторном управлении

На рисунке 8 представлен результат моделирования работы системы управления: переходный процесс скорости двигателя. В

момент времени 0,15 с была задана скорость вращения 1000 об/мин, в момент времени 0,8 двигатель разогнался до заданной скорости.

Платформы Matlab и MexBIOS позволили реализовать все вышеизложенные этапы разработки частотного преобразователя. Переходные процессы показывают, что качество управления соответствует заданным требованиям. Причем от разработчика не требуется глубоких знаний в областях программирования, схемотехники и структуры микроконтроллера. Это особенно актуально при обучении студентов младших курсов, которым необходимо получать практические навыки работы с преобразовательной техникой и электроприводом в сжатые сроки. В дальнейшем планируется производить исследования различных систем управления ЭП в области частотного управления.

Библиографический список

1. Осипов О. И. частотно-регулируемый электропривод: учеб. пособие / О. И. Осипов. – М.: Изд-во МЭИ, 2004.
2. Модзелевский Д.Е. Комплекс программ для исследования и управления электроприводом // Автоматизированный электропривод и промышленная электроника: Труды четвертой Всерос. научно-практ. конф., посвященной 80-летию СибГИУ. – Новокузнецк: СибГИУ, 2010. – С. 175-182.
3. Калачев, Ю. Н. Наблюдатели состояния в векторном электроприводе / Ю. Н. Калачев. – М:ЭФО, 2015. – 80 с.
4. Мехатроника-Про, разработка электроприводов и преобразовательной техники [Электронный ресурс]. – Режим доступа: <http://mechatronica-pro.com>. – Заглавие с экрана. – (Дата обращения: 09.10.2016).

УДК 621.313.282.2

РАЗРАБОТКА ДИНАМИЧЕСКОЙ МОДЕЛИ
ЭЛЕКТРОМАГНИТНОГО УДАРНОГО УЗЛА С УПРУГИМИ
СВЯЗЯМИ

Л. А. Нейман, Н. И. Щуров

*Федеральное государственное бюджетное образовательное
учреждение высшего образования Новосибирский
государственный технический университет, Новосибирск*

Создана математическая модель динамики электромагнитного ударного узла двухкатушечной синхронной электромагнитной машины с пружинным реверсом бойка, обеспечивающая возможности в проведении всестороннего анализа взаимосвязанных электромеханических процессов.

Ключевые слова: ударный узел, синхронная электромагнитная машина, математическая модель, механическая колебательная система.

Электромеханические колебательные ударные системы, использующие электромагнитный привод, применяются в различных областях промышленности для обеспечения различных технологических процессов и производств [1].

Повышение эффективности работы машин и механизмов на базе электромагнитного привода колебательного движения, работающего в окolorезонансных и резонансных режимах, возможно только при условии рационального выбора взаимосвязанных параметров электрической, магнитной и механической подсистем. При решении комплексной задачи всестороннего анализа и синтеза электромеханической колебательной системы еще на стадии проектирования возникает необходимость в проведении динамического расчета [2–4].

В качестве объекта исследований рассматривается электромагнитный привод ударного узла, включающего в себя многомассовую колебательную систему с упругими связями и возбуждаемую периодическим магнитным полем системой из двух катушек.

Создана математическая модель динамики электромагнитного ударного узла двухкатушечной синхронной электромагнитной машины с пружинным реверсом бойка, основу которой составляют

дифференциальные уравнения электрического равновесия нелинейной системы и механического взаимодействия поступательно движущихся масс, полученных методом Лагранжа. Особенностью модели является возможность учета большого числа взаимосвязанных электромеханических процессов в переходных режимах, учитывающих нелинейность магнитных характеристик двигателя, степень подвижности инерционных масс, свойства упругих связей, внешние воздействия, сопровождаемых различного рода потерями энергии. Выполнена верификация модели сравнением расчетных значений выходных показателей с результатами, полученными на физической модели. Разница между расчетными и экспериментальными значениями не превышает 4... 6 %, что общепринято для инженерной практики.

Литература:

1. Нейман Л.А. Линейные синхронные электромагнитные машины для низкочастотных ударных технологий / Л.А. Нейман, В.Ю. Нейман // Электротехника. – 2014. – № 12. – С. 45 – 50 (49).
2. Нейман Л.А. Динамическая модель электромагнитного привода колебательного движения для систем генерирования низкочастотных вибраций /Л.А. Нейман, В.Ю. Нейман // Доклады Академии наук высшей школы Российской Федерации. – 2015. – № 3 (28). – С. 75 – 87.
3. Нейман Л.А. Математическая модель электромеханической системы колебательного движения с упругими связями / Л.А. Нейман, В.Ю. Нейман // Вестник Ивановского государственного энергетического университета. – 2015. – № 6. – С 35–40.
4. Нейман Л.А. Моделирование динамических процессов в электромагнитных преобразователях энергии для систем генерирования силовых воздействий и низкочастотных вибраций / Л.А. Нейман, В.Ю. Нейман// Известия Томского политехнического университета. Инжиниринг георесурсов. – 2015. – Т. 326. № 4. – С. 154–162.

УДК 621.313.333

ИССЛЕДОВАНИЕ МЕХАНИЧЕСКИХ ХАРАКТЕРИСТИК
ЭЛЕКТРОПРИВОДА ПЕРЕМЕННОГО ТОКА НА ОСНОВЕ
МАШИНЫ ДВОЙНОГО ПИТАНИЯ В АСИНХРОННОМ
РЕЖИМЕ

В. Ю. Островляничик, И. Ю. Поползин

*Федеральное государственное бюджетное образовательное
учреждение высшего образования*

«Сибирский государственный индустриальный университет»

На основании уравнений электрического равновесия обмоток машины двойного питания получены и проанализированы выражения для механической и электромеханической характеристик машины в асинхронном режиме.

Ключевые слова: машина двойного питания, асинхронный двигатель, фазный ротор, механическая характеристика, электромеханическая характеристика.

Важнейшими характеристиками машины двойного питания (МДП) являются ее механические и электромеханические характеристики. Именно они определяют пригодность ее применения в технологическом процессе подъема и необходимые режимы работы машины. В то же время в литературных источниках их исследованию уделяется недостаточно внимания. Зачастую приводятся только экспериментально полученные данные без их аналитического описания. По этой причине весьма актуальной является задача получения аналитических выражений, описывающих электромеханическое преобразование энергии в МДП и их анализа.

В соответствии с [1], [2], [3] уравнения электрического равновесия обмоток машины относительно потокосцеплений обмоток запишутся как:

$$\begin{aligned} \dot{\bar{U}}_S &= jw_0 \bar{Y}_S + \bar{I}_S R_S, \\ \dot{\bar{U}}_R &= jw_0 s \bar{Y}'_R + \bar{I}'_R R'_R. \end{aligned} \quad (1)$$

где

\bar{U}_S, \bar{U}_R – комплексные значения напряжений на статоре и роторе соответственно;

\bar{I}_S, \bar{I}'_R – комплексные значения тока статора и приведенного тока ротора соответственно;

\bar{Y}_S, \bar{Y}'_R – комплексные значения потокосцепления статора и приведенного потокосцепления ротора соответственно;

R_S, R'_R – активное сопротивление статора и приведенное активное сопротивление ротора соответственно;

L_S, L_R, L_m – индуктивности статора, ротора и намагничивания соответственно;

ω_0 – скорость вращения магнитного поля статора;

s – скольжение;

z_{II} – число пар полюсов машины;

M – электромагнитный момент машины.

Определим момент как функцию векторного произведения потокосцеплений обмоток статора и ротора:

$$M = -\frac{3}{2} z_{II} \frac{L_m}{L_S L_R - L_m^2} [\bar{Y}_S \bar{Y}'_R] \quad (2)$$

Обозначим угол сдвига фаз между напряжением на статоре и напряжением, подведенным к ротору, как δ и примем, что начальная фаза вектора напряжения на статоре машины \bar{U}_S равна 0. В этом случае комплексное значение напряжения на роторе определяется как:

$$\bar{U}_R = U_R e^{jd} \quad (3)$$

Для асинхронного режима работы машины двойного питания независимо задаются амплитуда U_R и фаза δ напряжения, подведенного к ротору, а частота всегда равна частоте скольжения.

Введем коэффициент рассеяния машины:

$$s = 1 - \frac{L_m^2}{L_S L_R} \quad (4)$$

и запишем выражения для связи токов и потокосцеплений обмоток машины:

$$\begin{aligned} \ddot{\bar{I}}_S &= \frac{1}{sL_S} \bar{Y}_S - \frac{k_R}{sL_S} \bar{Y}_R \\ \ddot{\bar{I}}_R &= -\frac{k_S}{sL_R} \bar{Y}_S - \frac{1}{sL_R} \bar{Y}_R, \end{aligned} \quad (5)$$

где k_S, k_R – коэффициенты связи статора и ротора соответственно.

Подставив выражения для токов (5) и момента (2) в систему (1), получим:

$$\begin{aligned} \ddot{\bar{U}}_S &= \frac{\Re R_S}{sL_S} + j\omega_0 \frac{\Im}{\emptyset} \bar{Y}_S - \frac{R_S k_R}{sL_S} \bar{Y}_R, \\ \ddot{\bar{U}}_R &= -\frac{R_R k_S}{sL_R} \bar{Y}_S + \frac{\Re R_R}{sL_R} + j\omega_0 s \frac{\Im}{\emptyset} \bar{Y}_R', \\ \ddot{\bar{M}} &= -\frac{3}{2} p_{\Pi} \frac{L_m}{L_S L_R - L_m^2} [\bar{Y}_S - \bar{Y}_R]. \end{aligned} \quad (6)$$

В большинстве случаев можно принять, что произведение sL_R , называемое эквивалентной индуктивностью машины, определится по соотношению [4]:

$$sL_R = L_K,$$

где $L_K = L_R' + L_S$ – индуктивность машины в режиме короткого замыкания. Индуктивности L_K соответствует реактивное сопротивление короткого замыкания X_K :

$$X_K = 2pf_C L_K = X_{S|f_C} + X'_{R|f_C},$$

где f_C – номинальная частота напряжения питающей сети.

Разделим обе части второго уравнения системы (6) на ω_0 :

$$\frac{\bar{U}_R}{\omega_0} = -\frac{R_R k_S}{\omega_0 s L_R} \bar{Y}_S + \frac{\Re R_R}{s \omega_0 s L_R} + j s \frac{\Im}{\emptyset} \bar{Y}_R$$

С учетом эквивалентной индуктивности выполнится равенство $\frac{R_R}{\omega_0 s L_R} \gg \frac{R_R}{X_K} = s_{KP}$, где s_{KP} – критическое скольжение машины.

Пренебрегая активным сопротивлением статора, запишем первые два уравнения системы (6) в виде:

$$\begin{aligned} \dot{\bar{Y}}_S &= \frac{\bar{U}_S}{j\omega_0}, \\ \dot{\bar{Y}}_R &= \frac{\bar{U}_R}{\omega_0} \frac{1}{s_{KP} + js} + \frac{\bar{U}_S k_S}{j\omega_0} \frac{s_{KP}}{s_{KP} + js}, \\ \dot{M} &= -\frac{3}{2} p_{II} \frac{L_m}{L_S L_R - L_m^2} [\bar{Y}_S - \bar{Y}_R]. \end{aligned} \quad (7)$$

Система (7) неудобна для анализа и применения на практике, поскольку идентификация потокосцеплений обмоток машины является сложной задачей.

Введем понятия относительного напряжения на роторе и уточненного относительного напряжения:

$$U_{ROTH} = \frac{U_R}{U_S},$$

$$U_R^* = U_{ROTH} / k_S.$$

где U_{ROTH} – относительное напряжение на роторе, U_R^* – уточненное относительное напряжение на роторе. С учетом уточненного относительного напряжения на роторе, а также вышеприведенного выражения для напряжения на роторе $\bar{U}_R = U_R e^{jd}$, получим выражение:

$$U_R = U_R e^{jd} = U_R^* k_S U_S e^{jd}. \quad (8)$$

Проекции потокосцеплений ротора и статора (7) на оси системы координат x - y , связанной с полем статора, определяются как:

$$\begin{aligned} \dot{Y}_{Sx} &= 0, \\ \dot{Y}_{Sy} &= -\frac{U_S}{\omega_0}, \\ \dot{Y}_{Ry} &= \frac{R_R L_R s k_S U_S}{R_R^2 + \omega_0^2 s^2 L_R^2} \frac{\mathfrak{a}}{\mathfrak{e}} U_2^* \cos d + \frac{\omega_0 s s L_R U_2^*}{R_R} - \frac{\ddot{\theta}}{s^{\frac{3}{2}}}, \\ \dot{Y}_{Rx} &= \frac{R_R L_R s k_S U_S}{R_R^2 + \omega_0^2 s^2 L_R^2} \frac{\mathfrak{a}}{\mathfrak{e}} U_2^* \sin d - \frac{\omega_0 s s L_R U_2^*}{R_R} \cos d - s_{KP} \frac{\ddot{\theta}}{\theta}. \end{aligned} \quad (9)$$

В указанной системе координат выражение для момента примет вид:

$$M = \frac{3}{2} p_{II} \frac{k_S}{s L_R} (Y_{Rx} Y_{Sy} - Y_{Ry} Y_{Sx}). \quad (10)$$

Подставив выражения (9) в выражение (10), получим:

$$M = \frac{3}{2} P_{II} \frac{k_S^2 U_S^2}{w_0^2 s L_R} \frac{s_{KP} s}{s_{KP}^2 + s^2} \frac{\dot{e}}{\ddot{e}} \left(1 - \frac{U_R^*}{s} \frac{\alpha}{\xi} \cos d + \frac{s}{s_{KP}} \sin d \frac{\ddot{u}}{\dot{u}} \right). \quad (11)$$

Значение критического момента двигателя рассчитывается как:

$$M_{KP} = \frac{3}{2} P_{II} \frac{k_S^2 U_S^2}{w_0^2 s L_R}. \quad (12)$$

Подставив (12) в (11), получим выражение, связывающее момент, развиваемый машиной, скольжение, фазу и относительную амплитуду напряжения в цепи ротора:

$$M = \frac{2M_{KP}}{s_{KP}/s + s/s_{KP}} \frac{\dot{e}}{\ddot{e}} \left(1 - \frac{U_R^*}{s} \frac{\alpha}{\xi} \cos d + \frac{s}{s_{KP}} \sin d \frac{\ddot{u}}{\dot{u}} \right). \quad (14)$$

Выражение (14) можно разбить на 2 компонента:

$M_E = \frac{2M_{KP}}{s_{KP}/s + s/s_{KP}}$ - момент, развиваемый асинхронным двигателем (формула Клосса);

$\frac{\dot{e}}{\ddot{e}} \left(1 - \frac{U_R^*}{s} \frac{\alpha}{\xi} \cos d + \frac{s}{s_{KP}} \sin d \frac{\ddot{u}}{\dot{u}} \right)$ - множитель, связанный с питанием ротора от внешнего источника напряжения.

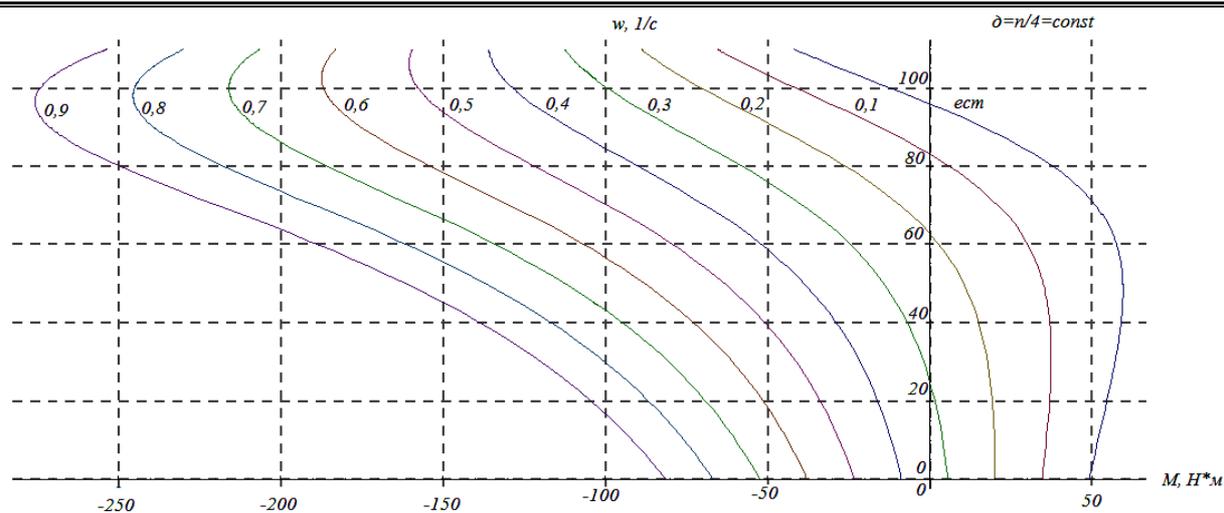
Выражение (14) определяет механические характеристики машины двойного питания. Задаваясь значениями U_R^* и δ и подставляя их в (14), возможно построить механические характеристики машины при различных значениях амплитуды и фазы напряжения на роторе.

Проанализируем механические характеристики МДП в асинхронном режиме. Как видно из уравнения (14), их вид определяется величиной и знаком компонента

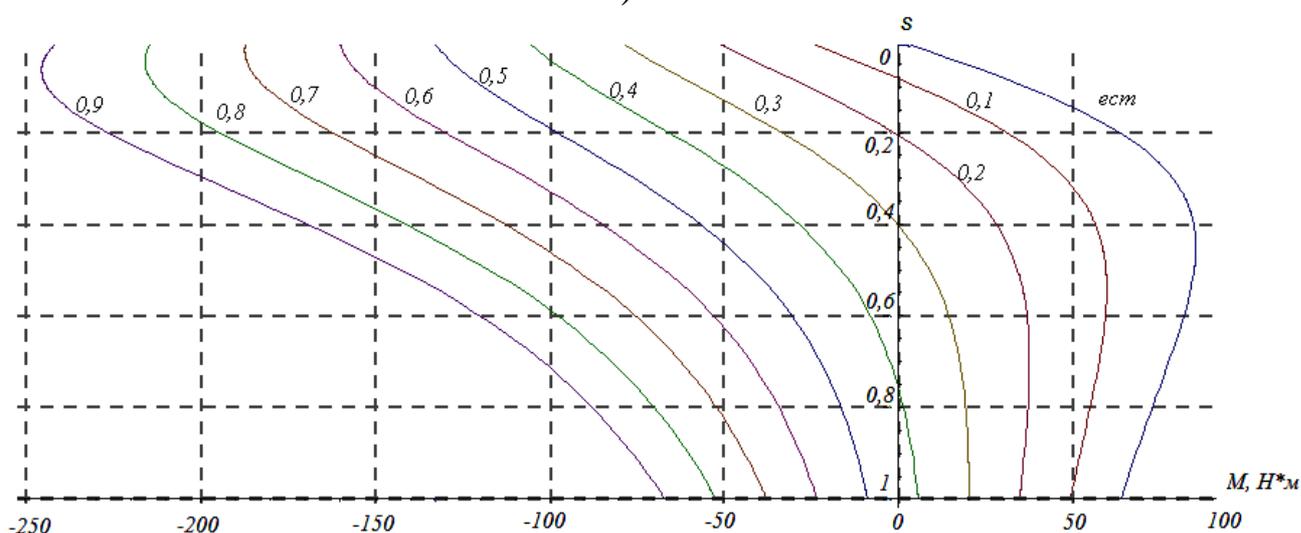
$\frac{\dot{e}}{\ddot{e}} \left(1 - \frac{U_R^*}{s} \frac{\alpha}{\xi} \cos d + \frac{s}{s_{KP}} \sin d \frac{\ddot{u}}{\dot{u}} \right)$. В частности, для реализации тормозного режима за счет управления амплитудой и фазой напряжения на роторе необходимо, чтобы выполнялось условие (15).

$$1 - \frac{U_R^*}{s} \frac{\alpha}{\xi} \cos d + \frac{s}{s_{KP}} \sin d \frac{\ddot{u}}{\dot{u}} < 0 \text{ или } \frac{U_R^*}{s} \frac{\alpha}{\xi} \cos d + \frac{s}{s_{KP}} \sin d \frac{\ddot{u}}{\dot{u}} > 1. \quad (15)$$

СЕКЦИЯ 1. Теоретические аспекты и методология построения современного электропривода



а)



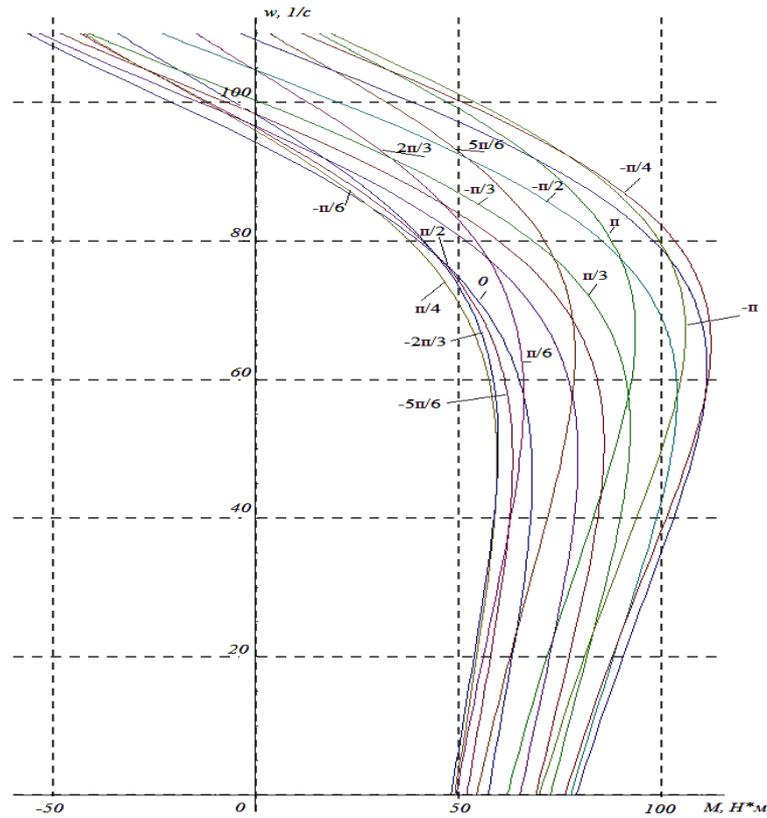
б)

Рисунок 1 – Семейство механических характеристик МДП в асинхронном режиме при $d = \frac{P}{4}$ и различных значениях U_R^* (а – зависимость момента машины от скорости; б – от скольжения)

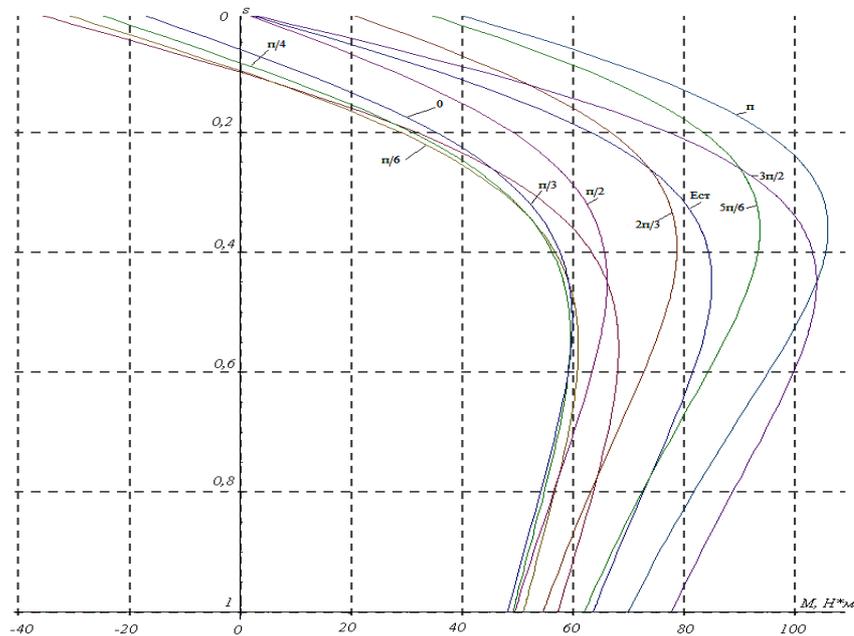
Механические характеристики МДП на основе двигателя МТФ-111-Н6 при изменении амплитуды и фазы напряжения на роторе приведены на рисунках 1 и 2.

Из семейств характеристик, приведенных на рисунках 1 и 2 следует, что на величину развиваемого машиной момента влияют оба параметра, но в большей степени влияет амплитуда напряжения на роторе, в то время как его фаза позволяет изменять жесткость характеристик.

СЕКЦИЯ 1. Теоретические аспекты и методология
 построения современного электропривода



а)



б)

Рисунок 2 – Семейство механических характеристик МДП в асинхронном режиме при $U_R^*=0,1$ и различных значениях угла δ (а – зависимость момента машины от скорости; б – от скольжения)

Таким образом, управляя амплитудой и фазой напряжения на роторе (путем регулирования проекций обобщенного вектора

напряжения на роторе на оси прямоугольной системы координат), можно добиться работы машины на характеристике, отвечающей текущим условиям работы подъемной машины.

Кроме того, по характеристикам, приведенным на рисунке 1 видно, что при определенной величине амплитуды напряжения на роторе машина начинает развивать тормозной момент. Из характеристик, приведенных на рисунке 2, следует, что минимальный момент при фиксированной амплитуде достигается при $d = \frac{P}{4}$. Из характеристик на рисунке 2 видно, что приемлемый тормозной момент машина развивает при $U_R^* = 0,3 \dots 0,4$. Было установлено, что оптимальными параметрами напряжения на роторе для торможения являются $U_R^* = 0,39$, $d = \frac{P}{4}$.

При этом фактическая величина напряжения на роторе определится как $U_R = U_S U_{ROTH} = U_S U_R^* k_S$. Таким образом, для получения тормозного момента для двигателя МТФ111-6 величина напряжения на роторе должна составлять $U_R = U_S U_{ROTH} = U_S U_R^* k_S = 220 \times 0,39 \times 0,88 = 77,3 \text{ В}$ при его фазе $d = \frac{P}{4}$ (рисунок 4).

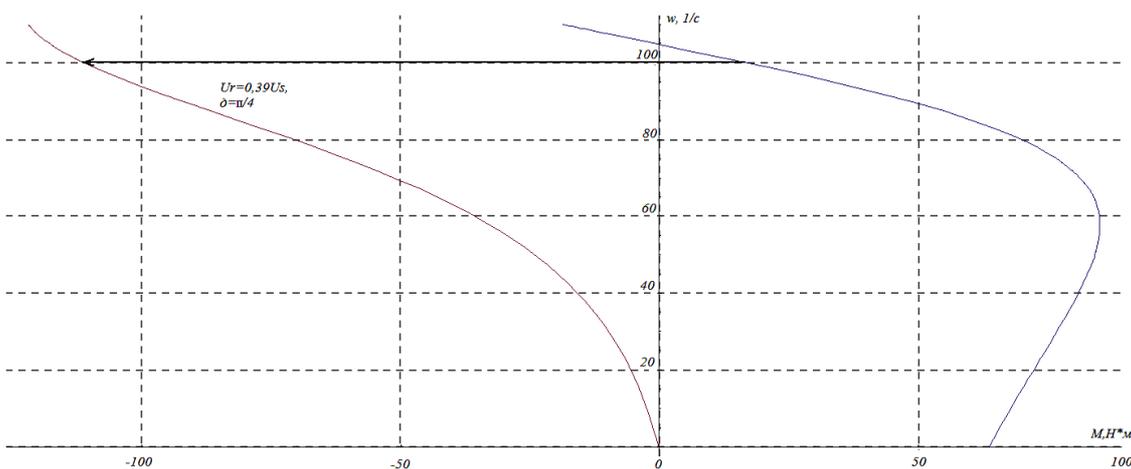


Рисунок 4 – Механические характеристики машины в режиме торможения полем ротора

СЕКЦИЯ 1. Теоретические аспекты и методология
построения современного электропривода

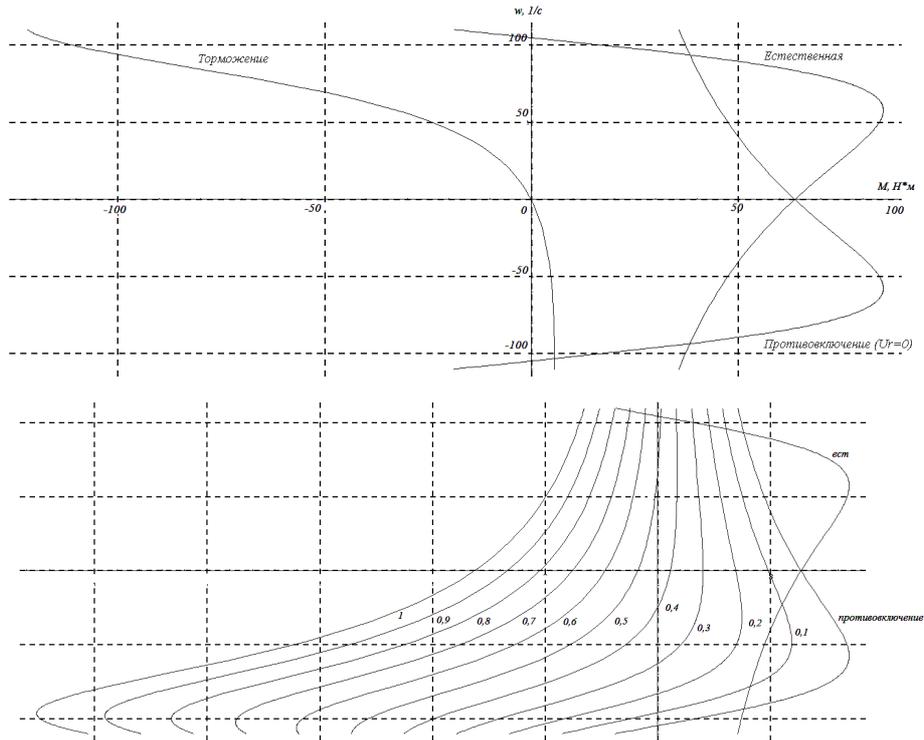


Рисунок 5 – а) Механическая характеристика МДП при изменении порядка чередования фаз напряжения на статоре;
б) Механические характеристики МДП в режиме противовключения при изменении амплитуды напряжения на роторе и фиксированном угле $d = \frac{p}{4}$

Рассмотрим также работу МДП в асинхронном режиме при изменении чередования фаз напряжения на статоре (режим противовключения). Механические характеристики для данного режима приведены на рисунке 5. Видно, что и в данном режиме справедливы выводы, сделанные для двигательного режима машины. Кроме того, на рисунке 5 видно, что в режиме противовключения путем изменения напряжения на роторе можно добиться работы машины в III координатном квадранте.

Для получения электромеханических характеристик МДП в асинхронном режиме рассмотрим уравнения электрического равновесия машины (7), (9) и выразим из них ток ротора с учетом соотношения для напряжения на роторе (8):

$$I_R = \frac{U_S k_S s}{\sqrt{R_R^2 + s^2 k_S^2 S^2 X_R^2}}, \quad (16)$$

где $s = 1 - \frac{L_m^2}{L_R L_S}$ - коэффициент рассеяния машины, позволяющий в выражении (16) учесть индуктивное сопротивление статора.

По данным [4], в реальных схемах машин двойного питания из-за отличного от расчетного распределения токов по обмоткам, в расчеты токов необходимо вводить поправочный коэффициент:

$$g_T = \sqrt{\frac{R_R^2}{R_R^2 + s^2 k_S^2 X_K^2} + \frac{R_R^2 + s^2 k_S^2 X_K^2}{s^2 k_S^2 X_m^2}}, \quad (17)$$

где X_μ – индуктивное сопротивление намагничивающей ветви Т-схемы замещения.

Объединив выражения (16) и (17), получим выражение (18) для уточненной электромеханической характеристики МДП в асинхронном режиме:

$$I_{RA} = \frac{U_s k_S s}{\sqrt{R_R^2 + s^2 k_S^2 X_R^2}} \times g_T = \frac{U_s k_S s}{\sqrt{R_R^2 + s^2 k_S^2 X_R^2}} \times \sqrt{\frac{R_R^2}{R_R^2 + s^2 k_S^2 X_K^2} + \frac{R_R^2 + s^2 k_S^2 X_K^2}{s^2 k_S^2 X_m^2}} \quad (18)$$

В соответствии с выражением (18) построим электромеханические характеристики МДП в асинхронном режиме без учета зависимости индуктивных сопротивлений от скольжения и с учетом данной зависимости (рисунок 6).

Сравнив зависимости, приведенные на рисунке 6, с известными электромеханическими характеристиками асинхронного двигателя [3], [5], [6], [7] можно прийти к выводу о том, что наличие добавочного напряжения на роторе значительно изменяет электромеханические характеристики машины. Например, видно, что в режиме противовключения МДП (IV координатный квадрант на рисунке 6) ток ротора превышает номинальный, но в меньших пределах, чем для асинхронного двигателя с фазным ротором в естественной схеме включения. Кроме того, на рисунке 6 хорошо виден участок работы машины в режиме неявнополюсного синхронного двигателя в окрестностях синхронной скорости.

СЕКЦИЯ 1. Теоретические аспекты и методология
построения современного электропривода

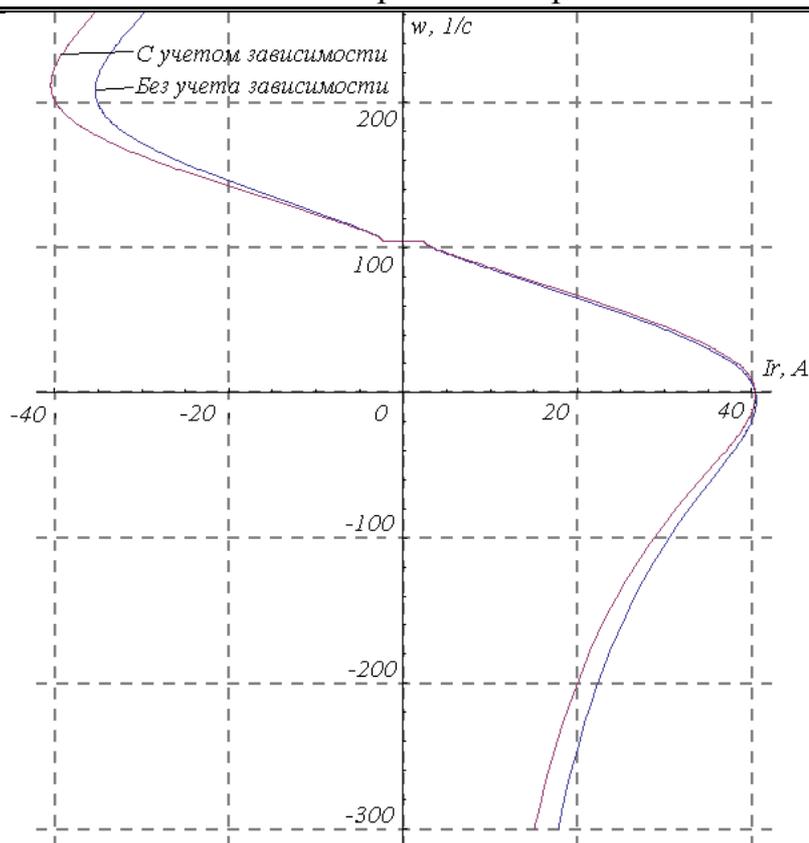


Рисунок 6 – Электромеханические характеристики МДП в асинхронном режиме

Таким образом, исходя из проведенного анализа электромеханических характеристик МДП в асинхронном режиме, можно прийти к следующим выводам:

- 1) В МДП возможно регулирование скорости при помощи изменения амплитуды и фазы напряжения, подведенного к ротору;
- 2) Изменяя величину амплитуды напряжения на роторе и его знаком (направлением), можно добиться как двигательных, так и тормозных режимов работы машины во всех четырех квадрантах координатной плоскости «момент – скольжение»;
- 3) Изменение фазы напряжения на роторе позволяет изменять жесткость механических характеристик МДП;
- 4) Жесткость рабочих участков механических характеристик МДП незначительно отличается от жесткости механических характеристик АД ФР с роторной станцией.

Библиографический список

1. Шрейнер Р. Т. Математическое моделирование электроприводов переменного тока с полупроводниковыми преобразователями частоты. – Екатеринбург: УРО РАН, 2000. – 654 с.
2. Островлянчик В. Ю., Поползин И. Ю. Асинхронный электропривод шахтной подъемной установки, построенный по схеме машины двойного питания с комбинированным управлением // Научные технологии разработки и использования минеральных ресурсов. 2016. №3. – с. 303-309
3. Ключев В. И. Теория электропривода. – М.: Энергоатомиздат, 2001. – 704 с.
4. Онищенко Г. Б., Локтева И. Л. Асинхронные вентильные каскады и машины двойного питания. – М.: Энергия, 1979. – 200 с.
5. Усольцев А. А. Частотное управление асинхронными двигателями. – СПб.: СПбГУ ИТМО, 2006. – 94 с.
6. Основы автоматизированного электропривода / М. Г. Чиликин, М. М. Соколов, В. М. Терехов, А. В. Шинянский. – М.: Энергия, 1974. – 568 с.
7. Островлянчик В. Ю., Поползин И. Ю. Модель асинхронного двигателя для бездатчиковых информационно-управляющих систем автоматизированного электропривода // Вестник Кузбасского государственного технического университета. 2016. – №1 (113). – с. 110-119

УДК 621.313.333

ИССЛЕДОВАНИЕ МЕХАНИЧЕСКИХ ХАРАКТЕРИСТИК
МАШИНЫ ДВОЙНОГО ПИТАНИЯ В СИНХРОННОМ РЕЖИМЕ

В. Ю. Островлянчик, И. Ю. Поползин, Д. А. Маршев

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

На основании уравнений электрического равновесия обмоток машины двойного питания получены и проанализированы выражения для

механической характеристики машины в синхронном режиме, предложен режим динамического торможения по ротору.

Ключевые слова: машина двойного питания, асинхронный двигатель, фазный ротор, механическая характеристика, синхронный двигатель.

Важнейшими характеристиками машины двойного питания (МДП) являются ее механические и электромеханические характеристики. Именно они определяют пригодность ее применения в технологическом процессе подъема и необходимые режимы работы машины. В то же время в литературных источниках их исследованию уделяется недостаточно внимания. Зачастую приводятся только экспериментально полученные данные без их аналитического описания. По этой причине весьма актуальной является задача получения аналитических выражений, описывающих электромеханическое преобразование энергии в МДП и их анализа.

В соответствии с [1], [2] уравнения электрического равновесия обмоток машины относительно потокосцеплений обмоток запишутся как:

$$\begin{aligned} \dot{\bar{U}}_S &= jw_0 \bar{Y}_S + \bar{I}_S R_S, \\ \dot{\bar{U}}_R &= jw_0 s \bar{Y}'_R + \bar{I}'_R R'_R. \end{aligned} \quad (1)$$

где

\bar{U}_S, \bar{U}_R – комплексные значения напряжений на статоре и роторе соответственно;

\bar{I}_S, \bar{I}'_R – комплексные значения тока статора и приведенного тока ротора соответственно;

\bar{Y}_S, \bar{Y}'_R – комплексные значения потокосцепления статора и приведенного потокосцепления ротора соответственно;

R_S, R'_R – активное сопротивление статора и приведенное активное сопротивление ротора соответственно;

L_S, L_R, L_m – индуктивности статора, ротора и намагничивания соответственно;

w_0 – скорость вращения магнитного поля статора;

s – скольжение;

z_{II} – число пар полюсов машины;

M – электромагнитный момент машины.

Определим момент как функцию векторного произведения потокосцеплений обмоток статора и ротора:

$$M = -\frac{3}{2} z_{II} \frac{L_m}{L_S L_R - L_m^2} [\bar{Y}_S \wedge \bar{Y}_R] \quad (2)$$

Обозначим угол сдвига фаз между напряжением на статоре и напряжением, подведенным к ротору, как δ и примем, что начальная фаза вектора напряжения на статоре машины \bar{U}_S равна 0. В этом случае комплексное значение напряжения на роторе определяется как:

$$\bar{U}_R = U_R e^{j\delta} \quad (3)$$

Для асинхронного режима работы машины двойного питания независимо задаются амплитуда U_R и фаза δ напряжения, подведенного к ротору, а частота всегда равна частоте скольжения.

Введем коэффициент рассеяния машины:

$$s = 1 - \frac{L_m^2}{L_S L_R} \quad (4)$$

и запишем выражения для связи токов и потокосцеплений обмоток машины:

$$\begin{aligned} \dot{\bar{I}}_S &= \frac{1}{sL_S} \bar{Y}_S - \frac{k_R}{sL_S} \bar{Y}_R \\ \dot{\bar{I}}_R &= -\frac{k_S}{sL_R} \bar{Y}_S - \frac{1}{sL_R} \bar{Y}_R, \end{aligned} \quad (5)$$

где k_S , k_R – коэффициенты связи статора и ротора соответственно.

Подставив выражения для токов (5) и момента (2) в систему (1), получим:

$$\begin{aligned} \dot{\bar{U}}_S &= \frac{\Re R_S}{sL_S} + j\omega_0 \frac{\Im \bar{Y}_S}{\theta} - \frac{R_S k_R}{sL_S} \bar{Y}_R, \\ \dot{\bar{U}}_R &= -\frac{R_R k_S}{sL_R} \bar{Y}_S + \frac{\Re R_R}{sL_R} + j\omega_0 s \frac{\Im \bar{Y}_R}{\theta}, \\ \dot{\bar{M}} &= -\frac{3}{2} p_{II} \frac{L_m}{L_S L_R - L_m^2} [\bar{Y}_S \wedge \bar{Y}_R]. \end{aligned} \quad (6)$$

В большинстве случаев можно принять, что произведение sL_R , называемое эквивалентной индуктивностью машины, определится по соотношению [3]:

$$sL_R = L_K,$$

где $L_K = L_R' + L_S$ - индуктивность машины в режиме короткого замыкания. Индуктивности L_K соответствует реактивное сопротивление короткого замыкания X_K :

$$X_K = 2pf_c L_K = X_{S|f_c} + X'_{R|f_c},$$

где f_c – номинальная частота напряжения питающей сети.

Разделим обе части второго уравнения системы (6) на ω_0 :

$$\frac{\bar{U}_R}{\omega_0} = - \frac{R_R k_S}{\omega_0 s L_R} \bar{Y}_S + \frac{R_R}{\omega_0 s L_R} + j s \frac{\bar{Y}_R}{\omega_0}$$

С учетом эквивалентной индуктивности выполнится равенство $\frac{R_R}{\omega_0 s L_R} \gg \frac{R_R}{X_K} = s_{KP}$, где s_{KP} – критическое скольжение машины.

Пренебрегая активным сопротивлением статора, запишем первые два уравнения системы (6) в виде:

$$\begin{aligned} \bar{Y}_S &= \frac{\bar{U}_S}{j\omega_0}, \\ \bar{Y}_R &= \frac{\bar{U}_R}{\omega_0 s_{KP} + js} + \frac{\bar{U}_S k_S}{j\omega_0} \frac{s_{KP}}{s_{KP} + js}, \\ M &= -\frac{3}{2} p_{\Pi} \frac{L_m}{L_S L_R - L_m^2} [\bar{Y}_S - \bar{Y}_R]. \end{aligned} \quad (7)$$

Система (7) неудобна для анализа и применения на практике, поскольку идентификация потокосцеплений обмоток машины является сложной задачей.

Введем понятия относительного напряжения на роторе и уточненного относительного напряжения:

$$U_{ROTH} = \frac{U_R}{U_S},$$

$$U_R^* = U_{ROTH} / k_S.$$

где U_{ROTH} – относительное напряжение на роторе, U_R^* – уточненное относительное напряжение на роторе. С учетом уточненного относительного напряжения на роторе, а также вышеприведенного выражения для напряжения на роторе $\bar{U}_R = U_R e^{jd}$, получим выражение:

$$U_R = U_R e^{jd} = U_R^* k_S U_S e^{jd}. \quad (8)$$

Проекции потокосцеплений ротора и статора (7) на оси системы координат x - y , связанной с полем статора, определяются как:

$$\begin{aligned} \dot{Y}_{Sx} &= 0, \\ \dot{Y}_{Sy} &= -\frac{U_S}{w_0}, \\ \dot{Y}_{Ry} &= \frac{R_R L_R s k_S U_S}{R_R^2 + w_0^2 s^2 S^2 L_R^2} \frac{\mathfrak{a}}{\mathfrak{e}} U_2^* \cos d + \frac{w_0 s S L_R U_2^*}{R_R} - s \frac{\ddot{\theta}}{\theta}, \\ \dot{Y}_{Rx} &= \frac{R_R L_R s k_S U_S}{R_R^2 + w_0^2 s^2 S^2 L_R^2} \frac{\mathfrak{a}}{\mathfrak{e}} U_2^* \sin d - \frac{w_0 s S L_R U_2^*}{R_R} \cos d - s_{KP} \frac{\ddot{\theta}}{\theta}. \end{aligned} \quad (9)$$

В указанной системе координат выражение для момента примет вид:

$$M = \frac{3}{2} p_{II} \frac{k_S}{s L_R} (Y_{Rx} Y_{Sy} - Y_{Ry} Y_{Sx}). \quad (10)$$

Подставив выражения (9) в выражение (10), получим:

$$M = \frac{3}{2} p_{II} \frac{k_S^2 U_S^2}{w_0^2 s L_R} \frac{s_{KP} s}{s_{KP}^2 + s^2} \frac{\dot{\mathfrak{e}}}{\mathfrak{e}} \left(1 - \frac{U_2^* \mathfrak{a}}{s \mathfrak{e}} \cos d + \frac{s}{s_{KP}} \sin d \frac{\ddot{\theta}}{\theta} \right). \quad (11)$$

Значение критического момента двигателя рассчитывается как:

$$M_{KP} = \frac{3}{2} p_{II} \frac{k_S^2 U_S^2}{w_0^2 s L_R}. \quad (12)$$

Подставив (12) в (11), получим выражение, связывающее момент, развиваемый машиной, скольжение, фазу и относительную амплитуду напряжения в цепи ротора:

$$M = \frac{2M_{KP}}{s_{KP}/s + s/s_{KP}} \frac{\dot{\mathfrak{e}}}{\mathfrak{e}} \left(1 - \frac{U_R^* \mathfrak{a}}{s \mathfrak{e}} \cos d + \frac{s}{s_{KP}} \sin d \frac{\ddot{\theta}}{\theta} \right). \quad (14)$$

Выражение (14) можно разбить на 2 компонента:

$M_E = \frac{2M_{KP}}{s_{KP}/s + s/s_{KP}}$ - момент, развиваемый асинхронным двигателем (формула Клосса);

$\frac{\dot{\mathfrak{e}}}{\mathfrak{e}} \left(1 - \frac{U_R^* \mathfrak{a}}{s \mathfrak{e}} \cos d + \frac{s}{s_{KP}} \sin d \frac{\ddot{\theta}}{\theta} \right)$ - множитель, связанный с питанием ротора от внешнего источника напряжения.

Выражение (14) определяет механические характеристики машины двойного питания.

При питании ротора машины постоянным напряжением $s=0$. В этом режиме выражение (14) с учетом выражения для критического скольжения примет вид :

$$M = - \frac{3}{2} p_{II} \frac{k_S U_S U_R}{w_0 R_R} \cos d . \quad (15)$$

Выражение (15) может быть записано и в другом виде. При питании ротора машины постоянным напряжением ток ротора является током возбуждения машины и определяется по выражению $I_R = I_B = \frac{U_R}{I_R}$. В этом случае магнитный поток, который создается током возбуждения в воздушном зазоре, очевидно, определится как $F_B = L_m I_B$. Величина ЭДС, наводимой током возбуждения в обмотках статора, можно рассчитать по выражению $E_0 = w_0 F_B$. Обозначив угол между вектором напряжения на статоре \bar{U}_S и вектором ЭДС, наводимой в статоре током возбуждения \bar{E}_0 , как θ , и принимая во внимание, что $q = -\frac{\alpha}{\zeta} d + \frac{p}{2} \frac{\ddot{\theta}}{\dot{\theta}}$ [2],[3], получим выражение для угловой характеристики машины двойного питания, работающей в режиме неявнополюсного синхронного двигателя:

$$M = - \frac{3}{2} p_{II} \frac{U_S E_0}{w_0 X_S} \sin q . \quad (16)$$

Выражение (16) полностью аналогично выражению для угловой характеристики неявнополюсного синхронного двигателя.

В случае питания ротора от источника напряжения с независимым заданием частоты напряжения, подведенного к ротору, в выражении (14) скольжение и величина напряжения на роторе принимаются постоянными, и выражение (14) определяет угловую характеристику машины двойного питания в синхронном режиме.

В синхронном двигателе момент определяется углом θ , определяющим отставание поля ротора от поля статора и определяемым по выражению $q = j_0 - j_{эл}$, где $j_0 = w_0 t$ - угол поля статора. В синхронном режиме работы машины двойного питания частота тока ротора в общем случае не равна 0, что влечет

изменение угла сдвига между изображающими векторами напряжений на статоре и роторе под действием нагрузки и изменения скольжения. Поэтому угол между этими векторами φ_{RS} в общем случае не равен углу θ (равенство имеет место только при питании ротора машины постоянным напряжением, см. выше) [2].

В системе координат x - y , связанной с полем статора, уравнения МДП имеют вид (роторные координаты и параметры приведены к статорным):

$$\begin{aligned} \dot{\hat{u}}_{Sx} &= i_{Sx} R_S + \frac{dy_{Sx}}{dt} - w_0 y_{Sy}, \\ \dot{\hat{u}}_{Sy} &= i_{Sy} R_S + \frac{dy_{Sy}}{dt} + w_0 y_{Sx}, \\ \dot{\hat{u}}_{Rx}' &= i_{Rx}' R_R' + \frac{dy_{Rx}}{dt} - (w_0 - w) y_{Ry}, \\ \dot{\hat{u}}_{Ry}' &= i_{Ry}' R_S' + \frac{dy_{Ry}}{dt} + (w_0 - w) y_{Rx}, \\ \dot{\hat{m}} &= p_{II} \frac{L_m}{L_S} (y_{Sy} i_{Rx} - y_{Sx} i_{Ry}). \end{aligned} \quad (17)$$

Рассмотрим статический режим работы машины ($d/dt=0$). При этом примем, что активное сопротивление статора мало по сравнению с активным сопротивлением ротора и реактивными сопротивлениями обмоток ($R_S=0$) [2].

Обобщенный вектор подведенного к ротору напряжения в системе координат d - q , связанной с ротором, раскладывается на две составляющих:

$$\begin{aligned} \dot{\hat{u}}_{Rd} &= -U_{R \max} \cos wt, \\ \dot{\hat{u}}_{Rq} &= -U_{R \max} \sin wt. \end{aligned} \quad (18)$$

Обобщенный вектор напряжения на статоре в системе координат, связанной со статором, в синхронном режиме МДП при $f_R \neq 0$, раскладывается на две составляющих:

$$\begin{aligned} \dot{\hat{u}}_{Sa} &= U_{S \max} \sin(w_0 t + j_{RS}), \\ \dot{\hat{u}}_{Sb} &= -U_{S \max} \cos(w_0 t + j_{RS}). \end{aligned} \quad (19)$$

Используя формулы координатных преобразований [2] и опуская промежуточные преобразования, получим выражения для проекций обобщенных векторов напряжений на статоре и роторе на оси системы координат x - y , связанной с полем статора:

$$\begin{aligned} \dot{i} u_{Sx} &= U_{S \max} \sin j_{RS}, \\ \dot{i} u_{Sy} &= -U_{S \max} \cos j_{RS}, \\ \dot{i} u_{Rx} &= -U_{R \max}, \\ \dot{i} u_{Ry} &= 0. \end{aligned} \quad (20)$$

Осуществив подстановку (20) в (17), получим:

$$\begin{aligned} \dot{i} U_{S \max} \sin j_{RS} &= -w_0 Y_{Sy}, \\ \dot{i} -U_{S \max} \cos j_{RS} &= w_0 Y_{Sx}, \\ \dot{i} -U_{R \max} &= I_{Rx}' R_R' - (w_0 - w) Y_{Ry}, \\ \dot{i} 0 &= I_{Ry}' R_R' + (w_0 - w) Y_{Rx}, \\ \dot{i} M &= p_{II} \frac{L_m}{L_S} (Y_{Sy} I_{Rx}' - Y_{Sx} I_{Ry}'). \end{aligned} \quad (21)$$

Определим значения проекций обобщенных векторов потокоцеплений статора и ротора:

$$\begin{aligned} \dot{i} Y_{Sx} &= -\frac{e U_{S \max}}{c} \frac{\ddot{\theta}}{w_0 \dot{\theta}} \cos j_{RS}, \\ \dot{i} Y_{Sy} &= -\frac{e U_{S \max}}{c} \frac{\ddot{\theta}}{w_0 \dot{\theta}} \sin j_{RS}, \\ \dot{i} Y_{Rx} &= \frac{L_m}{L_S} Y_{Sx} + \frac{L_S L_R - L_m^2}{L_S} I_{Rx}', \\ \dot{i} Y_{Ry} &= \frac{L_m}{L_S} Y_{Sy} + \frac{L_S L_R - L_m^2}{L_S} I_{Ry}'. \end{aligned}$$

С учетом того, что $\frac{L_S L_R - L_m^2}{L_S} = \frac{X_S + X_R'}{w_0} = \frac{X_K}{w_0}$, выражение (21)

примет вид:

$$\begin{aligned} \dot{i} R_R' I_{Rx}' - s X_K I_{Ry}' &= -U_{R \max}' - s \frac{L_m}{L_S} U_{S \max} \sin j_{RS}, \\ \dot{i} s X_K I_{Rx}' + R_R' I_{Ry}' &= s \frac{L_m}{L_S} U_{S \max} \cos j_{RS}, \\ \dot{i} M &= p_{II} \frac{L_m}{L_S} \frac{U_{S \max}}{w_0} (-\cos j_{RS} I_{Rx}' + \sin j_{RS} I_{Ry}'). \end{aligned} \quad (22)$$

Разрешив первые два уравнения системы (22) относительно проекций вектора приведенного к статору тока ротора и опустив

промежуточные преобразования, получим выражение для момента МДП в синхронном режиме:

$$M = \frac{\alpha L_m \ddot{\theta}^2}{\xi L_S \dot{\theta}} \frac{3sR'_R U_S^2}{w_0 (R_R'^2 + X_K'^2 s^2)} + \frac{L_m}{L_S} \frac{3U_S U_R}{w_0 \sqrt{R_R'^2 + X_K'^2 s^2}} \sin q, \quad (23)$$

где $q = j_{RS} + \arctg \frac{sX_K'}{R_R'}$.

В выражении для момента МДП, работающей в синхронном режиме, присутствует два компонента: компонент, определяющий естественную механическую характеристику асинхронного

двигателя $M_e = \frac{\alpha L_m \ddot{\theta}^2}{\xi L_S \dot{\theta}} \frac{3sR'_R U_S^2}{w_0 (R_R'^2 + X_K'^2 s^2)}$, и компонент, определяющий

синхронную составляющую момента МДП в синхронном режиме и зависящий от системы управления $M_c = \frac{L_m}{L_S} \frac{3U_S U_R}{w_0 \sqrt{R_R'^2 + X_K'^2 s^2}} \sin q$.

Синхронная составляющая момента обусловлена взаимодействием магнитного потока, возбуждаемого в роторе напряжением, подводимым от преобразователя, с магнитным потоком статора. При работе МДП в синхронном режиме под влиянием нагрузки изменяется угол θ , а скольжение остается неизменным и соответствующим заданной частоте напряжения на роторе. В целом, как видно из вышеприведенных соображений и в соответствии с [2], [3], работа МДП в синхронном режиме аналогична работе явнополюсного синхронного двигателя с той разницей, что демпфирующее действие асинхронной составляющей момента МДП в синхронном режиме при $-s_{KP} < s < s_{KP}$ значительно более выражено, чем таковое для явнополюсной синхронной машины. При $|s| > s_{KP}$ асинхронная составляющая момента оказывает раскачивающее воздействие на МДП [2].

В соответствии с полученным выражением для механической характеристикой МДП в синхронном режиме были построены синхронной составляющей момента от скольжения (рисунок 1) и зависимости момента МДП от частоты напряжения на роторе (рисунок 2).

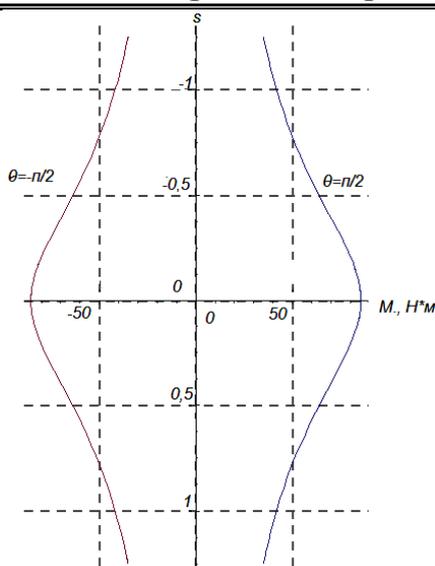


Рисунок 1 – Зависимость синхронной составляющей момента машины от скольжения при $U_R = U_S/k_T$

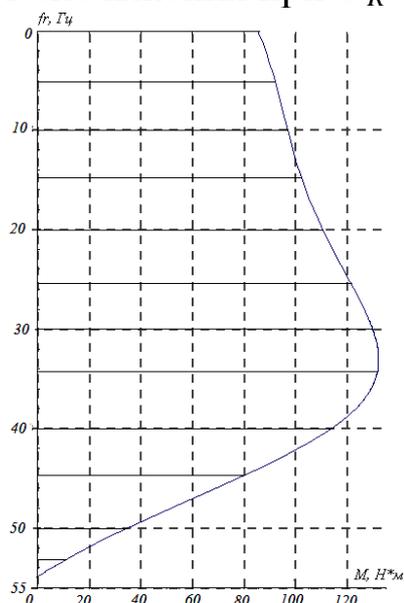


Рисунок 2 – Зависимость момента МДП в синхронном режиме от частоты напряжения на роторе

По рисунку 2 видно, что при увеличении частоты напряжения на роторе момент, развиваемый машиной, растет, а затем резко падает. Эти данные подтверждают соображения, приведенные в [2]. Горизонтальные линии на рисунке соответствуют механическим характеристикам машины на разных частотах. Видно, что, в отличие от синхронной машины, перегрузочная способность машины изменяется в зависимости от частоты (граница устойчивой работы определяется асинхронной

составляющей момента и показана кривой на рисунке 2), и на частоте 50 Гц критический момент примерно равен номинальному моменту машины, что несколько ограничивает область применения МДП в синхронном режиме в качестве приводного двигателя.

Отдельным подвидом синхронного режима можно также считать динамическое торможение МДП по ротору. В этом режиме ротор машины запитан от источника постоянного тока, а статор отключен от сети и замкнут на добавочные сопротивления. Запишем уравнения Кирхгофа для данного режима с учетом того, что статор отключен от сети ($U_S=0$, $\omega_0=0$):

$$\begin{aligned} \dot{0} &= \bar{I}_S R_S - j\omega L_m \bar{I}_R, \\ \dot{U}_R &= \bar{I}_R R_R - j\omega L_R \bar{I}_R - j\omega L_m \bar{I}_R, \\ \dot{\bar{I}}_R &= \bar{I}_S + \bar{I}_m = const. \end{aligned} \quad (24)$$

Выражения для режима динамического торможения АД по ротору примут вид:

$$\begin{aligned} M_{ДТККР} &= \frac{3(X_m I_{ДТ})^2}{2\omega_0 (X_R + X_m)}, \\ s_{ДТККР} &= \frac{R_R}{X_R + X_m}, \\ s_{ДТК} &= \frac{\omega}{\omega_0}. \end{aligned} \quad (25)$$

Используя выражение (14) и полагая $U_R^*=0$ (т.к. $U_S=0$), получим выражение для электромеханической характеристики машины в режиме динамического торможения:

$$M_{ДТ} = \frac{2M_{ДТККР}}{s_{ДТК} / s + s / s_{ДТК}}. \quad (26)$$

Зависимость тормозного момента двигателя при динамическом торможении по ротору от тока динамического торможения приведена на рисунке 3.

Семейство механических характеристик МДП в режиме динамического торможения по ротору приведено на рисунке 4. Видно, что торможение таким способом достаточно эффективно при правильно выбранном токе динамического торможения (номинальный момент исследуемого двигателя составляет 37,5

H^*m), причем его эффективность увеличивается с падением скорости до определенных пределов, а затем резко уменьшается.

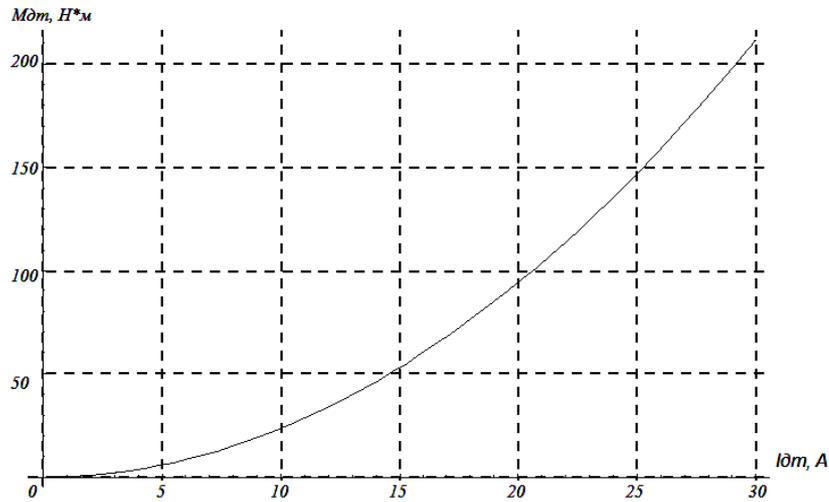


Рисунок 3 – Зависимость тормозного момента от тока динамического торможения

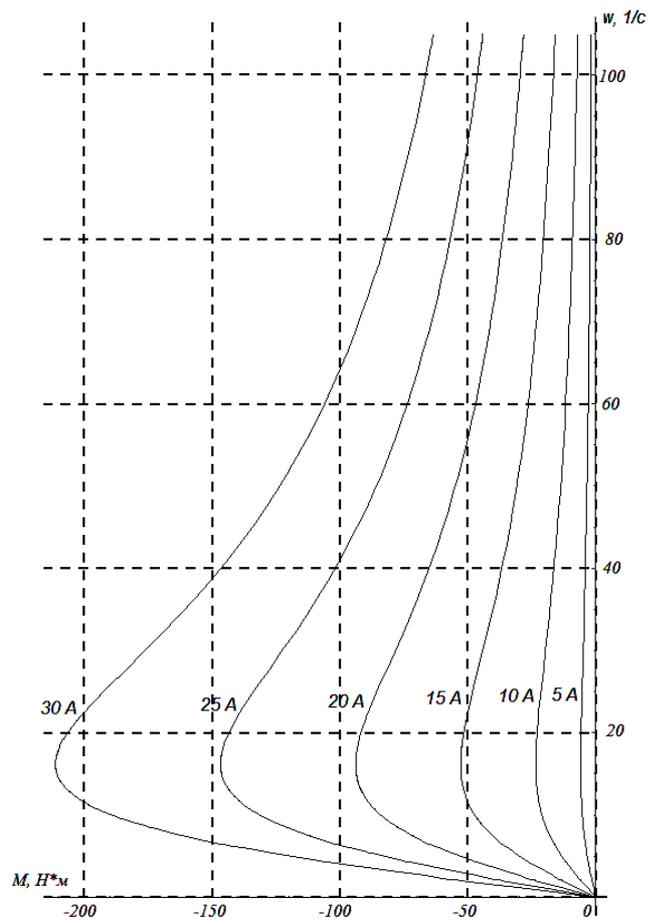


Рисунок 4 – Механические характеристики МДП в режиме динамического торможения

В целом данный режим аналогичен режиму динамического торможения асинхронного двигателя, однако более предпочтителен для МДП, поскольку реализация динамического торможения по статору в данном случае требует установки в цепи статора дополнительного высоковольтного управляемого источника постоянного тока.

Таким образом, исходя из проведенного анализа электромеханических характеристик МДП в синхронном режиме, можно прийти к следующим выводам:

- 1) Реализация синхронного режима МДП осуществляется питанием цепи ротора постоянным напряжением либо напряжением фиксированной частоты, не равной частоте скольжения;
- 2) Скорость вращения ротора МДП в синхронном режиме определяется частотой напряжения на роторе;
- 3) Механические характеристики МДП в синхронном режиме в целом аналогичны механическим характеристикам синхронного двигателя, однако перегрузочная способность МДП зависит от частоты питающего ротор напряжения;
- 4) Демпфирующие свойства МДП в рабочем диапазоне скольжений асинхронной составляющей выше, чем у синхронного двигателя;
- 5) Для МДП в синхронном режиме возможен особый режим динамического торможения по ротору.

Библиографический список

1. Шрейнер Р. Т. Математическое моделирование электроприводов переменного тока с полупроводниковыми преобразователями частоты. – Екатеринбург: УРО РАН, 2000. – 654 с.
2. Ключев В. И. Теория электропривода. – М.: Энергоатомиздат, 2001. – 704 с.
3. Онищенко Г. Б., Локтева И. Л. Асинхронные вентильные каскады и машины двойного питания. – М.: Энергия, 1979. – 200 с.
4. Усольцев А. А. Частотное управление асинхронными двигателями. – СПб.: СПбГУ ИТМО, 2006. – 94 с.

УДК 004.942:621.313.333

МАТЕМАТИЧЕСКАЯ МОДЕЛЬ МАШИНЫ ДВОЙНОГО
ПИТАНИЯ В ПОДВИЖНОЙ САМООРИЕНТИРУЮЩЕЙСЯ
СИСТЕМЕ КООРДИНАТ

В. Ю. Островляничик, И. Ю. Поползин

*Федеральное государственное бюджетное образовательное
учреждение высшего образования*

«Сибирский государственный индустриальный университет»

На основании уравнений электрического равновесия обмоток машины двойного питания и предложенного метода подвижной самоориентирующейся системы координат получены и проанализированы выражения, описывающие динамические процессы электромеханического преобразования энергии в машине двойного питания.

Ключевые слова: машина двойного питания, асинхронный двигатель, фазный ротор, обобщенная электрическая машина, математическая модель.

Математическое описание динамических электромеханических процессов в машине двойного питания является достаточно нетривиальной задачей [1], [2] в силу того, что в роторе действует дополнительный источник напряжения. Примем некоторые допущения, несущественные при рассмотрении режимов работы машины:

- 1) Машина не содержит демпферных контуров;
- 2) Фазы статора и ротора машины симметричны;
- 3) Магнитная система машины не насыщена, и, как следствие, в ней отсутствуют нелинейные процессы;
- 4) Токи в обмотках статора и ротора синусоидальны;
- 5) Магнитное поле синусоидально распространено по окружности статора.

Синтез математической модели машины целесообразно проводить, используя двухфазную модель обобщенной электрической машины. Для перехода от реальных токов и напряжений фаз машины к их двухфазным эквивалентам при этом используется преобразование Парка-Горева. Введем в рассмотрение двухфазную модель с подвижной самоориентирующейся системой координат [3].

При этом действительную ось вводимой системы координат направляют по направляющему вектору, и, таким образом, избавляются от некоторых ортогональных ему проекций. Система координат, обозначаемая как gi , вращается с переменной скоростью, зависящей от фазового сдвига между опорным и направляющим векторами. В качестве направляющего вектора может быть выбран любой вектор, характеризующий электромагнитное состояние машины (потокосцепления статора и ротора, токи статора и ротора). Целесообразно [3] выбрать в качестве направляющего вектора вектор тока статора (рисунок 1), поскольку он доступен прямой идентификации.

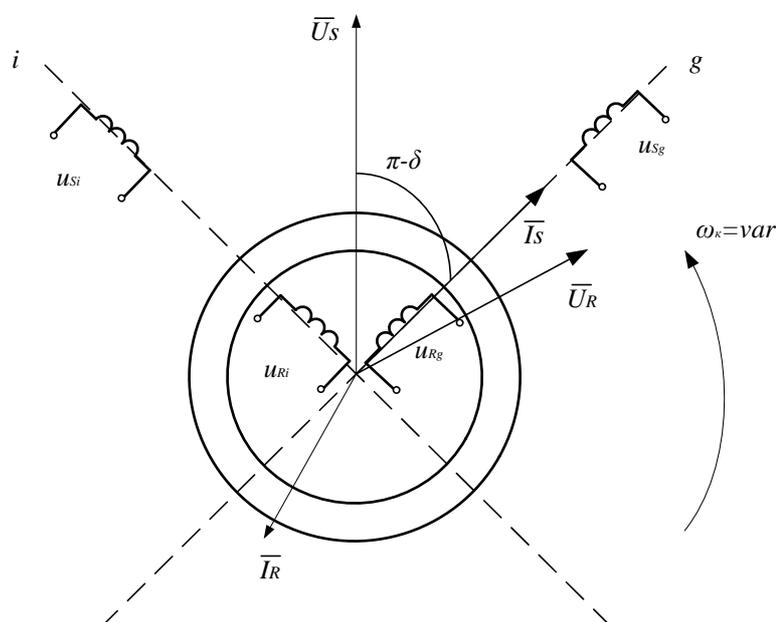


Рисунок 1 – Модель МДП в подвижной системе координат с направляющим вектором тока статора

На рисунке 1 приняты следующие обозначения:

g – действительная ось подвижной системы координат;

i – мнимая ось подвижной системы координат;

\bar{I}_S, \bar{I}_R – изображающие векторы токов статора и ротора соответственно;

\bar{U}_S, \bar{U}_R – изображающие векторы напряжений на статоре и роторе соответственно;

$\pi-\delta$ – фазовый сдвиг между напряжением на роторе и напряжением на статоре

ω_k – угловая скорость вращения системы координат.

Индексами g и i обозначены проекции обобщающих векторов на соответствующие оси координат.

Запишем уравнения электрического равновесия обмоток статора и ротора машины в векторной форме для системы координат, вращающейся с произвольной скоростью ω_k :

$$\begin{aligned} \dot{\bar{U}}_S &= \frac{d\bar{Y}_S}{dt} + j\omega_k \bar{Y}_S + R_S \bar{I}_S, \\ \dot{\bar{U}}_R &= \frac{d\bar{Y}_R}{dt} + j(\omega_k - \omega) \bar{Y}_S + R_R \bar{I}_R. \end{aligned} \quad (1)$$

где

\bar{U}_S, \bar{U}_R – комплексные значения напряжений на статоре и роторе соответственно;

\bar{I}_S, \bar{I}_R – комплексные значения тока статора и ротора соответственно;

\bar{Y}_S, \bar{Y}_R – комплексные значения потокосцепления статора и ротора соответственно;

R_S, R_R – активное сопротивление статора и ротора соответственно;

$L_S, L_R,$ – индуктивности статора и ротора соответственно.

Запишем систему уравнений (1) совместно с выражением для электромагнитного момента машины, в осях gi (рисунок 1) с учетом скорости их вращения:

$$\begin{aligned} \dot{\bar{U}}_S &= R_S \bar{I}_S + L_S \frac{d\bar{I}_S}{dt} + L_m \frac{d\bar{I}_R}{dt} + j\omega_g L_S \bar{I}_S + j\omega_g L_m \bar{I}_R, \\ \dot{\bar{U}}_R &= R_R \bar{I}_R + L_R \frac{d\bar{I}_R}{dt} + L_m \frac{d\bar{I}_S}{dt} + j\omega_r L_R \bar{I}_R + j\omega_r L_m \bar{I}_S, \\ \dot{M} &= -\frac{3}{2} p_{II} L_m [\bar{I}_S \cdot \bar{I}_R]. \end{aligned} \quad (2)$$

Сонаправим ось g с вектором тока статора и найдем проекции изображающих векторов из системы (2) на оси gi (3). При этом проекция изображающего вектора тока статора на ось i будет равна 0, модуль проекции тока статора на ось g всегда будет равен амплитудному значению тока, а фаза всегда равна 0, поскольку вектор сонаправлен с действительной осью выбранной системы координат. Таким образом, в выбранной системе координат ток

Согласно приведенной векторной диаграмме, проекции обобщающих векторов координат машины на оси системы координат имеют следующие знаки (с учетом постоянства напряжения на статоре МДП):

$$\begin{aligned}
 \bar{I}_{Sg} &= \bar{I}_S > 0, \\
 \bar{I}_{Si} &= 0, \\
 \bar{I}_{Rg} &< 0, \\
 \bar{I}_{Ri} &< 0, \\
 \bar{U}_{Sg} &= \text{const} > 0, \\
 \bar{U}_{Si} &= \text{const} > 0, \\
 \bar{U}_{Rg} &> 0, \\
 \bar{U}_{Ri} &< 0.
 \end{aligned} \tag{4}$$

Запишем систему (3) с учетом (4), перейдя от изображающих векторов к мгновенным значениям их проекций на оси координат:

$$\begin{aligned}
 \dot{i} u_{Sg} &= L_S \frac{di_{Sg}}{dt} + R_S i_{Sg} - L_m \frac{di_{Rg}}{dt}, \\
 \dot{i} u_{Si} &= -w_g L_S i_{Sg} + w_g L_m i_{Rg}, \\
 \dot{i} u_{Rg} &= L_R \frac{di_{Rg}}{dt} + R_R i_{Rg} - w_R L_m i_{Ri} + L_m \frac{di_{Sg}}{dt}, \\
 \dot{i} u_{Ri} &= L_R \frac{di_{Ri}}{dt} + R_R i_{Ri} + w_R L_m i_{Sg}, \\
 \dot{i} M &= \frac{3}{2} p_{II} L_m i_{Sg} i_{Ri}.
 \end{aligned} \tag{5}$$

Применим к уравнениям системы (5) преобразование Лапласа и запишем их таким образом, чтобы в их левой части присутствовал ток соответствующей обмотки:

$$\begin{aligned}
 \dot{i} i_{Sg} (pL_S + R_S) &= u_{Sg} + p i_{Rg} L_m, \\
 \dot{i} 0 &= u_{Si} + w_g L_S i_{Sg} - w_g L_m i_{Rg}, \\
 \dot{i} i_{Rg} (pL_R + R_R) &= u_{Rg} + w_R L_m i_{Ri} - p i_{Sg} L_m, \\
 \dot{i} i_{Ri} (pL_R + R_R) &= u_{Ri} - w_R L_m i_{Sg}.
 \end{aligned} \tag{6}$$

Введем следующие обозначения:

$$T_s = \frac{L_S}{R_S} \text{ – постоянная времени статора;}$$

$T_R = \frac{L_R}{R_R}$ - постоянная времени ротора.

Выразив токи соответствующих обмоток из выражения (6) и запишем выражения для них совместно с выражением для элеткромагнитного момента машины и основным уравнением движения привода, исключив второе уравнение системы (6), получим систему уравнений (7).

Система уравнений (7) полностью описывает электромеханическое преобразование энергии в МДП и является ее математической моделью в системе координат, связанной с изображающим вектором тока статора.

В соответствии с системой (7) структурная схема МДП имеет вид, приведенный на рисунке 3.

Для нахождения проекций обобщающих векторов координат машины необходимо вычисление углов между векторами. Для осуществления этого построим угловую диаграмму координатных преобразований [2] (рисунок 4).

$$\left\{ \begin{array}{l} i_{Sg} = \frac{1/R_S}{T_S p + 1} (u_{Sg} + p i_{Rg} L_m), \\ i_{Rg} = \frac{1/R_R}{T_R p + 1} (u_{Rg} + w_R L_m i_{Ri} - p i_{Sg} L_m), \\ i_{Ri} = \frac{1/R_R}{T_R p + 1} (u_{Ri} - w_R L_m i_{Sg}), \\ M = \frac{3}{2} p_{II} L_m i_{Sg} i_{Ri}, \\ M - M_C = J_{\Sigma} \frac{dw}{dt}. \end{array} \right. \quad (7)$$

СЕКЦИЯ 1. Теоретические аспекты и методология построения современного электропривода

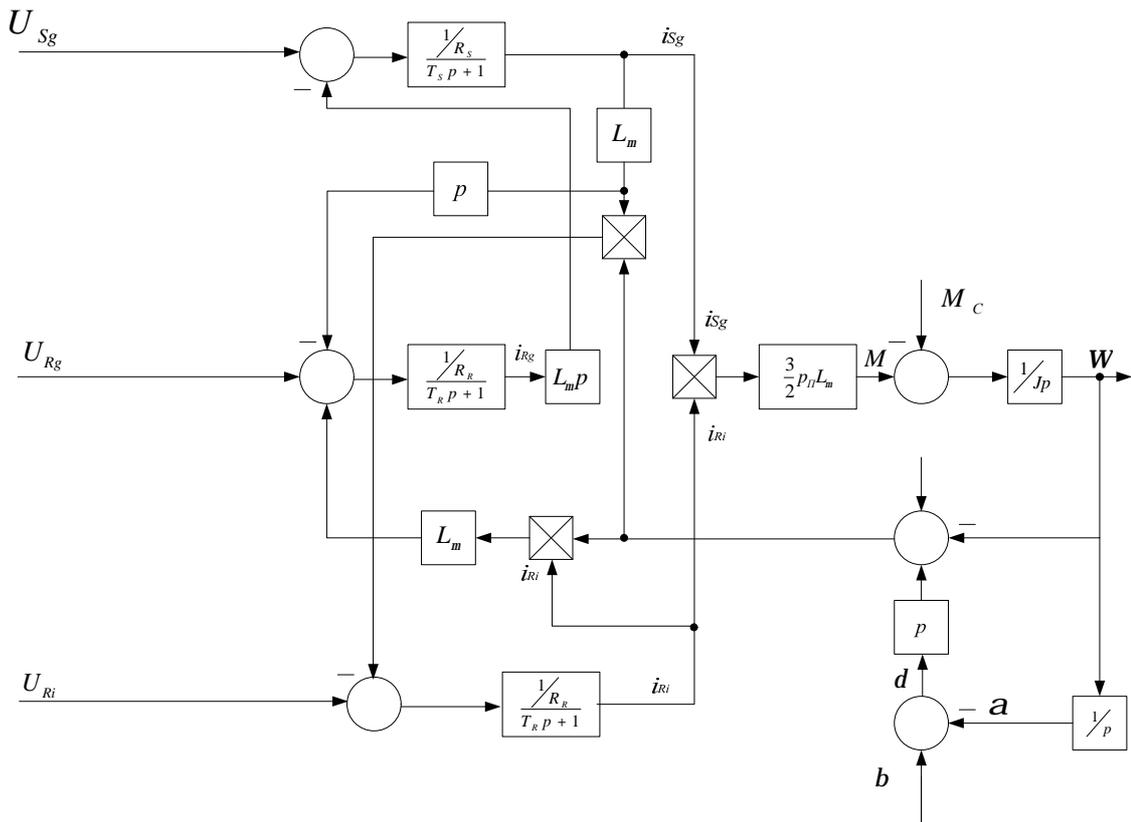


Рисунок 3 – Структурная схема машины двойного питания в системе координат, связанной с током статора

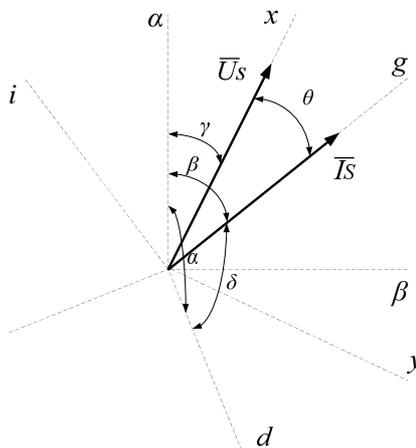


Рисунок 5 – Угловая диаграмма координатных преобразований МДП

На рисунке 5 приняты следующие обозначения:
 $\alpha\beta$ – система координат, связанная с обмоткой фазы А статора машины;
 gi – система координат, связанная с током статора машины;

dq – система координат, связанная с ротором машины;
 $xу$ – система координат, связанная с полем машины
(напряжением на статоре);

$\alpha, \beta, \gamma, \delta, \theta$ – углы между координатными осями.

Угол α , как следует из диаграммы, является углом положения ротора и может быть измерен непосредственно или определен с помощью измерения угловой скорости ротора.

Угол β рассчитывается по следующим выражениям:

$$b = \arcsin \frac{i_{sb}}{\sqrt{i_{sa}^2 + i_{sb}^2}}, \quad (8)$$

либо

$$b = \arccos \frac{i_{sb}}{\sqrt{i_{sa}^2 + i_{sb}^2}}, \quad (9)$$

где

$$i_{sa} = i_{SA}, \quad (10)$$

$$i_{sb} = \frac{i_{SC} - i_{SB}}{\sqrt{3}}, \quad (11)$$

i_{SA}, i_{SB}, i_{SC} – токи фаз статора.

Угол γ определяется по следующему выражению:

$$g = \arccos \frac{u_{SC} - u_{SB}}{\sqrt{3}u_S}, \quad (12)$$

где

u_{SB}, u_{SC} – напряжения на соответствующих фазах статора;
 u_S – модуль изображающего вектора напряжения на статоре.

Углы δ, θ определяются непосредственно по диаграмме:

$$d = b - a, \quad (13)$$

$$q = b - g. \quad (14)$$

Переходные процессы предложенной модели были сопоставлены с переходными процессам реального двигателя. Результаты сопоставления переходных процессов пуска приведены на рисунке 6.

Переходный процесс скорости предложенной модели практически совпадает с переходным процессом скорости реальной машины. Погрешность модели не превышает 2% в динамическом режиме и 1% в статическом, при этом форма

переходных процессов модели не искажена, частоты и фаза колебаний совпадают.

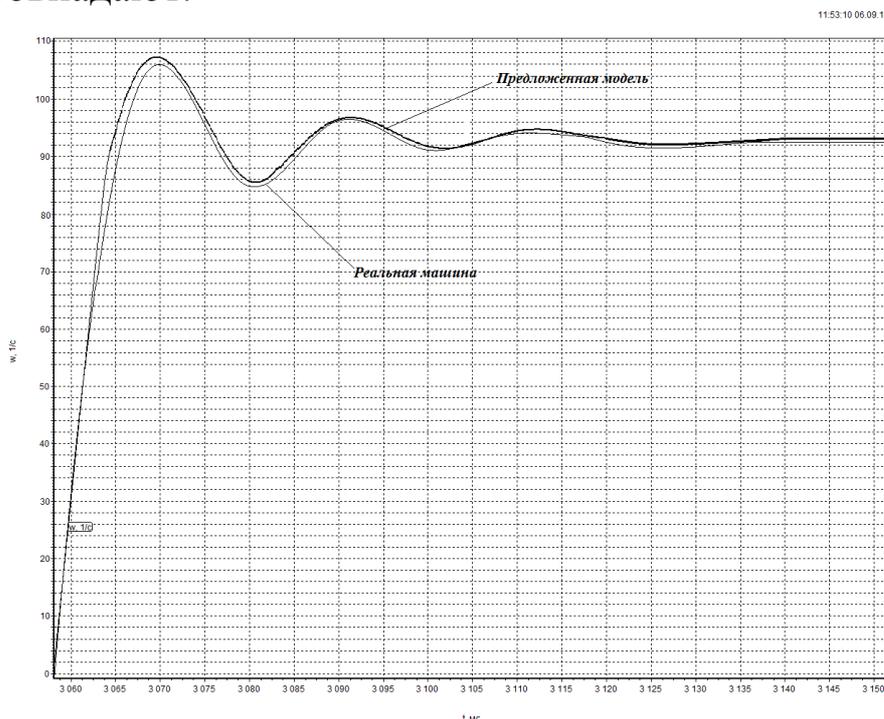


Рисунок 6 – Переходные процессы прямого пуска

Полученная математическая модель МДП (7) и структурная схема, приведенная на рисунке 5, позволяют исследовать динамические процессы, протекающие в машине двойного питания, а также строить систему управления электроприводом на основе МДП.

Библиографический список

1. Ключев В. И. Теория электропривода. – М.: Энергоатомиздат, 2001. – 704 с.
2. Онищенко Г. Б., Локтева И. Л. Асинхронные вентильные каскады и машины двойного питания. – М.: Энергия, 1979. – 200 с.
3. Островляничик В. Ю., Поползин И. Ю. Асинхронный электропривод шахтной подъемной установки, построенный по схеме машины двойного питания с комбинированным управлением // Научные технологии разработки и использования минеральных ресурсов. 2016. №3. – с. 303-309

УДК 62-83-52

РАЗРАБОТКА СТРУКТУРЫ РЕГУЛЯТОРА ТОКА ВОЗБУЖДЕНИЯ В ЭЛЕКТРОПРИВОДЕ ШАХТНОЙ ПОДЪЕМНОЙ УСТАНОВКИ С РЕВЕРСОМ ВОЗБУЖДЕНИЯ

Л. А. Федюшина, Д. Е. Модзелевский

*Сибирский государственный индустриальный университет,
г. Новокузнецк*

Рассмотрен контур тока возбуждения в электроприводе с реверсом возбуждения шахтной подъемной установки. Для получения оптимальных характеристик контура возбуждения, предложен адаптивный регулятор тока возбуждения, учитывающий изменения постоянной времени обмотки возбуждения и режим насыщения преобразователя.

Ключевые слова: контур тока, постоянная времени, обмотка возбуждения, адаптивный регулятор, электропривод.

Объектом рассмотрения является контур тока возбуждения электропривода скиповой шахтной подъемной установки 2Ц5х2,8 ОАО «Тыретского солерудника». Контур регулирования тока возбуждения – составная часть системы электропривода постоянного тока с реверсом возбуждения. От принципа построения этого контура и его параметров зависят динамические свойства системы регулирования в режимах, связанных с зависимым регулированием тока якоря и тока возбуждения. Регулирование тока возбуждения осуществляется посредством независимого контура. Выбор структуры регулятора зависит от объекта управления и его параметров.

Формирование обратной связи контура I_B осуществляется с помощью датчика тока, имеющего коэффициент передачи k_B , и фильтра с постоянной времени $T_{Ф.В.}$. В реальных условиях установка фильтра обусловлена необходимостью ограничения пульсаций напряжения (пропорционального I_B), снимаемого с шунта, до уровня, при котором система фазового управления возбудителя работает без сбоев, а аналоговые элементы схемы – без заметного снижения коэффициентов усиления.

Установка фильтра в обратной связи контура I_B может оказать существенное влияние на качественные показатели регулирования

выходного параметра. Уменьшение этого влияния возможно за счет изменения некомпенсируемой постоянной времени в регуляторе контура путем реализации зависимости, которая в абсолютных единицах имеет вид

$$T_{mB}^i = T_{mB} + T_{\phi.B}. \quad (1)$$

В реальных схемах значение $T_{\mu B}$ включает постоянную времени СИФУ тиристорного преобразователя и его силовой схемы, а также постоянной времени фильтра самого регулятора. Значение $T_{\phi.B}$ складывается из постоянной времени фильтра и постоянной времени датчика контролируемого параметра [1].

Расчет параметров контура I_B производят по вычисленным значениям коэффициентов структурной схемы. Структурная схема контура тока возбуждения представлена на рисунке 1 [2].

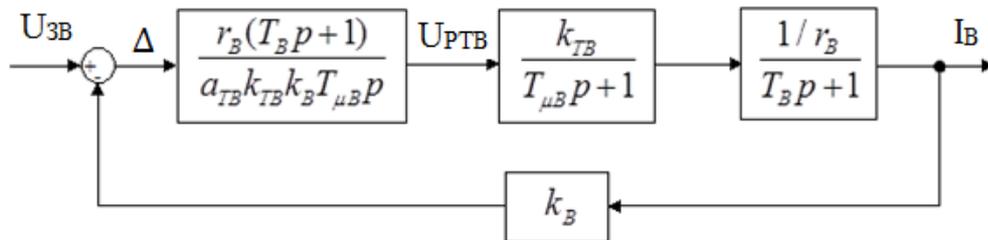


Рисунок 1 – Структурная схема контура I_B

Передаточная функция замкнутого контура возбуждения имеет вид:

$$W_3 = \frac{1/k_B}{a_{TB} T_{mB}^2 p^2 + a_{TB} T_{mB} p + 1}, \quad (2)$$

из которой определим уставку регулятора a_{TB} :

$$\begin{cases} a_{TB} T_{mB}^2 = T_o^2; \\ a_{TB} T_{mB} = 2x T_o \end{cases} \Rightarrow x = \frac{\sqrt{a_{TB}}}{2}. \quad (3)$$

Зная, что $x = 0,707$ при настройке на модульный оптимум, получим $a_{TB} = 2$.

В реальном электроприводе происходят процессы в обмотке возбуждения, связанные с насыщением магнитопровода электрической машины. За счет этого наблюдается эффект, при котором изменение тока I_B приводит к изменению постоянной времени $T_{O.B}$. Зависимость $T_{O.B} = f(I_B)$ представлена на рисунке 2.

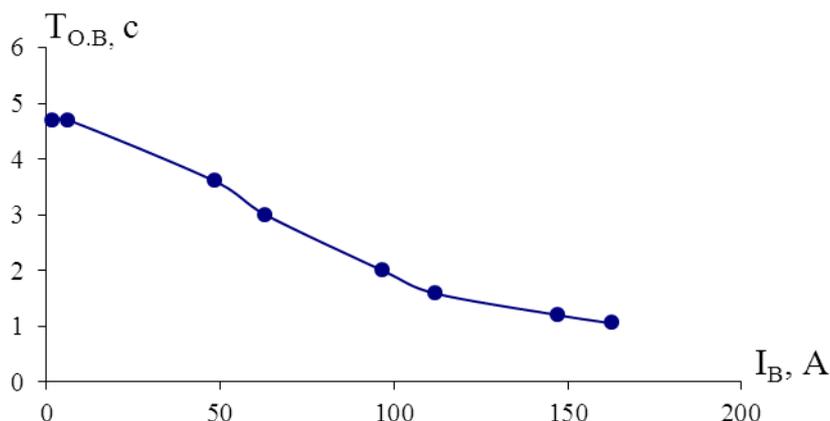


Рисунок 2 – Изменение постоянной времени обмотки возбуждения от тока возбуждения

Такая зависимость приводит к ухудшению настройки контура и качества регулирования I_B . На рисунке 3 представлен переходный процесс настройки контура тока возбуждения на реальной подъемной установке. Как видно из рисунка, при малых токах наблюдается затягивание переходного процесса и долгое достижение установившегося процесса. При токе, близком к номинальному быстродействие контура возрастает.

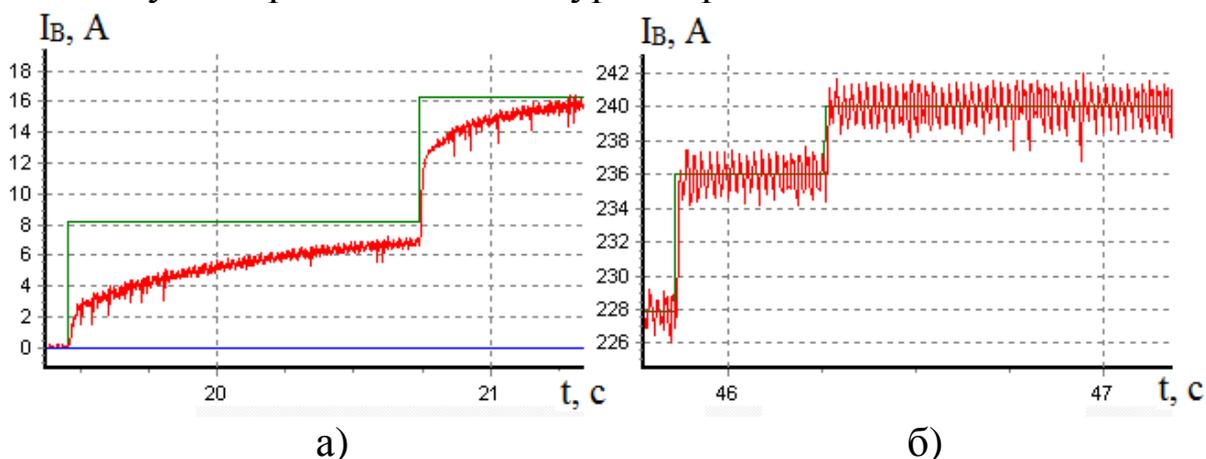


Рисунок 3 – Реальный процесс в контуре тока возбуждения при подаче ступенчатых задающих воздействий а) – при малых токах, б) – при номинальных значениях тока

На основании выше сказанного, необходимо изменить настройки регулятора, зависящие от I_B , скорректировать структуру контура регулирования для сохранения оптимальной настройки во всем диапазоне изменения тока. Применим адаптивный регулятор,

обеспечивающий более высокое качество управления по сравнению с фиксированными регуляторами.

Для того чтобы сделать регулятор адаптивным, то есть изменять его настройки в функции изменения параметров объекта управления, разложим передаточную функцию регулятора на простейшие дроби. Структурная схема регулятора примет вид, показанный на рисунке 4.

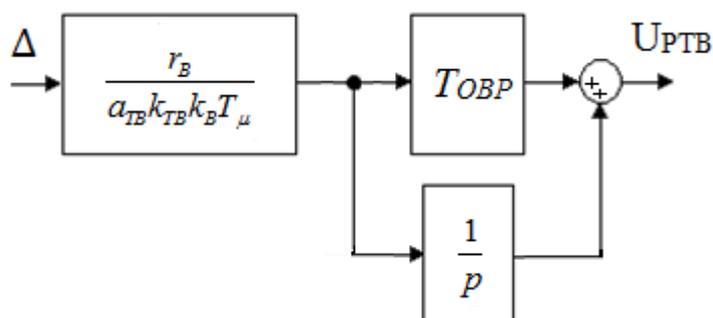


Рисунок 4 – Структурная схема регулятора тока возбуждения

Изменять будем составляющую регулятора T_{OBP} , соответствующую компенсируемой регулятором постоянной времени. Для начала реализуем зависимость $T_{O.B}=f(I_B)$, приведенную на рисунке 2, в структурную схему с помощью корректирующего коэффициента $K_{кор}$ [3]. Коррекция вводится в пропорциональный канал ПИ-регулятора. Корректирующий коэффициент уменьшает значение постоянной времени регулятора. При нулевом токе коэффициент равен 1. При увеличении тока, согласно зависимости рисунок 2, коэффициент увеличивается. Величина коэффициента ограничена на уровне 4, что соответствует номинальному току. Структура корректирующей цепочки представлена на рисунке 5.

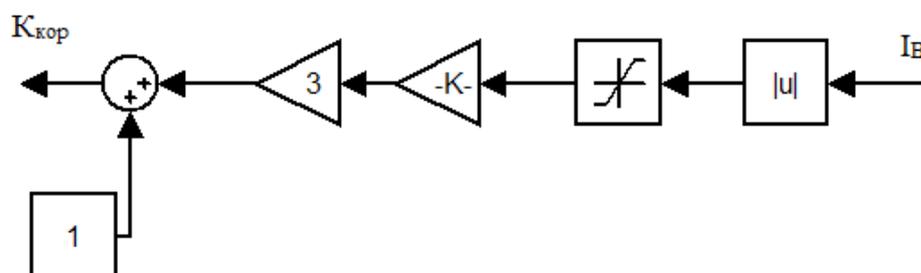


Рисунок 5 – Структурная схема, реализующая коррекцию постоянной времени регулятора $K_{кор}=f(I_B)$

На рисунке 6 представлена измененная структурная схема контура возбуждения.

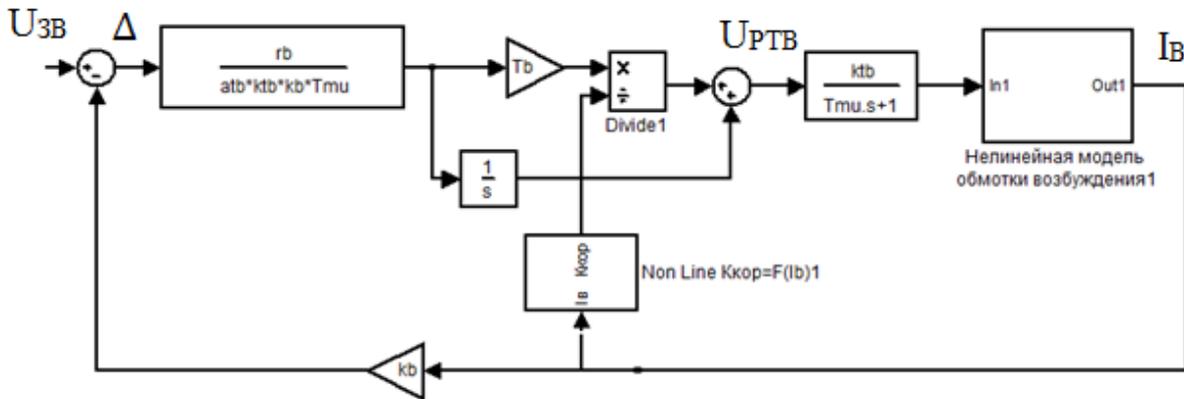


Рисунок 6 – Структурная схема контура I_B с адаптивным регулятором

Переходные процессы контура тока возбуждения показаны на рисунке 7 при подаче ступенчатых воздействий от разных уровней задания (график 1). В модели при использовании регулятора с постоянными коэффициентами (график 2) при малых значениях тока наблюдается затягивание переходного процесса, при больших тока наоборот наблюдается значительное перерегулирование (14%). При использовании адаптивного регулятора (график 3) быстродействие и перерегулирование остается постоянным, несмотря на изменение постоянной времени обмотки.

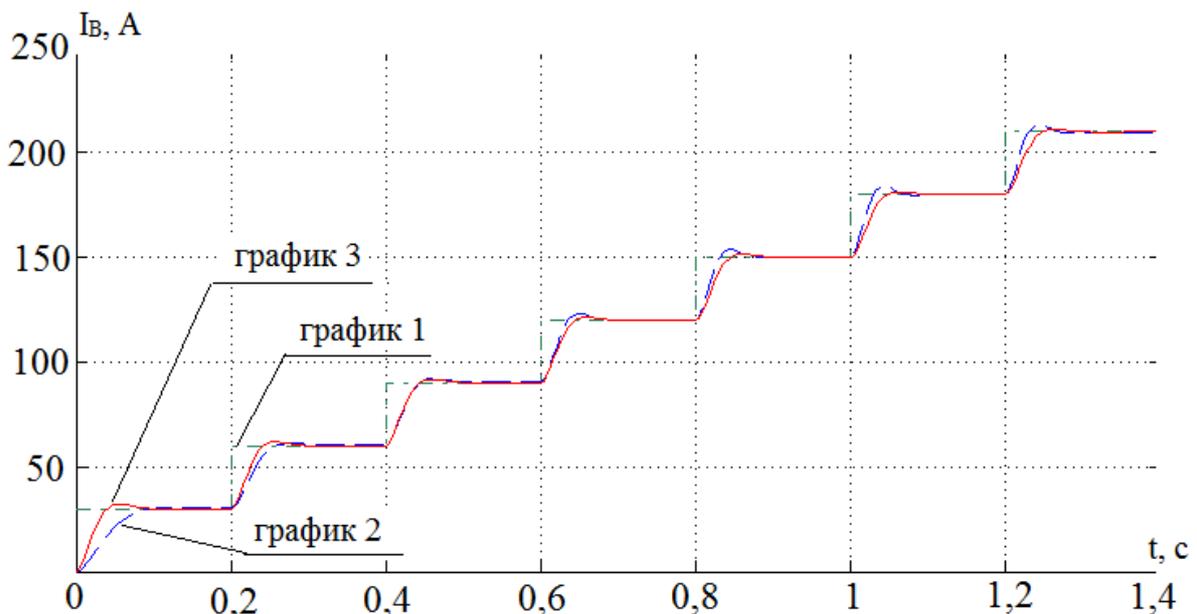


Рисунок 7 – Переходные процессы контура тока возбуждения с использованием адаптивного и обычного регуляторов

Рассмотрим режим, когда тиристорный преобразователь находится в ограничении. Проблема в том, что если пренебречь такой особенностью, то в дальнейшем это может привести к серьезным ухудшениям характеристик, когда входной сигнал достигает этих ограничений. Одним довольно общим последствием ситуации, когда входной сигнал попадает в границы насыщения, является то, что интегратор в регуляторе продолжит интегрировать в то время, как входной сигнал ограничен. Это означает, что состояние интегратора может достигнуть недопустимо высокой величины, ведущей к плохой переходной реакции.

Имеется много альтернативных путей защиты от накопления. Все эти методы предполагают, что состояния регулятора обладают двумя ключевыми свойствами [4]:

1. На состояние регулятора должен влиять фактический (т.е. ограниченный) входной сигнал объекта.
2. Состояния регулятора должны иметь устойчивую реализацию при управлении фактическим входным сигналом объекта.

В данном случае, для того, чтобы исключить накопления интегральной составляющей в момент, когда преобразователь находится в ограничении, необходимо ограничить выход интегрального регулятора, с помощью обратной связи. На рисунке 8 показана структурная схема обратной связи, ограничивающей регулятор.

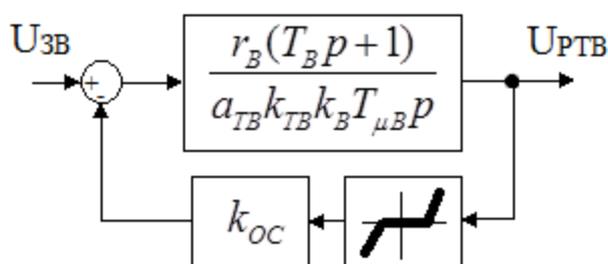


Рисунок 8 – Структурная схема ограничения регулятора

Предложенная структура контура возбуждения позволила получить оптимальные показатели качества регулирования и неизменное быстродействие во всем диапазоне изменения тока возбуждения, а также была обеспечена работа в режиме насыщения тиристорного преобразователя. Показатели качества управления в контуре тока возбуждения позволят в дальнейшем

получить оптимальные параметры электропривода при работе в режимах, связанных с зависимым регулированием тока якоря и тока возбуждения. Предложенные структуры будут использованы для достижения оптимальных показателей качества управления и производительности от электропривода в целом.

Библиографический список

1. Модзелевский Д.Е. Моделирование электромагнитных процессов в тиристорном преобразователе с учетом нелинейных динамических свойств тиристора / Д.Е. Модзелевский, В.Ю. Островляничик // Научный вестник НГТУ. – 2013. – № 2(51). – С. 188-193.

2. Католиков В.Е., Динкель А.Д., Седунин А.М. Тиристорный электропривод с реверсом возбуждения двигателя рудничного подъема. – М.: Недра, 1990. – 382 с.

3. Островляничик В.Ю. Применение метода корневого годографа при синтезе параметров системы автоматического регулирования скорости электроприводов горно-металлургической отрасли / В.Ю. Островляничик, Д.Е. Модзелевский // *Металлургия: технологии, управление, инновации, качество: Труды XVII Всерос. научно-практ. конф.* – Новокузнецк: СибГИУ, 2013. – 414 с. – С. 373-378.

4. Гудвин Г.К. Проектирование систем управления / Г.К. Гудвин, С.Ф. Гребен, М.Э. Сальгадо. – М.: БИНОМ. Лаборатория знаний, 2004. – 911 с.

УДК 62-347

УВЕЛИЧЕНИЕ ПРОИЗВОДИТЕЛЬНОСТИ ПРОКАТНОГО СТАНА ПУТЕМ ОПТИМИЗАЦИИ СИНХРОННОГО ПРИВОДА ACS 6000

В. А. Кузнецов, А. С. Чураков, Д.А. Маршев

*Сибирский государственный индустриальный университет
г. Новокузнецк*

В данной работе представлен обзор мультипривода среднего напряжения ACS 6000 с синхронным двигателем AMZ 0900LT08 LSB, его достоинства и

недостатки. В среде Matlab реализована модель системы автоматического управления электроприводом, проверена ее адекватность. По результатам исследования модели определены пути совершенствования качественных характеристик электропривода.

Ключевые слова: электропривод ACS 6000, синхронный двигатель, прямое разрывное управление моментом, производительность, качество переходных процессов.

В соответствии с Государственной программой энергосбережения и повышения энергетической эффективности до 2020 г. и необходимостью создания конкурентоспособной отечественной продукции на мировом рынке, большая часть российских предприятий проводит мероприятия по внедрению инноваций [1]. Так в рельсобалочном цехе АО «ЕВРАЗ ЗСМК» внедрена технология прокатки 100-метровых рельсов [2]. В цехе установлены 4 новых прокатных стана: два реверсивных черновых - BD1, BD2, стан-тандем, состоящий из двух клеток, и нереверсивный стан «чистовой» прокатки. В работе исследуется электропривод вращения валков стана BD1.

Благодаря развитию преобразовательной техники удалось получить эффективные методы управления синхронными двигателями большей мощности, которые обладают жесткой механической характеристикой и высокой перегрузочной способностью. Внедренная в 1995 г. компанией АВВ технология прямого управления моментом (ПУМ) - Direct torque control (DTC) в электроприводы переменного тока [3], позволила на сегодняшний день достичь эффективных показателей качества автоматизированного управления синхронными двигателями.

Рассматриваемый привод ACS 6000 является модульным, тем самым расширяется его функциональность. На рисунке 1 приведена топологическая схема привода, которая имеет три основных блока: активный выпрямительный блок (ARU), блок конденсаторов (CBU) и инверторный блок (INU) [3].

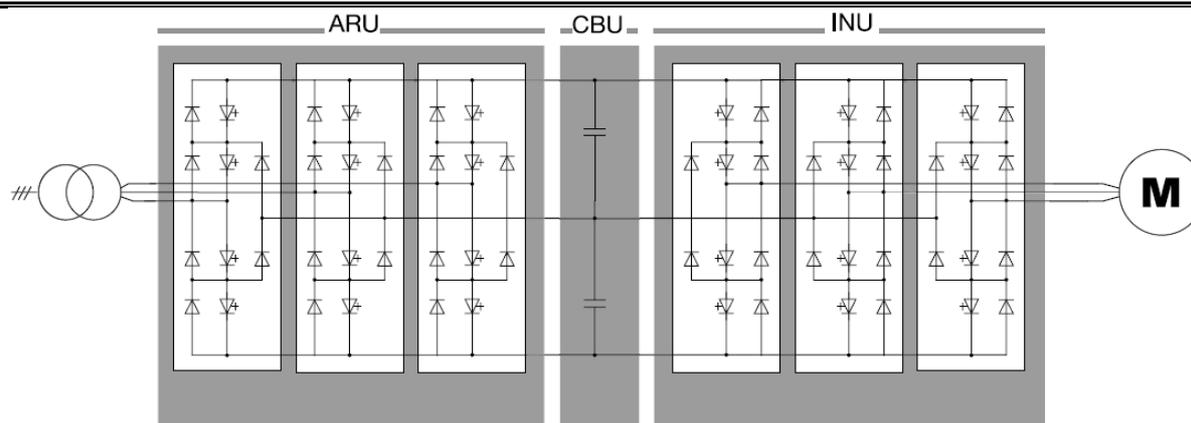


Рисунок 1 – Топология преобразователя ACS 6000

Компоновка и оборудование блоков ARU и INU одинаковы. Они представляют собой автономные 6-импульсные трехуровневые инверторы напряжения, использующие запираемые тиристоры с интегрированным блоком управлением (IGCT) [4,5]. Такое взаимное расположение блоков позволяет управлять двигателем в четырех квадрантах.

На основании общего понимания принципа ПУМ могут быть предложены различные варианты реализации такой системы. Отличие разных вариантов заключается в способе построения системы автоматического управления моментом и потоком. В разрабатываемой системе для увеличения производительности прокатного стана используется прямое разрывное управление моментом (ПРУМ) синхронного двигателя при логическом управлении автономным инвертором напряжения.

К недостаткам внедренного в рельсобалочном цехе электропривода относятся следующие:

- низкая производительность стана: среднеквадратичная загрузка прокатного двигателя (по данным Центральной электротехнической лаборатории (ЦЭТЛ) составляет при прокатке отдельных профилей 50 – 60%, при максимальной токовой нагрузке – не более 1,3 номинальной (допустимая перегрузка в соответствии с каталожными данными составляет более 2 Ином). Недостаточная загрузка электропривода по среднеквадратичному и максимальному току приводит к увеличению количества пропусков металла при прокатке, и, соответственно, к увеличению времени прокатки.

- неоптимальная настройка контуров регулирования, что приводит к возникновению перерегулирований, колебаний, а также сбоев в работе системы; силами ЦЭТЛ неоднократно осуществлялась подстройка параметров регуляторов для повышения качества переходных процессов и надежности работы оборудования.

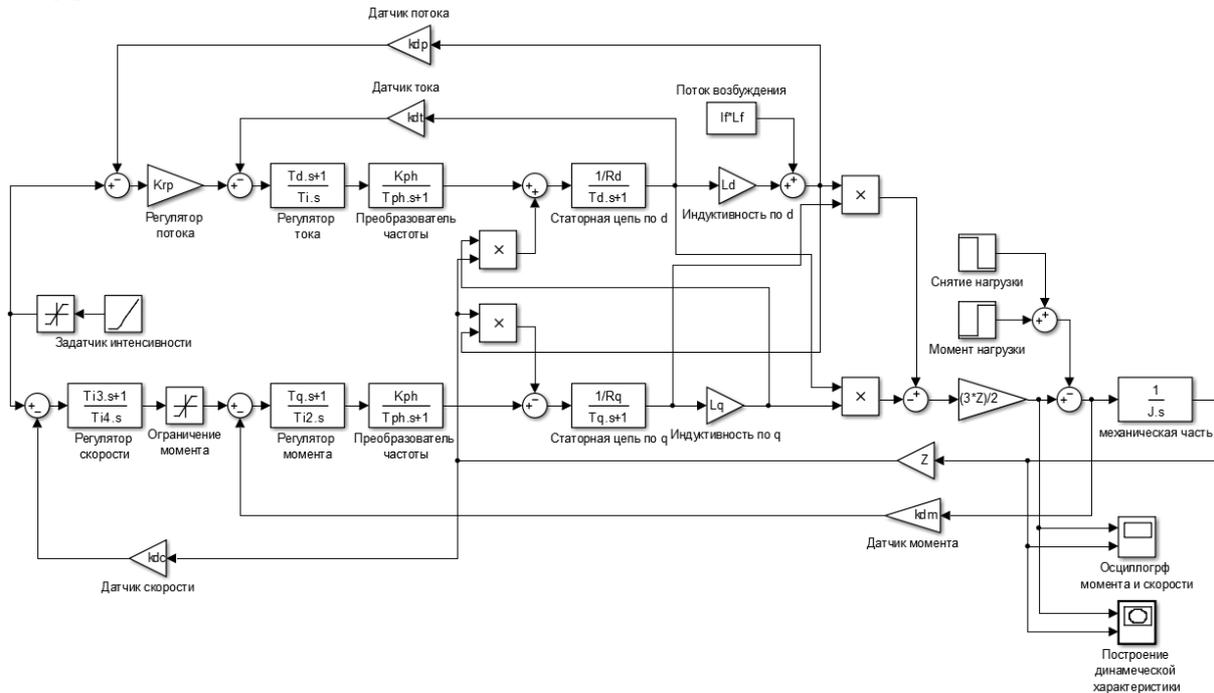


Рисунок 2 – Модель системы автоматического управления электроприводом

С целью проверки качества переходных процессов и определения возможности повышения производительности стана в лаборатории СибГИУ была смоделирована система автоматического управления электроприводом и получены переходные процессы скорости и момента, представленные на рисунке 3. Проведено сравнение полученного результата моделирования с переходным процессом действующего электропривода (рис. 4).

СЕКЦИЯ 1. Теоретические аспекты и методология построения современного электропривода

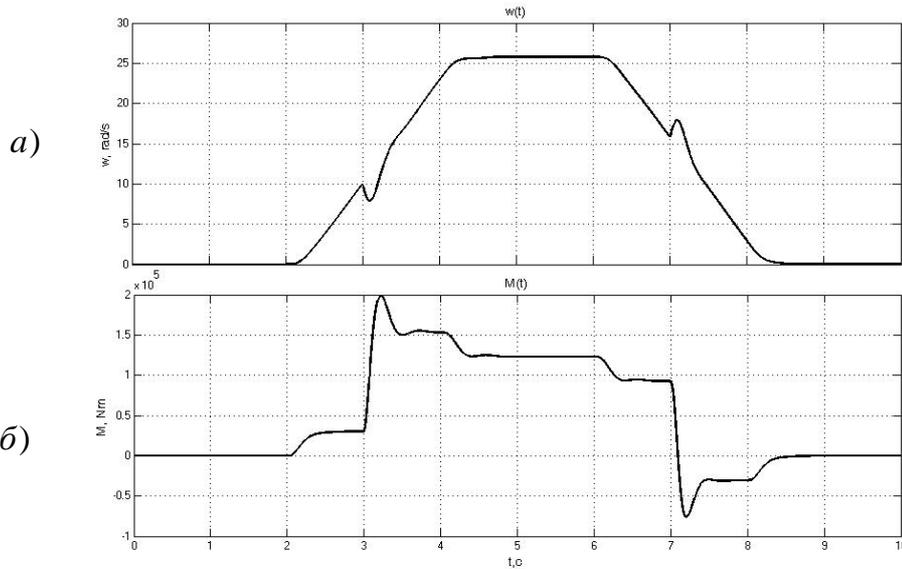


Рисунок 3 –Переходный процесс по скорости (а) и моменту (б) при моделировании проката

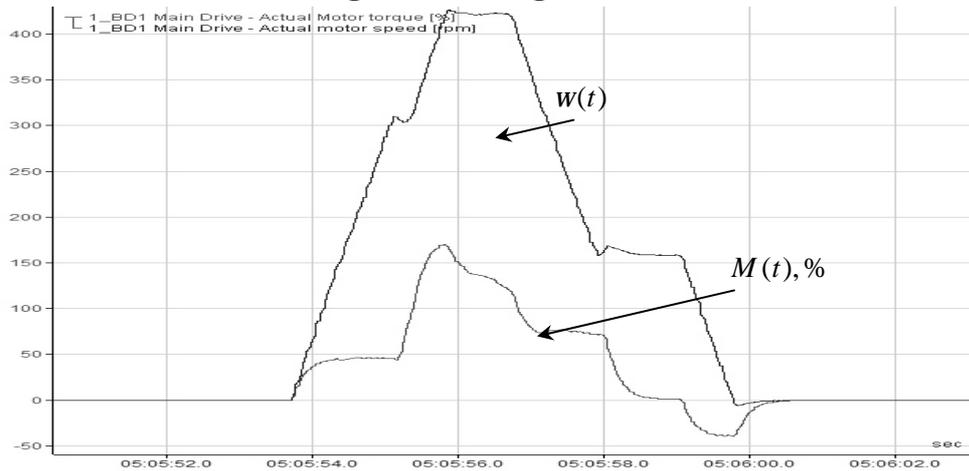


Рисунок 4 – Реальный переходный процесс по скорости и моменту

Адекватность модели и реального электропривода подтверждается, так как расчетные смоделированные переходные процессы повторяют форму реальных. Разгон и торможение происходит в течение 2-х секунд с допустимым перерегулированием более 4-х % .

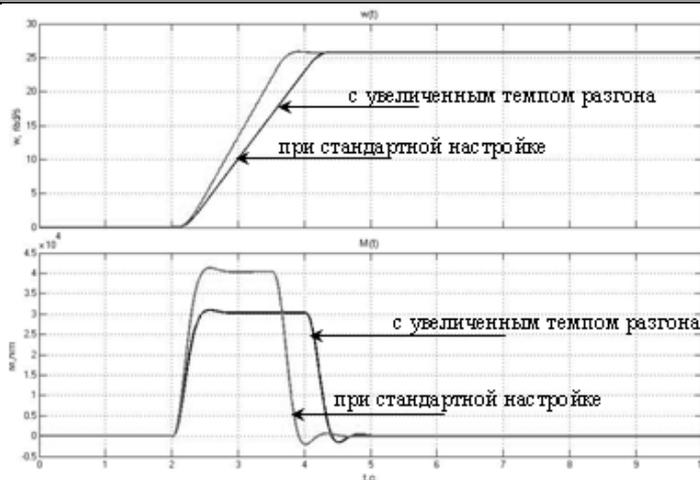


Рисунок 5 – Переходные процессы при существующей настройке задатчика интенсивности и с увеличенным темпом разгона

По результатам проведенного исследования предложены для реализации следующие мероприятия:

- проведение дополнительных пуско-наладочных работ силами российских специалистов для уточнения динамических параметров и настройки контуров регулирования в соответствии с известными методиками с целью оптимизации переходных процессов;

- повышение производительности станков за счет увеличения темпа изменения скорости и токоограничения;

- ограничение скорости захвата заготовки с целью снижения пробуксовок.

Библиографический список

1. Артемьев В. С. Управление инновациями в области энергосбережений для снижения энергоемкости реальной экономики [Текст] / В. С. Артемьев, В. А. Алексеев, С. П. Колосов // Приоритетные направления развития науки и образования : материалы IX Междунар. науч.–практ. конф. (Чебоксары, 26 авг. 2016 г.) / редкол.: О. Н. Широков [и др.]. — Чебоксары: ЦНС «Интерактив плюс», 2016. — № 2 (9). — С. 220–224. — ISSN 2411-9652.
2. Кузнецов В.А., Сигачев Н.А., Ермолаева Т.М. «Реконструкция и модернизация оборудования основных цехов производства железнодорожного проката ОАО «ЕВРАЗ ЗСМК»» -Труды 5-

- й всероссийской научно-практической конференции «Автоматизированный электропривод и промышленная электроника» Под редакцией В.Ю. Островляничика, 2012г.
3. ABB Group: [Электронный ресурс]. Режим доступа: <http://new.abb.com/drives/dtc> — Загл. с экрана
 4. Привод Drive^{IT} ACS 6000: [Электронный ресурс]. Режим доступа: https://library.e.abb.com/public/9ec4758cee56a1efc1257021004ea629/ACS_6000_Brochure_Ru_Low.pdf. — Загл. с экрана
 5. Силовые полупроводниковые приборы: [Электронный ресурс]. Режим доступа: <https://library.e.abb.com/public/5f1eb9cd4861a3b7c1256e71002c32d5/p27-31.pdf> — Загл. с экрана

УДК 681.527.26(06)

ВЫСОКОСКОРОСТНОЙ СИНХРОННЫЙ РЕАКТИВНЫЙ ДВИГАТЕЛЬ С ГАРМОНИЧЕСКИМ РОТОРОМ

А.Ф. Шевченко, Л.Г. Шевченко

*Федеральное государственное бюджетное образовательное
учреждение высшего образования Новосибирский
государственный технический университет, Новосибирск*

Рассмотрены конструкция, принцип действия и сделан вывод электромагнитного момента синхронного реактивного двигателя с гармоническим ротором. Отмечена возможность получения у этих двигателей высоких и сверхвысоких частот вращения.

Ключевые слова: синхронный реактивный двигатель, гармонический ротор, зубцовые обмотки.

Высокие и сверхвысокие частоты вращения необходимы в электрошпинделях, центрифугах, деревообрабатывающих станках и т.д. Однако получение высоких и сверхвысоких частот вращения электрических машин ограничивается механической прочностью ротора и допустимой частотой источника питания. В данной работе рассматривается двигатель, способный обеспечить сверхвысокие частоты вращения – синхронный реактивный двигатель с

гармоническим ротором [1, 2, 3] (Рис.1).

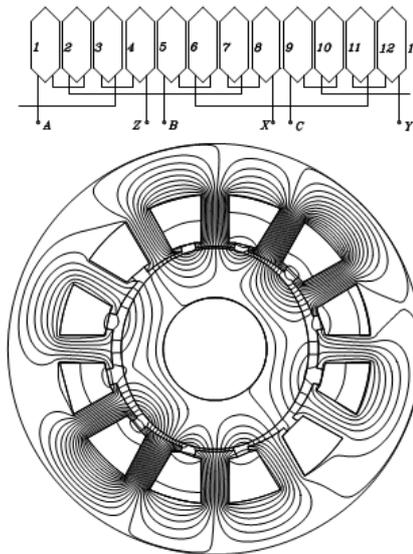


Рисунок 1 – Конструкция двигателя и схема обмотки с $q < 1$

Обмотка статора такого двигателя выполнена из отдельных катушек, размещённых на полюсах (зубцах) статора, Ротор выполнен явнополюсным, с числом полюсов, как правило, равным двум.

Нетрудно заметить, что электромагнитный момент возникает благодаря разнице магнитной проводимости по осям d и q . Для пояснения принципа действия и расчёта электромагнитного момента используем метод гармонических проводимостей [4].

Нормальную составляющую индукции в воздушном зазоре $B_\delta(\alpha)$ определим из известного приближённого выражения [4]

$$B_\delta(\alpha) = \lambda_\delta(\alpha) \sum_{v=0}^v F_v(\alpha) \quad (1)$$

здесь: $F_v(\alpha)$ - амплитуда n -ой гармоники магнитодвижущей силы;

$\lambda_\delta(\alpha)$ - удельная эквивалентная проводимость воздушного зазора.

При гладких поверхностях статора и ротора, обращённых к воздушному зазору, проводимость воздушного зазора $\lambda_\delta(\alpha)$ является некоторой функцией углового положения ротора, связанного с неравномерным воздушным зазором между статором и ротором и с достаточной точностью определяется соотношением

$$\lambda_\delta(\alpha) = \lambda_0 + \sum_1^h \lambda_h \cos[k(z_2\theta - n\alpha)] \quad (2)$$

здесь $\theta = \omega_r t - \theta_0$ - угол между осью фазы статора и осью максимальной проводимости воздушного зазора (осью d);

a - текущая угловая координата, отсчитываемая от оси фазы статора;

n – число периодов проводимости воздушного зазора,
 $n = Z_2$ (в SR- двигателях $n = |Z_2 - Z_1|$);

λ_0 и λ_k - постоянная и k - ая переменная составляющие проводимости воздушного зазора.

Зубцовые дробные обмотки, расположенные на статоре, при протекании по ним токов прямой последовательности создают две основные рабочие гармоники м.д.с., вращающиеся в противоположных направлениях, с близкими по величине амплитудами, но с различными, хотя и близкими числами полюсов [5]. Данные рабочих гармоник некоторых дробных обмоток приведены в таблице 1.

Таблица 1.

Данные рабочих гармоник некоторых дробных обмоток

	m=3				m=2		
Z₁	6	12	18	24	8	12	16
C	1	2	3	4	2	3	4
q	1/2	2/5	3/8	4/11	2/3	3/5	4/7
p₁	2	7	8	13	5	7	9
p₂	4	5	10	11	3	5	7

Результирующая м.д.с., созданная обмоткой (рис.2), является модулированной по амплитуде, причём модулирующая волна перемещается в пространстве с частотой ω_1

$$\begin{aligned}
 F_p &= F_{1m} \sin(\omega_1 t - p_1 \alpha) + F_{2m} \sin(\omega_1 t + p_2 \alpha) \approx \\
 &\approx 2F_m \sin\left(\omega_1 t - \frac{p_1 - p_2}{2} \alpha\right) \cos \frac{p_1 + p_2}{2} \alpha \quad . \quad (3)
 \end{aligned}$$

Характер изменения м.д.с. зубцовой обмотки на одном периоде, а также представление её в виде произведения неподвижной и бегущей волн для обмотки с $q = 2/5$, приведены на рис. 3.

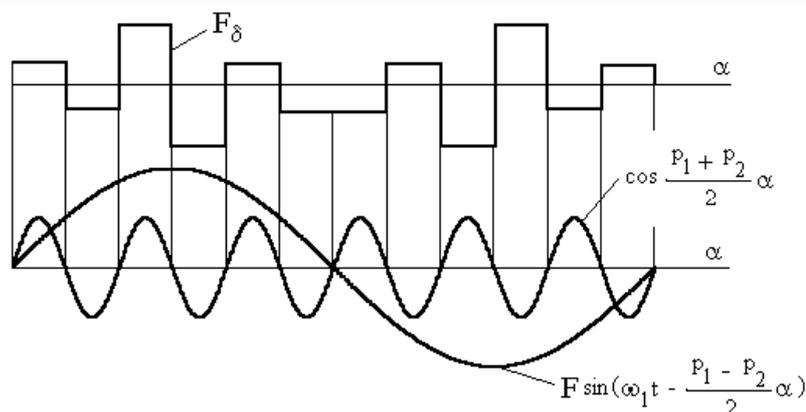


Рисунок 2 – Распределения м.д.с. в воздушном зазоре обмотки с $q = 2 / 5$ и её составляющие - бегущая и неподвижная волны

Протекающий по обмоткам статора реактивных двигателей ток прямой последовательности создаёт магнитодвижущую силу с гармоническим составом, приведённым в табл.1. Используя (1), определим закон распределения магнитной индукции $B_d(a)$ вдоль расточки статора

$$\begin{aligned}
 B_{\delta}(\alpha) &= F(\alpha)\lambda_{\delta}(\alpha) = [F_{mv1} \cos(\omega_1 t - p_1\alpha) + F_{mv2} \cos(\omega_1 t + p_2\alpha)] \times \\
 &\times [\lambda_0 + \lambda_1 \cos(z_2\omega_r t - n\alpha)] = \\
 &= \lambda_0 F_{mv1} \cos(\omega_1 t - p_1\alpha) + \lambda_0 F_{mv2} \cos(\omega_1 t + p_2\alpha) + \\
 &\quad + 0,5\lambda_1 F_{mv1} \cos(z_2\omega_r t + \omega_1 t - n\alpha - p_1\alpha) + \\
 &\quad + 0,5\lambda_1 F_{mv1} \cos(z_2\omega_r t - \omega_1 t - n\alpha + p_1\alpha) + \\
 &\quad + 0,5\lambda_1 F_{mv2} \cos(z_2\omega_r t + \omega_1 t - n\alpha + p_2\alpha) + \\
 &\quad + 0,5\lambda_1 F_{mv2} \cos(z_2\omega_r t - \omega_1 t - n\alpha - p_2\alpha).
 \end{aligned} \tag{4}$$

В полученном выражении (4) присутствуют две группы гармоник магнитного поля, имеющих различную природу. Первая группа – обмоточные гармоники, вторая группа гармоник вызвана переменной составляющей в проводимости воздушного зазора. Вторая группа гармоник возникает в результате деформации магнитного поля неравномерным воздушным зазором.

В образовании электромагнитного момента принимают участие гармоники магнитного поля, которые неподвижны друг относительно друга и имеют одинаковую полярность.

$$\begin{aligned}
 \lambda_0 F_{mv1} \cos(\omega_1 t - p_1\alpha) &\leftrightarrow 0,5\lambda_1 F_{mv2} \cos(z_2\omega_r t - \omega_1 t - n\alpha - p_2\alpha) \\
 \lambda_0 F_{mv2} \cos(\omega_1 t + p_2\alpha) &\leftrightarrow 0,5\lambda_1 F_{mv1} \cos(z_2\omega_r t - \omega_1 t - n\alpha + p_1\alpha)
 \end{aligned} \tag{5}$$

Взаимодействующие гармоники имеют одинаковую полюсность при выполнении условия

$$n = z_2 = |p_1 - p_2|. \quad (6)$$

Нетрудно заметить, что при числе периодов изменения проводимости воздушного зазора $n = 2$ этому условию удовлетворяют все обмотки, данные которых приведены в табл. 1.

Частоту вращения, при которой происходит взаимодействие гармоник магнитного поля, определим из условия

$$\omega_1 t = Z_2 \omega_R t - \omega_1 t$$

или

$$\omega_R = \frac{2\omega_1}{Z_2} = \omega_1. \quad (7)$$

(так как $Z_2 = 2$).

Заметим, что частота вращения ротора не зависит от выбранного значения $q < 1$ зубцовой дробной обмотки, т.е. не зависит и от числа зубцов статора.

Электромагнитный момент определим как результат взаимодействия гармоник вращающегося магнитного поля и соответствующих гармоник распределения поверхностной плотности тока

$$M_g = \int_0^{2\pi} B(\alpha) \cdot j(\alpha) R d\alpha, \quad (8)$$

где $j(\alpha)$ - поверхностная плотность тока, соответствующая пространственному распределению м.д.с. обмотки.

Изменение плотности поверхностного тока вдоль расточки статора представим в виде производной м.д.с. по углу поворота ротора α . В рассматриваемом случае плотность поверхностного тока содержит две гармоники

$$j_v = -\frac{dF_v}{R d\alpha} = j_{vm1} \cos(\omega_1 t - p_1 \alpha + \frac{\pi}{2}) + j_{vm2} \cos(\omega_1 t + p_2 \alpha + \frac{\pi}{2}) \quad (10)$$

В образовании электромагнитного момента участвуют обе гармоники плотности поверхностного тока

$$\begin{aligned}
 M &= l_{\delta} R^2 \int_0^{2\pi} [0,5\lambda_1 F_{mv2} \cos(z_2 \omega_r t - \omega_1 t - n\alpha - p_2 \alpha) \times \\
 &\quad \times j_{vm1} \cos(\omega_1 t - p_1 \alpha + \frac{\pi}{2}) + \\
 &\quad + 0,5\lambda_1 F_{mv1} \cos(z_2 \omega_r t - \omega_1 t - n\alpha + p_1 \alpha) \cdot j_{vm2} \cos(\omega_1 t + p_2 \alpha + \frac{\pi}{2})] d\alpha = \\
 &= \frac{1}{4} I_1 l_d R^2 \int_0^{2p} j_{m1} F_{m2} \left[\cos(z_2 w_r t - na - p_2 a - p_1 a + \frac{p}{2}) + \right. \\
 &\quad \left. + \cos(2w_1 t - z_2 w_r t + na + p_2 a - p_1 a + \frac{p}{2}) \right] + \\
 &\quad + j_{vm2} F_{mv2} \left[\cos(z_2 \omega_r t - n\alpha + p_1 \alpha + p_2 \alpha + \frac{\pi}{2}) + \right. \\
 &\quad \left. + \cos(2\omega_1 t - z_2 \omega_r t + n\alpha - p_1 \alpha + p_2 \alpha + \frac{\pi}{2}) \right] d\alpha
 \end{aligned} \tag{11}$$

В образовании электромагнитного момента участвуют подынтегральные члены, не содержащие аргумента a , так как только эти члены не обращаются в нуль при интегрировании от 0 до $2p$. Поэтому условием образования момента является равенство нулю суммы членов с a . Оно аналогично полученному ранее.

$$n = |p_1 - p_2| .$$

После интегрирования получим выражение электромагнитного момента синхронного реактивного двигателя

$$M = \frac{\pi}{8} \lambda_1 l_{\delta} D^2 [j_{vm1} F_{mv2} + j_{vm2} F_{mv1}] \cos \theta_v \tag{12}$$

или, после проведения ряда преобразований с учётом (9), максимальный момент двигателя

$$M = \frac{\pi}{4} \lambda_1 D l_{\delta} F_{mv1} F_{mv2} (p_1 + p_2) . \tag{13}$$

Выводы:

1) Частота вращения реактивных двигателей с гармоническим ротором определяется частотой питающей сети f_l и не зависит от

числа зубцов статора, а, следовательно, и дробности применяемой обмотки.

2) Величина электромагнитного момента зависит от параметров применяемой дробной обмотки (значения q).

Литература

1. Шевченко А.Ф., Шевченко Л.Г. Новый электродвигатель с переменным магнитным сопротивлением воздушного зазора (SR-двигатель) для высокоскоростных электроприводов // Электротехника. 2000. № 11. С. 20-23.
2. Шевченко А.Ф., Шевченко Л.Г. Индуктивные параметры синхронного двигателя с модулированным магнитным потоком и гладким гармоническим ротором//Транспорт: наука, техника, управление. 2013. - №10. - С.48-51.
3. Шевченко А.Ф., Шевченко Л.Г. Анализ магнитного поля и электромагнитного момента синхронного двигателя с модулированным магнитным потоком и гладким гармоническим ротором// Электротехника. 2002. №7. С. 44-47.
4. Вольдек А.И. Исследование магнитного поля в воздушном зазоре явнополюсных синхронных машин методом гармонических проводимостей // Электричество. 1966. № 7. С. 46–52.
5. Шевченко А.Ф. Магнитодвижущие силы однозубцовых дробных обмоток с $q < 1$ // Научный вестник НГТУ №2. Новосибирск: НГТУ, 1996. С. 99 – 100.
6. Иванов Смоленский А.В. Электромагнитные силы и преобразование энергии в электрических машинах. М.: Высшая школа, 1989. – 312 с.

УДК 629.423, 629.33

ЭНЕРГОЭФФЕКТИВНАЯ СИЛОВАЯ УСТАНОВКА ДЛЯ АВТОНОМНЫХ ТРАНСПОРТНЫХ СРЕДСТВ

Н.И. Щуров

*Федеральное государственное бюджетное образовательное
учреждение высшего образования Новосибирский
государственный технический университет, Новосибирск*

Показаны проблемы создания и пути решения по исследованию и разработке гибридных силовых установок для автономных транспортных средств, позволяющих снизить экологическую нагрузку на природу городов путем повышения топливной и энергетической эффективности.

Ключевые слова: транспортное средство, гибридная силовая установка, тяговый электропривод, энергоэффективность, методы и средства проектирования

Большинство экспертов связывают будущее транспорта с чисто электрическими его типами. Значительные объемы инвестиций в разработки тяговых аккумуляторов и электрических машин приближают наступление эры электрического транспорта, что только усиливает значимость гибридных силовых установок (ГСУ). Современная ГСУ должна позволять не только экономить ресурсы уже сегодня, но и обеспечить простой технологический переход к полностью электрическим транспортным средствам в ближайшем будущем.

На сегодняшний день отсутствует единый подход к созданию наиболее эффективной схемы гибрида для городского цикла движения. В связи этим на базе центра «Энергосберегающие технологии» кафедры электротехнических комплексов НГТУ решается комплекс следующих задач.

1. Обоснование схемы ГСУ и стратегии ее управления. Задача решается на основе анализа режимов движения ТС по динамике и объему транспортной работы в городских условиях имитационным моделированием различных схем привода в заданных условиях с последующим определением стратегии управления. Общими критериями являются минимизация количества вредных выбросов и процента аккумулированной энергии в режиме торможения.

2. Разработка энергоэффективных электрических машин для тягового привода. В качестве приводного двигателя предлагается использование синхронной машины с постоянными магнитами, обладающей улучшенными энергетическими показателями (КПД в тяговом режиме до 98 %, в генераторном режиме – до 95 %).

3. Разработка силового полупроводникового преобразователя и системы управления с максимально эффективным использованием энергии торможения ТС. Решаются следующие вопросы: выбор элементной базы силовой части и системы управления, обеспечение реверсирования энергопотоков, выбор числа фаз преобразователя в зависимости от схемы ГСУ, обеспечение максимального КПД в режиме тяги и торможения, минимизация «мертвого объема» энергии накопителя. Верификация алгоритмов управления обеспечивается на имитационных моделях по указанным критериям.

4. Расчет и выбор оптимального накопительного модуля для реализации процесса регенеративного торможения. В основе метода расчета лежит анализ режимов работы городского транспорта со статистической оценкой объема энергии торможения ТС. Определяются: элементная база накопителя, массогабаритные параметры, уровень рабочего напряжения.

Литература

1. Schurov N. I. Assessment of performance factors of hybrid electric vehicle powertrain / N. I. Schurov, M. V. Yaroslavtsev, E. A. Belova // Applied Mechanics and Materials. - 2015. – Vol. 698: Electrical Engineering, Energy, Mechanical Engineering, EEM 2014. – pp. 7-11

2. Щуров Н. И. Эффективное использование энергии буферного накопителя гибридного транспортного средства / Н. И. Щуров, М. В. Ярославцев // Инновационные технологии и экономика в машиностроении: сб. тр. 5 междунар. науч.-практ. конф., Юрга, 22–23 мая 2014 г. – Томск: Изд-во ТПУ, 2014. – Т. 2. – С. 312-315.

3. Spiridonov E. Evaluation of energy recuperation efficiency for operating conditions of city electric transport / E. Spiridonov, M. Yaroslavtsev // Proceedings of IFOST-2016, 2016 11-th International forum on strategic technology (IFOST), June 1–3, 2016, Novosibirsk, Russia. – Part II. – pp. 61-64.

СЕКЦИЯ 2

Информационные и управляющие системы
технологическими процессами и системы
автоматизации технологических процессов и
производственных комплексов

УДК 54.08: 681.2

АВТОМАТИЗАЦИЯ КОНТРОЛЯ ДАВЛЕНИЯ МАСЛА ДВИГАТЕЛЕЙ ВНУТРЕННЕГО СГОРАНИЯ

С. А. Белова, И. В. Ломакин

*Казанский государственный энергетический университет,
г. Казань*

В работе выполнен анализ существующих способов контроля системы маслоснабжения двигателя. Предложен алгоритм контроля системы смазки двигателя внутреннего сгорания.

Ключевые слова: схемотехника, система смазки, двигатель внутреннего сгорания, датчик давления масла, канал контроля

Современные двигатели внутреннего сгорания имеют встроенные микропроцессорные диагностические системы, которые контролируют процессы топливоподачи и газораспределения. Однако контроль состояния системы смазки осуществляется только визуально (щупом и лампой датчика давления масла). В то же время повышение надежности двигателей, в том числе и за счет совершенствования системы смазки и текущего контроля ее состояния, является достаточно актуальной задачей. Поэтому работа посвящена разработке автоматического канала контроля параметров системы смазки двигателя внутреннего сгорания (ДВС).

Показатель давления масла и его изменение под воздействием изменения числа оборотов двигателя характеризуют техническое состояние системы смазки, подшипников коленвала и распредвала.

Давление масла зависит от температуры двигателя (рисунок 1) и скорости вращения коленчатого вала (рисунок 2). Давление масла минимально на холостом ходу, а максимальное давление масла конструктивно ограничено соответствующей регулировкой редукционного клапана [1].

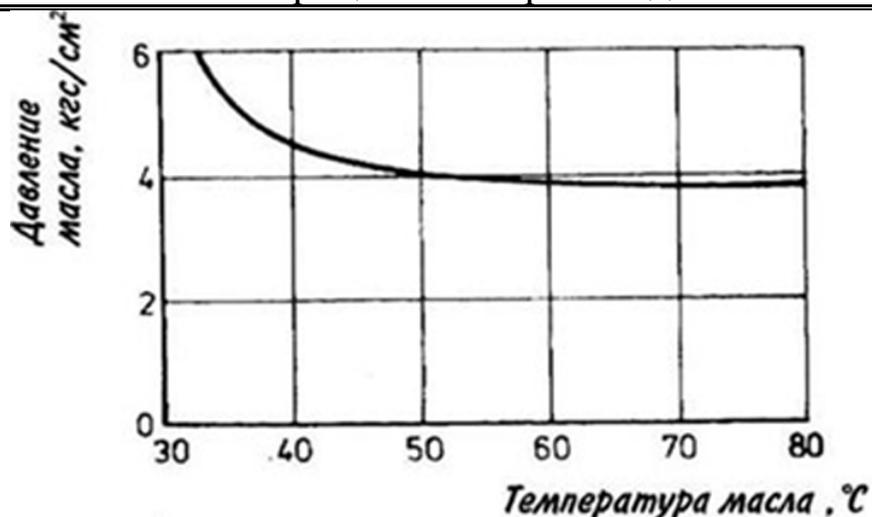
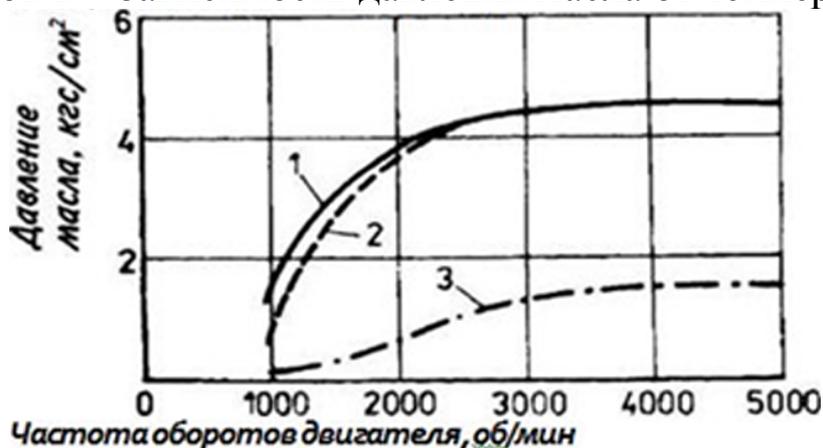


Рисунок 1 – Зависимость давления масла от температуры



- 1–при исправной системе смазки
 2–при неисправном масляном насосе, увеличенном зазоре
 3–при увеличенном зазоре подшипников коленвала.

Рисунок 2 – Зависимость давления масла от режима работы двигателя

Зависимость давления масла от температуры можно аппроксимировать формулой:

$$p(t) = 3,8 + 300 \cdot e^{-0,15t} \quad (1)$$

где t – температура масла, $^{\circ}\text{C}$;

3,8 и 300 эмпирически подобранные коэффициенты.

Зависимость давления масла от частоты оборотов двигателя также можно представить формулой:

$$p(w) = p_0(t) \cdot \left(1 - e^{-\frac{(w-800)}{700}}\right), \quad (2)$$

где $p_0(t)$ – начальное давление масла при номинальных оборотах двигателя, вычисленное по формуле 1.

СЕКЦИЯ 2. Информационные и управляющие системы
технологическими процессами и системы автоматизации
технологических процессов и производственных комплексов

У исправного ДВС давление масла должно составлять:

- 1 кгс/см² на холостом ходу (не ниже 0,3 кгс/см²);
- 2—4 кгс/см² на высоких оборотах для бензиновых двигателей;
- 3—6 кгс/см² на высоких оборотах для дизельных двигателей.

Таким образом, обрабатывая показания датчиков давления, температуры и тахометра можно составить заключение о состоянии системы смазки в текущий момент времени.

Надежность работы смазочной системы зависит от множества параметров. Для оценки состояния системы смазки ДВС в качестве контролируемых параметров целесообразно выбрать:

- уровень масла в картере двигателя;
- показания датчика температуры двигателя;
- показания датчика давления масла.

Контроль состояния системы смазки ДВС будет заключаться в выполнении следующих контрольных макроопераций:

- контроль уровня масла с помощью специального датчика;
- контроль температуры (t), оборотов коленчатого вала (ω), давления масла (p).

Словесное описание алгоритма контроля состояния системы смазки ДВС можно представить в следующем виде.

При включении зажигания необходимо убедиться в безопасности запуска двигателя. То есть в первую очередь необходимо проконтролировать минимально допустимый уровень масла на выключенном двигателе. Если уровень V находится выше минимального V_{min} , то формируется разрешение на запуск двигателя. Если уровень V находится ниже отметки V_{min} , то срабатывает индикатор требующий долить масло и воспрещается запуск двигателя.

Далее контролируются температура и частота вращения двигателя. По полученным значениям вычисляются четыре контрольные границы давления масла P_1 , P_2 , P_3 при нормальной температуре масла (80-90°C) (рисунок 3).

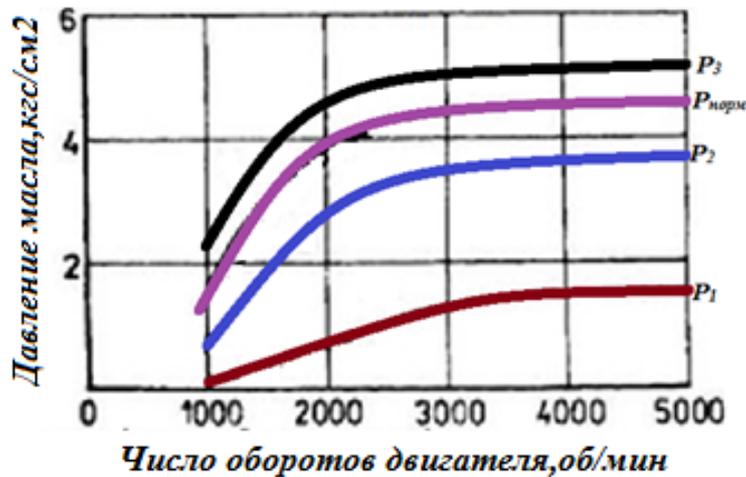


Рисунок 3 – График зависимости давления масла от числа оборотов двигателя с границами допуска

Эти контрольные границы можно описать формулами:

$$p_1(w) = 0,4 p_0(t) \cdot (1 - e^{-\frac{(w-800)}{700}}), \quad (3)$$

$$p_2(w) = 0,8 p_0(t) \cdot (1 - e^{-\frac{(w-800)}{700}}), \quad (4)$$

$$p_3(w) = 1,1 p_0(t) \cdot (1 - e^{-\frac{(w-800)}{700}}), \quad (5)$$

- если давление p находится ниже границы давления $p_1(w)$, то необходимо снять и проверить клапан;
- если давление p находится выше границы давления $p_1(w)$, то давление масла p сравнивается со следующей границей допуска $p_2(w)$;
- если давление p находится ниже границы давления $p_2(w)$, то загорается индикатор «долить» масло и формируется рекомендация на остановку двигателя;
- если давление p находится выше границы давления $p_3(w)$, но ниже допуска $p_3(w)$, то давление масла p считается нормальным для работы ДВС;
- если давление p находится выше границы давления $p_2(w)$, то работа двигателя прекращается до устранения неисправностей (загрязнение масляных каналов, неправильная регулировка редуционного клапана).

СЕКЦИЯ 2. Информационные и управляющие системы технологическими процессами и системы автоматизации технологических процессов и производственных комплексов

Процесс контроля повторяется до тех пор, пока не появится неисправность или не поступит команда на остановку двигателя (рисунок 4).

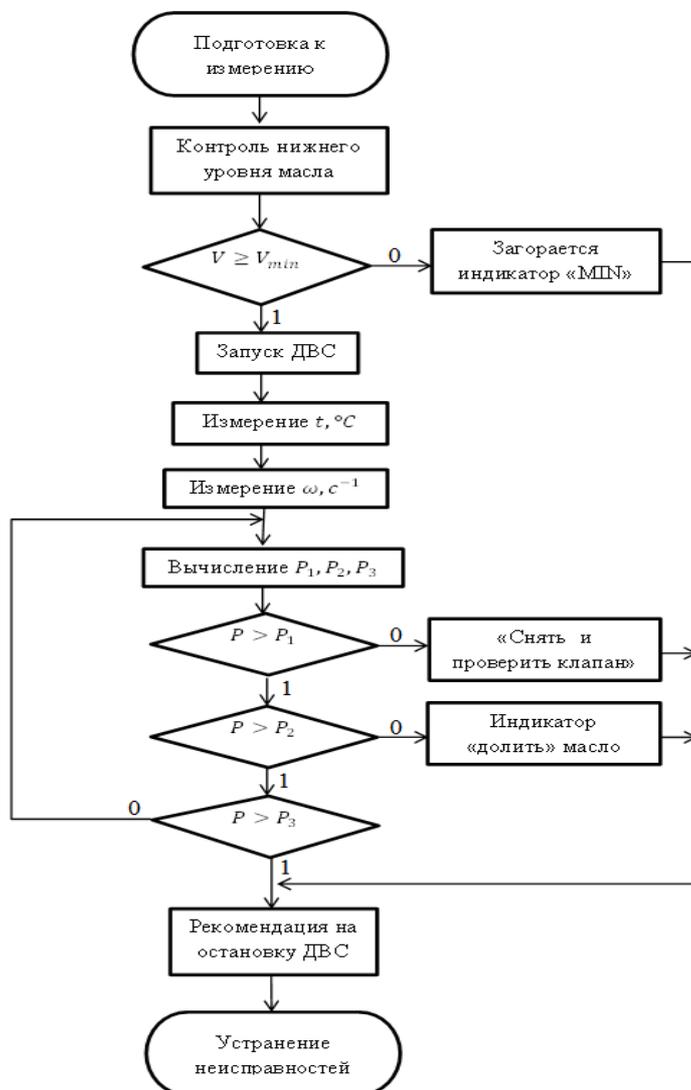


Рисунок 4 – Блок-схема алгоритма

Предлагаемый алгоритм позволяет контролировать текущее состояние системы смазки ДВС в процессе его эксплуатации.

Литература

1. Косенков А.А. Проверка давления масла [Электронный ресурс] - Режим доступа: <http://world2car.ru/index.php/diagnostika-avtomobilya/607-proverka-davleniya-masla>

2. Ломакин И.В. Программное обеспечение и технология программирования микроконтроллеров. Лабораторный практикум / И.В. Ломакин. – Казань: Казан. гос. энерг. ун-т, 2009. – 92 с.

3. Контроль за давлением масла в двигателе. Система смазки двигателя внутреннего сгорания.– URL: <http://www.autoshcool.ru/remont/>

УДК 621.313

МОДЕЛИРОВАНИЕ ГИДРОАГРЕГАТА МАЛОЙ ГЭС С НАПОРНЫМ ТРУБОПРОВОДОМ В АВАРИЙНЫХ РЕЖИМАХ РАБОТЫ, СВЯЗАННЫХ С МЕХАНИЧЕСКИМИ ПОЛОМКАМИ

Ш.Р. Гуламов

*Сибирский государственный индустриальный университет
г. Новокузнецк.*

Предложен метод косвенного определения неисправностей механической части гидрогенератора путем контроля электрических, механических и гидравлических параметров. Разработана математическая модель гидротурбины с напорным трубопроводом и синхронного генератора, работающего на автономную нагрузку. Получены графики переходных процессов в момент возникновения механической поломки.

Ключевые слова: гидротурбина, синхронный генератор, контроль электрических, механических и гидравлических параметров.

Одним из направлений развития альтернативной электроэнергетики является использование одиночных установок для преобразования гидравлической энергии в электрическую энергию. Основными причинами использования таких гидроагрегатов являются: отсутствие традиционных электрических сетей в удалённых и труднодоступных районах местности, соображения надёжности электроснабжения в случаях протяжённых сетей малой мощности, рост тарифов на электроэнергию [1].

Известно, что для контроля и защиты от аварийных режимов механической части электротехнического комплекса, имеющего в

СЕКЦИЯ 2. Информационные и управляющие системы
технологическими процессами и системы автоматизации
технологических процессов и производственных комплексов

своем составе электрическую машину, можно использовать косвенный метод, основанный на измерении электрических параметров электромашин [2, 3].

Для разработки математической модели гидротурбины с напорным трубопроводом и синхронного генератора малого ГЭС с целью моделирование работы гидроагрегата в аварийных режимах автором предлагается математическое описание гидротурбины с напорным трубопроводом, следующими уравнениями [4] и допущениями:

- КПД системы для всего диапазона регулирования принят постоянной;

- абсолютная жесткая стенка водовода;

- вода не сжимается.

Мощность гидротурбины зависит от напора воды H и расхода воды Q через водонапорный трубопровод и определяется из выражения [4]:

$$P_m = 9,81HQ\eta_m, \quad (1)$$

Напор гидротурбины описывается выражением [4]:

$$H = H_n + H - h_{nom}, \quad (2)$$

где: $H_n = const$ – номинальный напор водонапорного трубопровода малого ГЭС; h_{nom} – потери напора водонапорном трубопроводе; $\Delta H - \dot{\epsilon}$ гидравлический удар (ударное давление), представляет собой динамическое повышение или понижение давления, в напорном трубопроводе вызываемое действием инерционных сил возникающих при переходных режимах работы гидротурбины и определяется выражением [4]:

$$H = \frac{-L}{gS} \frac{dQ}{dt}, \quad (3)$$

$$h_{nom} = Ak_1LQ^2, \quad (4)$$

где: A – удельное сопротивление для стальных труб; k_1 – поправочный коэффициент удельного сопротивления для стальных труб [4].

Расход воды проходящей через гидротурбину зависит от угла открытия задвижки водонапорного трубопровода. Гидравлическое сопротивление гидротурбины μ определяется как [4]:

$$\mu = \mu_{на} - \mu_{цен}, \quad (5)$$

СЕКЦИЯ 2. Информационные и управляющие системы
технологическими процессами и системы автоматизации
технологических процессов и производственных комплексов

где: $\mu_{на}$ – гидравлическое сопротивление, зависит от открытия задвижки водонапорного трубопровода;

$\mu_{цен}$ – гидравлическое сопротивление, обусловленное действием центробежной силы [4],

$$\mu_{цен} = k_{цен} \omega, \quad (6)$$

где $k_{цен}$ – коэффициент расхода воды через гидротурбину [4],

$$k_{цен} = \frac{\Delta Q}{Q_n \omega_n}, \quad (7)$$

В установившемся режиме при условии $M_T = M_3$, тогда выражение (1) запишем в следующем виде:

$$P_m = M_3 \omega, \quad (8)$$

Уравнение движения ротора гидротурбины определяется из выражения [4]:

$$J \frac{d\omega}{dt} = M_T - M - M_e \quad (9)$$

Полное математическое описание синхронного генератора с демпферными обмотками с достаточной точностью описывается следующей системой дифференциальных уравнений [5]. В уравнении движения электропривода учитывается момент, связанный с механическими поломками или попаданием инородного тела в гидротурбину:

$$\left\{ \begin{array}{l} -U_a = r_1 i_a + \frac{d\psi_a}{dt}; \\ -U_b = r_1 i_b + \frac{d\psi_b}{dt}; \\ -U_c = r_1 i_c + \frac{d\psi_c}{dt}; \\ U_f = \frac{d\psi_f}{dt} + r_f i_f; \\ \\ 0 = \frac{d\psi_{kd}}{dt} + r_{kd} i_{kd}; \\ 0 = \frac{d\psi_{kq}}{dt} + r_{kq} i_{kq}; \\ J \frac{d\omega}{dt} = M_m - M_3 - M; \\ M_3 = \frac{3}{2} (\psi_d i_q - \psi_q i_d) \end{array} \right. \quad (10)$$

СЕКЦИЯ 2. Информационные и управляющие системы
технологическими процессами и системы автоматизации
технологических процессов и производственных комплексов

где U_a, U_b, U_c – вырабатываемые напряжения на зажимах статора СГ; ψ_a, ψ_b, ψ_c – потокосцепления обмотки статора; i_a, i_b, i_c – токи обмотки статора; r_l – активное сопротивление обмотки статора; r_f – активное сопротивление обмотки возбуждения; U_f – напряжение на зажимах обмотки возбуждения; i_f, ψ_f – ток и потокосцепление обмотки возбуждения; ψ_{kd}, ψ_{kq} – потокосцепление демпферной обмотки по продольной и поперечной осям; r_{kd}, r_{kq} – активное сопротивление демпферной обмотки по продольной и поперечной осям; i_{kd}, i_{kq} – токи демпферной обмотки по продольной и поперечной осям; J – момент инерции вращающихся частей гидроагрегата; M_T – момент создаваемым гидротурбиной при прохождении воды через агрегат; $M_э$ – электромагнитный момент синхронного генератора; ΔM – момент создаваемым механическим поломкой на валу гидроагрегата; ω – скорость вращения ротора гидроагрегата.

По приведенным выше уравнениям (1) – (10) составлена структурная схема модели гидроагрегата в аварийном режиме связанной с механической поломкой или попадания инородного тела в гидротурбину.

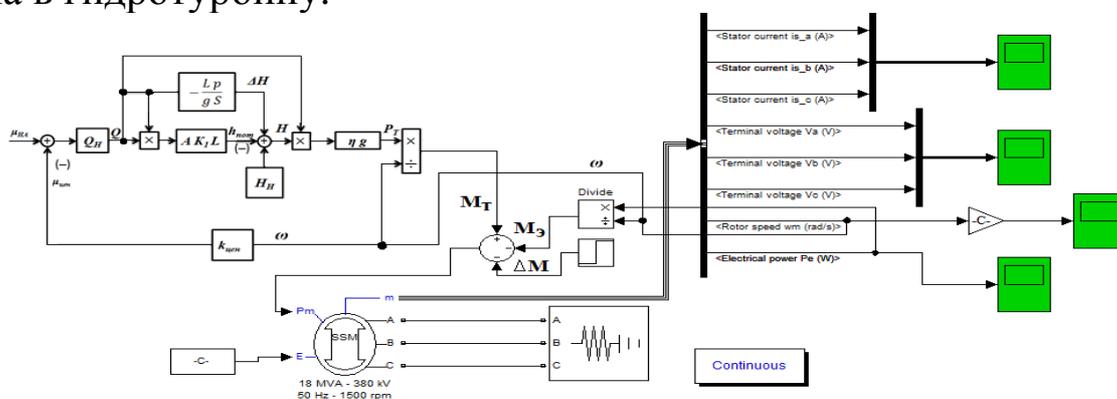


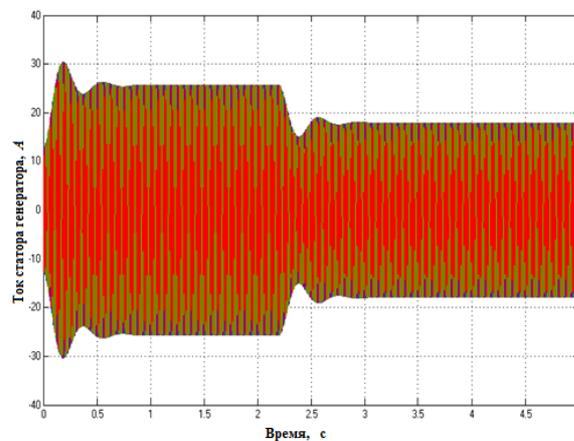
Рисунок 1 – Структурная схема математической модели гидротурбины и синхронного генератора, работающего на автономную нагрузку

При моделировании нагрузка синхронного генератора задавалась активная. Это объясняется тем, что одиночные гидроагрегаты в отдаленных и труднодоступных местах работают в основном на активную нагрузку, обеспечивая электропитанием системы освещения и отопления. Структурная схема математической модели гидротурбины с напорным трубопроводом

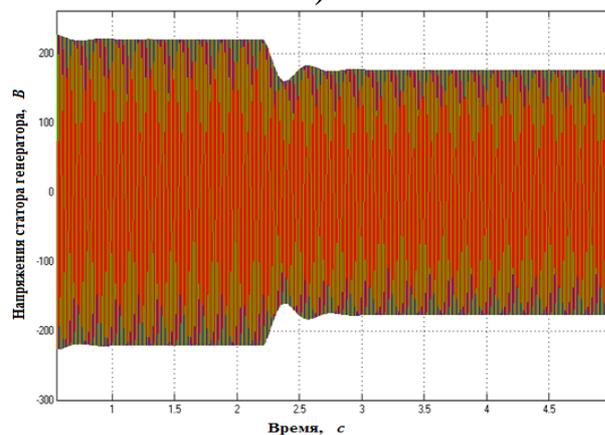
СЕКЦИЯ 2. Информационные и управляющие системы
технологическими процессами и системы автоматизации
технологических процессов и производственных комплексов

и синхронного генератора, работающего, на автономную нагрузку приведена на рисунке 1.

Моделирование производилось для синхронного генератора мощностью 15 кВт. В ходе моделирования исследовалась динамика переходных процессов электрических и механических параметров при возникновении механической поломки или попадании инородного тела в гидротурбину. Аварийная ситуация моделировалась при номинальной мощности синхронного генератора и результаты моделирования приведены в рисунках (2) и (4).



а)



б)

Рисунок 2 – Графики переходных процессов трехфазного тока статора и напряжения на зажимах статорной обмотки синхронного генератора

СЕКЦИЯ 2. Информационные и управляющие системы
технологическими процессами и системы автоматизации
технологических процессов и производственных комплексов

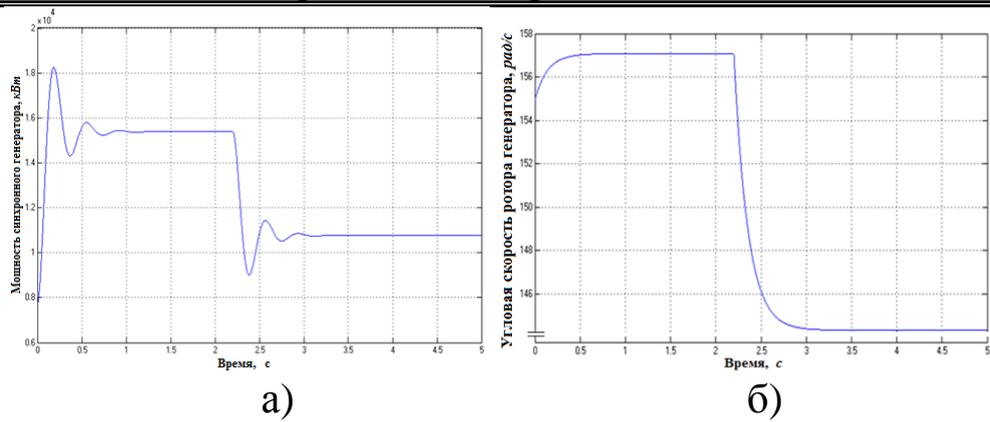


Рисунок 3 – Графики переходных процессов изменения
вырабатываемой мощности (а) и угловой скорости (б) синхронного
генератора

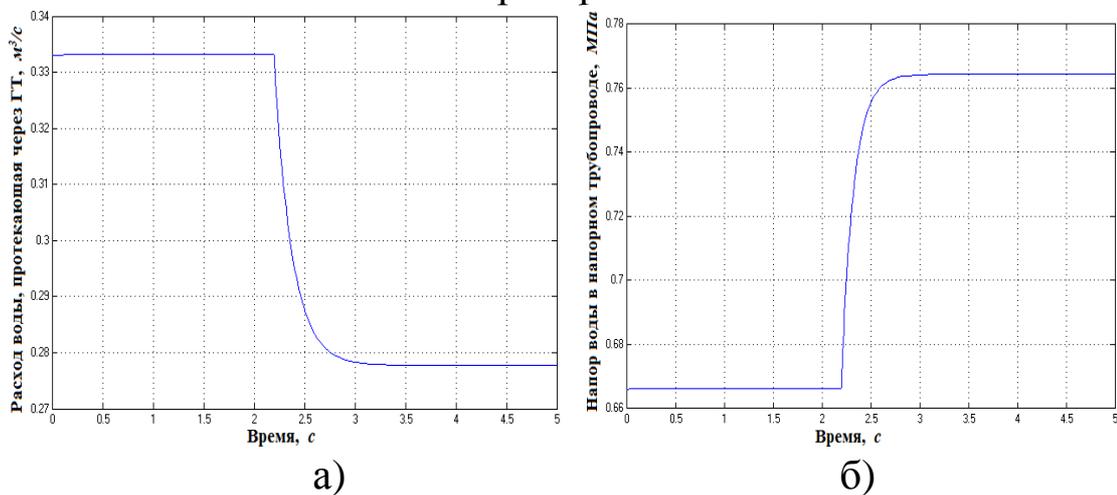


Рисунок 4 – Графики переходных процессов изменения
расхода воды протекающей через гидротурбину (а) и напора воды
в напорном трубопроводе (б)

Анализ полученных графиков переходных процессов на рисунках 2 и 4 показывает, что изменение механического момента на валу гидроагрегата, обусловленное механическим поломкой или попаданием инородного тела в гидротурбину, приводит к изменению всех параметров гидроагрегата, работающего на автономную нагрузку. Скорость вращения гидроагрегата снижается, что приводит к снижению напряжения фазных обмоток статора. В свою очередь это приводит к уменьшению фазных токов в статорных обмотках и уменьшению вырабатываемой мощности и электромагнитного момента синхронного генератора.

СЕКЦИЯ 2. Информационные и управляющие системы
технологическими процессами и системы автоматизации
технологических процессов и производственных комплексов

Изменение электрических и механических параметров гидроагрегата в момент возникновения механической поломки происходит при неизменном угле открытия задвижки напорного трубопровода. В момент механической поломки происходит изменение давления в напорном трубопроводе по причине увеличения момента сопротивления на валу гидроагрегата. Совокупность вышеуказанных изменения электрических и механических параметров можно использовать для разработки новой системы защиты от механических поломок или попадания инородного тела в гидротурбину гидроагрегатов малых гидроэлектростанции.

Список литературы

1. Кипервассер М.В., Гуламов Ш.Р. Разработка системы защиты гидроагрегатов, работающих на автономную нагрузку, от механических поломок // Вестник Чувашского университета. 2016 г. – №3 (142). – с. 68-75.
2. Савельев А.Н., Кипервассер М.В., Инжелевская О.В. Распознавание аварийных ситуаций механического оборудования с электроприводом постоянного тока. // Известия высших учебных заведений. Черная металлургия. 2011 г. №6 – С. 42-45.
3. Кипервассер М.В. Методика автоматического распознавания аварийных ситуации механического оборудования, сопряженного с электрической машиной. // Автоматизированный электропривод и промышленная электроника: Сборник научных трудов Четвертой Всероссийской научно-практической конференции, г. Новокузнецк: изд-во СибГИУ, 2010 г. – С. 245-247.
4. Асарин А. Е., Бестужева К. Н. Водозаэнергетические расчеты. – М.: Энергоатомиздат, 1986. 224 с.
5. Осин И.Л. Шакарян Ю.Г. Электрические машины: Синхронные машины: Учебное пособие для вузов по спец. «Электромеханика» / И.П. Копылов. – М.: Высшая школа, 1990. – 304 с.: ил.

УДК 004.9

МОДУЛЬ ИНТЕРФЕЙСА СВЯЗИ АБСОЛЮТНЫХ ДАТЧИКОВ УГЛОВОГО ПОЛОЖЕНИЯ

А. В. Дужая

*Сибирский государственный индустриальный университет,
г. Новокузнецк.*

В работе обозначена причина необходимости разработки защищённого от индустриальных помех, гальванически развязанного интерфейса связи абсолютных датчиков углового положения с промышленными контроллерами и компьютерами. Приведены его основные технические параметры, особенности, некоторые технические подробности разработки.

Ключевые слова: интерфейс, датчик, датчик положения, АСУ ТП, гальваноразвязка, помехозащищённость, резервирование, импортозамещение.

Абсолютные датчики углового положения работают в условиях индустриальных помех на мощных электроприводах лифтов, шахтных подъёмных установок и в координатной защите подъёмных кранов. Большинство датчиков работают по интерфейсу SSI или BiSS. В компьютерных системах сбора данных обычно применяются интерфейсы USB, RS-232 или RS-485. Для создания систем сбора и обработки информации о координатах и перемещениях рабочего органа необходимы модули интерфейса связи. Специальное Конструкторское Бюро Измерительных Систем (СКБ ИС) производит такие модули, но они не имеют защиты от индустриальных помех и перенапряжения, быстро выходят из строя в индустриальных условиях. Резервирование у них не предусмотрено.

Решить проблему индустриальных помех можно было бы установкой дополнительных устройств защиты на входы имеющегося модуля, но радикальным решением стала разработка аналогичного модуля со встроенной защитой, приспособленного для применения на горнодобывающих предприятиях, которому не свойственны недостатки прототипа.

СЕКЦИЯ 2. Информационные и управляющие системы
технологическими процессами и системы автоматизации
технологических процессов и производственных комплексов

Разработанный модуль обеспечивать приём от двух датчиков углового положения информации о перемещениях объекта управления и передачу её контроллерам и компьютерам по имеющимся у них интерфейсам (USB, RS-232 или RS-485) одновременно и независимо.

Основные технические параметры:

- К одному модулю подключаются 2 датчика и 1 тахогенератор.
- Автоматическое определение параметров датчиков.
- Одновременная независимая работа с двумя приёмниками сигнала.
- Отказ одного из каналов связи или датчиков, в т.ч. КЗ питания, не нарушает работу второго датчика. Это позволяет строить системы с резервированием каналов связи, датчиков и источников питания.
- Гальваническая развязка: 1000 В.
- Защита от импульсных перенапряжений, не менее: 8 кВ
- Соответствие технических характеристик ГОСТ Р 51317.6.2-2007 «Совместимость технических средств электромагнитная. Устойчивость к электромагнитным помехам технических средств, применяемых в промышленных зонах. Требования и методы испытаний».

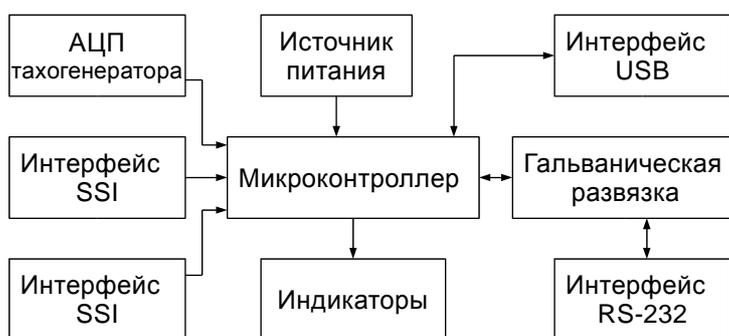


Рисунок 1 - Блок-схема модуля

Особенности модуля:

1. Защита от промышленных помех и перенапряжения, обеспечивающая бесперебойную работу модуля при работе в непосредственной близости от электродвигателя шахтной подъёмной машины.
2. Резервирование каналов связи, обеспечивающее бесперебойную передачу данных положения, в условиях отказа одного из каналов

СЕКЦИЯ 2. Информационные и управляющие системы
технологическими процессами и системы автоматизации
технологических процессов и производственных комплексов

связи, либо одного из датчиков.

3. Автоматическое определение разрядности кода датчиков.

4. Особого внимания заслуживает узел питания модуля (рис.2):

4.1 Обеспечивающий бесперебойную работу модуля при:

а) коротком замыкании в одном датчике,

б) выходе напряжения одного из источников питания за допустимые пределы.

4.2 Предотвращающей необратимый отказ модуля при коротком замыкании во всех датчиках, выходе напряжений всех источников питания за допустимые пределы или подключения неправильной полярности.

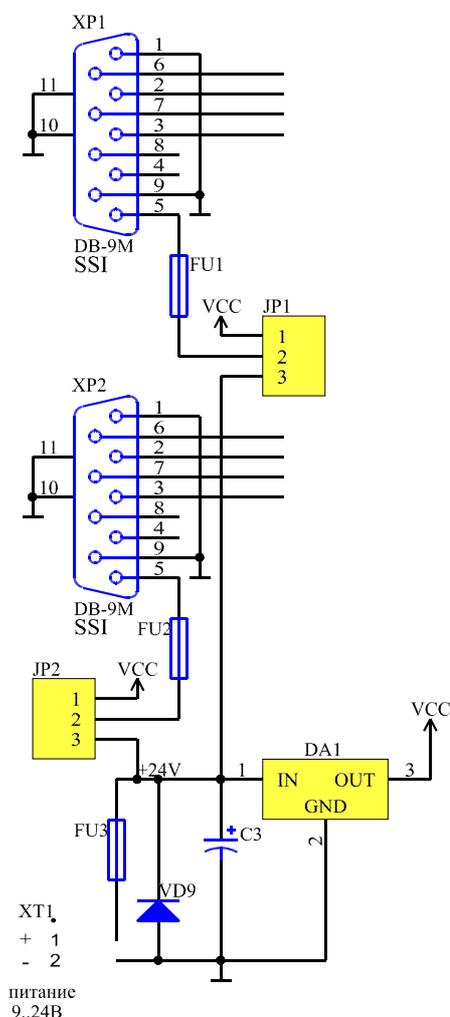


Рисунок 2. Цепи питания модуля

Питание может подаваться от одного из трёх источников:

1) клеммы XT1, от 9 до 24 В;

СЕКЦИЯ 2. Информационные и управляющие системы
технологическими процессами и системы автоматизации
технологических процессов и производственных комплексов

2) разъёмы SSI XP1-2, от 9 до 24 В, либо 5В, в зависимости от положения перемычек JP1-2;

3) разъём USB XS4 – 5В.

Перемычками JP1, JP2 можно выбрать питание датчиков непосредственно от напряжения, подаваемого на клеммы XT1 (от 9 до 24 В), либо от стабилизатора DA1 (5В). Питание также может подаваться на разъём SSI XP1 или XP2 со стороны датчика. Если питание подаётся на датчики независимо от модуля — перемычки не устанавливать. Если подключен разъём USB, а XT1 не подключен, модуль питается от USB (5В) и может питать только пятивольтовые датчики током не более 400 мА суммарно на оба датчика.

Предохранители FU1, FU2 защищают модуль от КЗ в одном из датчиков, обеспечивают продолжение работы со вторым, исправным датчиком. Предохранитель FU3 и диод VD9 — защита от переплюсовки источника питания. Ток предохранителей FU1, FU2 должен быть немного больше тока, потребляемого датчиками. Ток предохранителя FU3 должен быть более чем в 2 раза больше их суммы.

Модуль может быть собран с использованием как импортной, так и отечественной элементной базы (32-разрядных микроконтроллеров на базе процессорного ядра ARM Cortex-M3 и приемопередатчиков интерфейсов RS-232/485/422, SSI/BiSS производства АО "ПКК Миландр", стабилизаторов напряжения серии 1334 и ограничителей напряжения производства АО "Воронежский Завод Полупроводниковых Приборов").

В настоящее время проводятся НИОКР на стадии испытания первого опытного образца. Требуются инвестиции для промышленного мелкосерийного производства партии опытных образцов.

УДК 621.65:62-83

СИСТЕМЫ ПРОТОЧНОГО ПРОБООТБОРА НА БАЗЕ
АВТОМАТИЗИРОВАННОГО ЭЛЕКТРОПРИВОДА И КОНТРОЛЬ
ПАРАМЕТРОВ НЕФТИ ПРОТОЧНЫМ ЯМР-АНАЛИЗАТОРОМ

Р.С. Кашаев, Н.Т. Киен

*Казанский государственный энергетический университет,
г. Казань*

В работе рассмотрены системы проточного пробоотбора на базе автоматизированного электропривода и аппаратура для реализации методик экспресс-контроля газосодержания скважинной жидкости (СКЖ) и плотности компонентов, концентрации воды методом ЯМР-релаксометрии:

Ключевые слова: проточный пробоотбор, автоматизированный электропривод, газосодержание, плотность, концентрация воды, ЯМР-релаксометрия.

В начале последнего десятилетия в связи с переходом большинства нефтяных месторождений на поздние стадии разработки и резким повышением обводненности добываемой скважинной жидкости (СКЖ) вышел ГОСТ 8.615-2005 стала актуальной задача разработки экспресс-методов ее контроля по на продуктивность (расход) скважин, концентрацию воды, газосодержание СКЖ и плотности компонентов для оптимизации процессов нефтедобычи. Существующие методы контроля не обладают достаточной представительностью пробоотбора, не дают полной информации об СКЖ и нефти, осуществляются комплектов разных анализаторов и не обладают достаточной оперативностью.

Такими возможностями обладает метод импульсного ядерного магнитного резонанса (ЯМР), в частности метод ЯМР-релаксометрии (ЯМРР), являющийся неконтактным, неразрушающим и позволяющим проводить экспресс-анализ в автоматизированном режиме [1].

Целью работ является разработка системы проточного пробоотбора с использованием автоматизированного электропривода (АЭП) и аппаратуры для методик экспресс-контроля нефти методом ЯМРР:

СЕКЦИЯ 2. Информационные и управляющие системы
технологическими процессами и системы автоматизации
технологических процессов и производственных комплексов

- газосодержания СКЖ и плотности компонентов СКЖ;
- концентрации воды в СКЖ и сырой нефти;
- расхода СКЖ на нефтедобывающих скважинах и на групповых замерных установках (ГЗУ).

Решение поставленных задач позволит одним измерительным комплексом на базе метода ЯМРР обеспечить аппаратную поддержку ГОСТ 8.615-2005 на продуктивность (расход) скважин, концентрацию воды, нефти, газосодержания и плотности нефти для оптимизации технологических процессов нефтедобычи, подготовки, транспортировки и переработки нефти.

Для работы информационных систем нефтедобычи с помощью установок центробежных электронасосов (УЭЦН) уровня автоматизированной системы управления предприятием (АСУП) необходимо постоянно или периодически передавать данные о добыче, закачке воды в пласт, энергопотреблении и т.д. Однако зачастую эти данные вносятся вручную или загружаются в базы данных 1-4 раза в сутки.

Проблему поддержания продуктивности скважин на оптимальном уровне можно решить использованием управляющих сигналов на преобразователь напряжения и частоты погружного электродвигателя (ПЭД) от микропроцессорного контроллера проточного анализатора ядерного магнитного резонанса (ЯМРА). При этом не предполагается размещение первичных преобразователей в скважинах, поскольку это сопряжено с техническими сложностями энергоснабжения УЭЦН и создает потери напора. Как ПНЧ, так и ЯМР-анализатор располагаются на поверхности на удалении от скважины или в групповой замерной установке (ГЗУ).

На технологические процессы, связанные с добычей нефти оказывают влияние: скачкообразный характер изменения расхода и давления СКЖ, изменения плотности и вязкости жидкости, изменение газового фактора (газовая пробка), дискретный характер срабатывания противоаварийной защиты. Поэтому создание систем автоматического управления (САУ) УЭЦН включает решение следующих основных задач:

СЕКЦИЯ 2. Информационные и управляющие системы технологическими процессами и системы автоматизации технологических процессов и производственных комплексов

- определение параметров среды (газонасыщенности и плотности СКЖ и нефти) или процесса (расхода, уровня), по которым будет осуществляться регулирование УЭЦН;
- регулирование параметров скважин с поддержанием их на заданном уровне;
- сигнализацию (оповещение, предупреждение) об отклонениях значений параметров УЭЦН и процесса в целом за допустимые пределы;
- блокировку (запрещение) включения оборудования УЭЦН;
- защиту УЭЦН и другого оборудования в аварийных ситуациях (выключение, перевод на безопасный режим).

Первое сообщение о разработанном нами проточном ЯМР-анализаторе было сделано нами на XXVIII Ampere Congress, 1996, Canterbury, England [2]. Заявка в Роспатент на способ измерения концентрации воды в скважинной жидкости проточным ЯМР-анализатором (1997, КНИРТИ) была подана в 1995 г.[3].

На рис.1 и рис.2 представлены фото функциональная схема разработанного нами ЯМРА-I первого поколения.



Рисунок 1 – Проточный ЯМР-анализатор скважинной жидкости

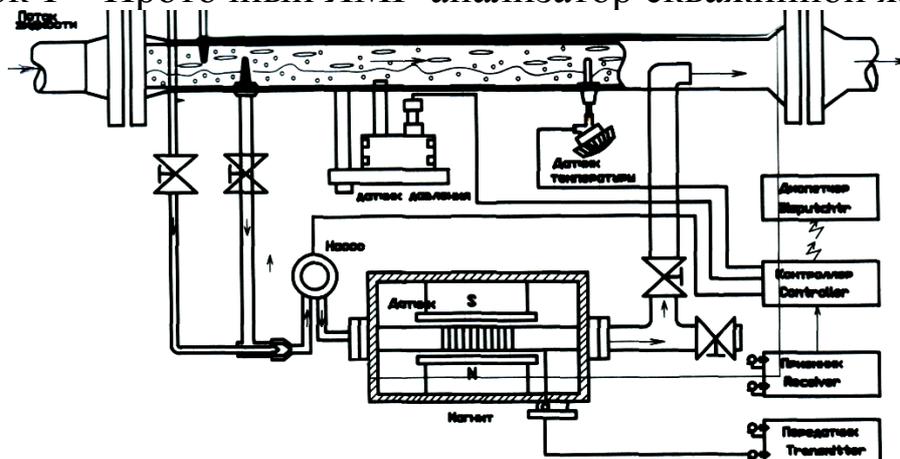


Рисунок 2 – Функциональная схема проточного ЯМР-анализатора

СЕКЦИЯ 2. Информационные и управляющие системы
технологическими процессами и системы автоматизации
технологических процессов и производственных комплексов

ЯМР-анализатор предназначен для контроля технологического процесса добычи и подготовки нефти. Функциональное назначение - количественное определение расхода, концентрации воды, нефти и газа в продукции нефтедобывающих скважин. Область применения – скважины, групповые замерные установки (ГЗУ), установки подготовки нефти, газа и воды, скважины. Характеристики контролируемой среды: водо-нефте-газовая смесь (СКЖ), температура среды +5 - +50⁰С, давление 0.1 - 6.4 Мпа, плотность среды - 700 - 1100 кг/м³, объемная доля воды, нефти и газа 0-100%, массовая доля механических примесей - не более 10%, массовая концентрация солей не ограничивается. Пределы допускаемого значения основной приведенной погрешности: по воде - ±4%, по нефти ±4% , по газу ±6%. Изменения показаний и выходного сигнала анализатора составляют 0.5 основной приведенной погрешности (ОПП) при изменении: температуры окружающей среды на каждые 10⁰С, напряжения питания от -15% до +10%, плотности нефти на 50 кг/м³ (без перенастройки ЯМР-анализатора). Режим работы ЯМР-анализатора - непрерывно-циклический, время однократного измерения - не более 3 минут. Выходной измерительный сигнал анализатора - 5-20 мА по ГОСТ 26.011-80. Связь с ЭВМ верхнего уровня осуществляется через интерфейс, соответствующий требованиям ГОСТ 26.016-81.

ЯМР-анализатор расположен во взрывоопасной зоне, поэтому передатчик мощных радиочастотных импульсов, приемник полезных сигналов с МП-контроллером и блок питания расположены вне опасной зоны на расстоянии четверти длины волны $\lambda/4$ магнитного резонанса (около 15 м). Уровень взрывозащиты магнитной системы с ЯМР-датчиком - «взрывонепроницаемая оболочка» с кварцевым заполнением Exq.

Анализатор работает следующим образом: проба из горизонтального трубопровода со скважины (или магистрального трубопровода) двумя конусными пробоотборниками (на жидкость и газ) (рис.2) отбирается шестеренным насосом, приводимым на определенное время в движение автоматизированным электроприводом (АЭП) при открытии взрывозащищенного

СЕКЦИЯ 2. Информационные и управляющие системы
технологическими процессами и системы автоматизации
технологических процессов и производственных комплексов

клапана, проходит в шестеренный смеситель, и перекачивается им в датчик ЯМР, расположенный внутри магнита с магнитным полем, соответствующим резонансной частоте 3 МГц. Подачей серий мощных радиочастотных импульсов, передаваемых по коаксиальному кабелю от передатчика, образец облучается переменным магнитным полем, фиксируется полезный сигнал огибающей спин-эхо, который по тому же каналу передается в приемник, усиливается, поступает в АЦП и через контроллер высвечивается на экране монитора. Далее сигнал обрабатывается по заданной программе и определяются физико-химические параметры: концентрации воды и нефти, газонасыщенность и, при необходимости, плотность и вязкость. Данные параметры служат для выработки управляющих сигналов на ПНЧ УЭЦН.

В 2004 г. было опубликовано Свидетельство на полезную модель №40496 [4]. Устройство в разных вариантах (рис.3) содержит магнитную систему из двух постоянных магнитов, собранных из отдельных элементов и датчики разной конфигурации, обеспечивающие поляризацию и анализ по сдвигу фаз и изменению амплитуды сигнала. Конфигурации трубочек в зазоре поляризующей части магнита аналогичны таковым в книге [5]. Был изготовлен программно-аппаратный комплекс «Канал-квант». Но по точкам огибающей сигнала, приведенной на рис.4, можно провести не одну прямую. Тем не менее, анализ сигнала с помощью развитого программного обеспечения позволяет, по видимому, судить о расходе и составе многофазного потока с точностью, приведенной в статье [6]. Приводятся следующие значения погрешностей: $\delta_p = \pm 4\%$ для объемного расхода жидкости на скважине в диапазоне 0-60 м³/сут. и $\delta_v = \pm 5\%$ для концентрации воды. Эти погрешности выше, чем в весоизмерительной установке на ГЗУ «Спутник-М», у которой $\delta_v = \pm 2.5\%$.

**СЕКЦИЯ 2. Информационные и управляющие системы
технологическими процессами и системы автоматизации
технологических процессов и производственных комплексов**

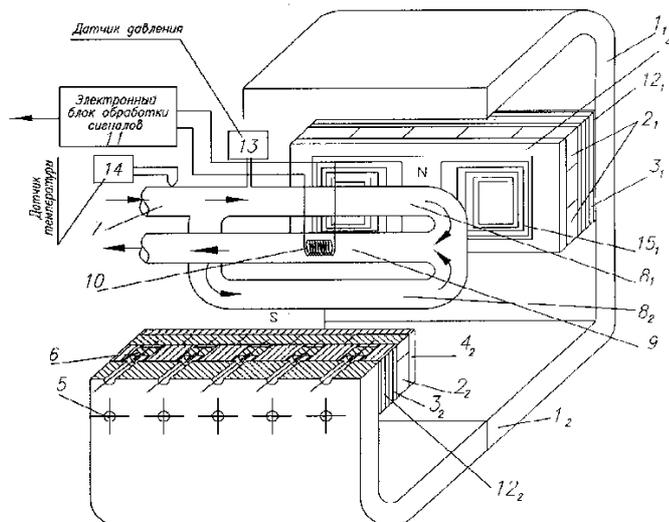
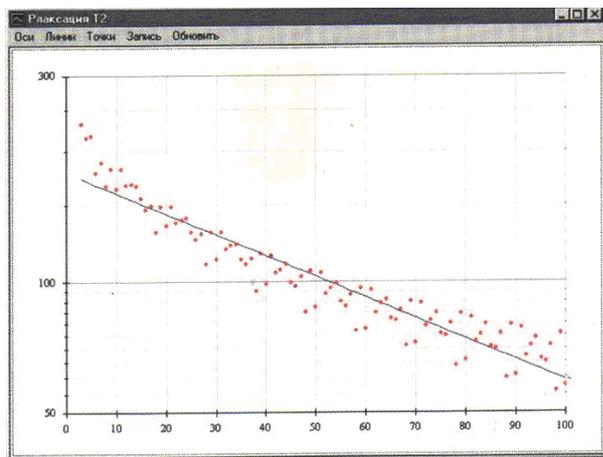


Рисунок 3



Окно графика спада релаксации смеси вода-нефть,
полученного при измерении состава смеси в отладочном режиме



Калибровочный стенд с подключённым измерителем

Рисунок 4

В 2008 г. авторами был получен патент РФ №74710 [7] на ЯМР-анализатор ЯМРА-II второго поколения, представленный на рис. 5.

**СЕКЦИЯ 2. Информационные и управляющие системы
технологическими процессами и системы автоматизации
технологических процессов и производственных комплексов**

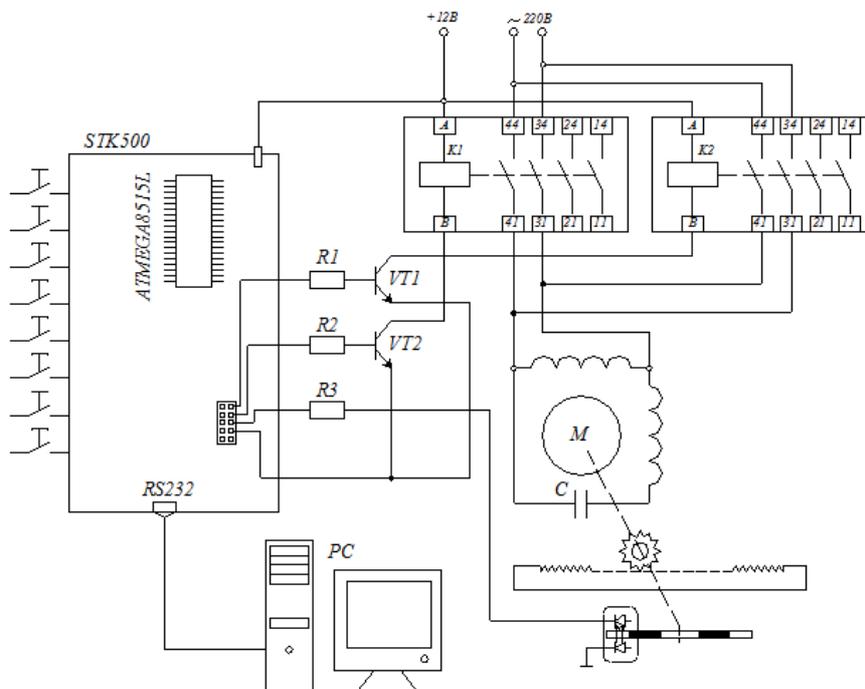
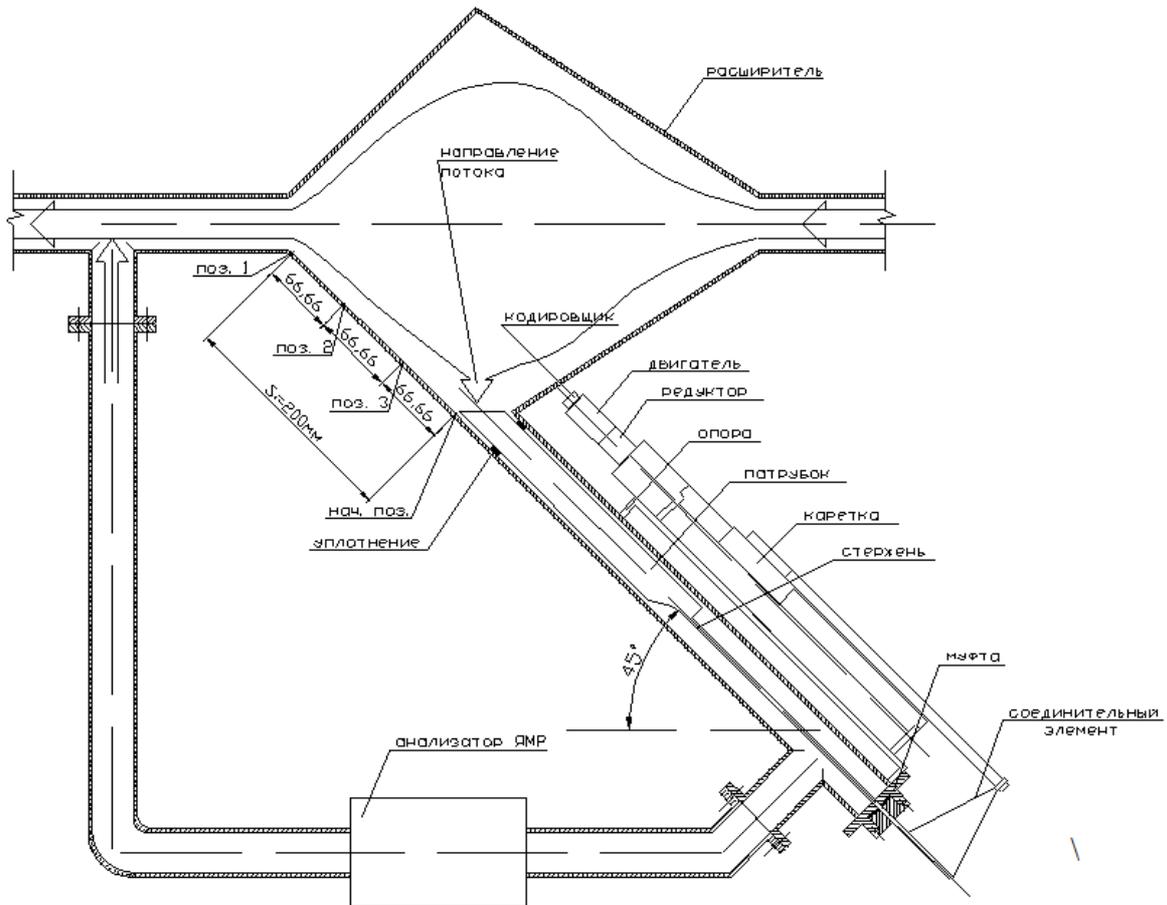


Рисунок 5 – Система пробоотбора ЯМРА-II.

Устройство включает систему пробоотбора, использующую АЭП, приводящий в движение перемещаемый в трубе пробоотборный патрубок, датчик релаксометра ЯМР для облучения потока жидкости последовательностью РЧ импульсов по методу Карра-Парселла-Мейбум-Гилла (КПМГ), блок для измерения времен спин-спиновой релаксации, по которым определяются физико-химические параметры СКЖ. С целью повышения диапазона измерения расхода и представительности пробоотбора в основу конструкции новой системы заложено устройство, представленное на рис.5. Устройство пробоотбора отличается тем, что измерительная труба (вставленная в магистральную), из которой осуществляется отбор пробы, имеет коническое расширение, а пробоотбор в датчик релаксометра ЯМР осуществляется патрубком, имеющим возможность с помощью АЭП перемещения по сечению конического расширения. Управление положением патрубка осуществляется от микропроцессорного контроллера ATMEGA8515L.

Принцип пробоотбора основан на уравнении Бернулли, согласно которому при неразрывности потока изменения давления жидкости P_i в разных сечениях трубы S_i при скоростях v_i описывается уравнением:

$$P_i/\rho g + v_i^2/2g = const, \quad (1)$$

или вследствие того, что расход Q_i постоянен: $Q_i = S_i v_i = const$, давления P_1 и P_2 в разных сечениях трубы S_1 и S_2 будут связаны уравнением:

$$P_1/\rho + const/S_1^2 = P_2/\rho + const/S_2^2 \quad (2)$$

Поток жидкости, попадая в расширение трубы, снижает скорость v и увеличивает давление P в степени, пропорциональной \sqrt{S} . В результате происходит интенсивная турбулизация смеси, которая гомогенизируется и через входной патрубок поступает со скоростью v_i , определяемой положением патрубка, в датчик магнита ЯМР- анализатора и выходит через выходной патрубок, который может быть установлен в любом положении трубы. В результате, скорость потока будет определяться разницей давлений $(P_{max} - P_i)$ в сечении S_{max} и S_i . При расположении патрубка в сечении на уровне магистральной трубы разница давлений будет минимальна независимо от скорости и давления в магистральной

СЕКЦИЯ 2. Информационные и управляющие системы
технологическими процессами и системы автоматизации
технологических процессов и производственных комплексов

трубе и скорость движения потока через датчик ЯМР будет также минимальной, что необходимо для измерения ЯМР-параметров (влажности, концентрации нефти, газа, дисперсности, вязкости, плотности и др.) как бы «в остановленном потоке. Тем самым отпадает необходимость реальной остановки потока. Конструктивно это означает отказ от вентиля и задвижек, требующих взрывозащиты и имеющих ограниченный ресурс работы (обычно не более 2000 включений). Для измерения расхода входной патрубков располагается в таком положении сечения расширения трубы, которое обеспечивает диапазон скоростей потока, для которого нами была получена зависимость значений скорости релаксации

$$(T_{2\text{Эфф}})^{-1} = (T_{2o})^{-1} + (\tau)^{-1}, \quad (3)$$

где $T_{2\text{Эфф}}$ – измеряемое время релаксации потока, T_{2o} – время релаксации неподвижной жидкости, τ - время пребывания жидкости в объеме катушки датчика) от скорости потока V (м/с) или расхода Q (л/час.). Скорость потока V и расход Q определяют по формулам:

$$V = K_C S [(T_{2o})^{-1} + (\tau)^{-1}] / K S_D \quad (4)$$

$$Q = K_C S [(T_{2o})^{-1} + (\tau)^{-1}] \quad (5)$$

где $K = S/S_D$ – коэффициент редукции, S_D и S – площади сечений трубки датчика ЯМР и трубы (на уровне положения патрубка в коническом расширении измерительной трубы), K_C – коэффициент в зависимости $Q_D = K_C S_D (T_{2\text{Эфф}})^{-1}$, зависящий от состава. Расход Q_i (и соответственно скорости V_i) отдельных компонент жидкости определяют по формуле:

$$Q_i = Q P_i \quad (6)$$

где P_i – концентрация i -й компоненты смеси, определяемой из огибающих эхо в методике КПМГ. Макет ЯМР-анализатора реализован на трубке $\varnothing 30$ мм в зазоре магнита релаксометра ПМР по патенту № №67719 [8].

Объемное содержание газа $V_G^{\text{ЯМР}}$ с использованием ЯМРА-II определяется по формуле:

$$V_G^{\text{ЯМР}} = (A_0 - A_G) / A_0 \quad (7)$$

где A_0, A_G - соответственно начальные амплитуды при полном заполнении ЯМР-датчика нефтью и при частичном заполнении его

СЕКЦИЯ 2. Информационные и управляющие системы
технологическими процессами и системы автоматизации
технологических процессов и производственных комплексов

газом. Погрешность в стационарных условиях составила не более 1,4%, на потоке 4,85%.

ЯМР-анализатор позволяет также в остановленном потоке определять: дисперсность, концентрацию серы, вязкость, состав нефти и другие физико-химические параметры по разработанным методикам [1].

Таким образом, устройство обладает следующими преимуществами:

1. Магистральная труба может быть любого диаметра, т.е. верхний диапазон измерений расхода практически неограничен;

2. В устройстве пробоотбора осуществляется существенная гомогенизация СКЖ без пассивных гомогенизаторов, создающих сопротивление потоку;

3. Подача пробы в датчик ЯМРА-II осуществляется перепадом давления, который можно регулировать положением патрубка в расширителе, при этом не требуются насосы и задвижки, можно «остановить» поток;

4. Расход в трубе можно осуществлять путем предварительного определения влажности W , выбора из базы данных ЭВМ зависимости скорости релаксации от потока, соответствующей данной W , измерением эффективного времени релаксации, которые могут быть измерены с большей точностью, чем фаза и амплитуда сигнала ЯМР и затем определения скорости потока по скорости релаксации;

5. Расход в трубе можно осуществлять выбором положения патрубка, соответствующего значениям максимальной крутизны скорости релаксации;

6. Возможно сканирование скорости потока по сечению перемещением патрубка;

7. Возможно измерение ФХП жидкости в «остановленном» потоке.

Список литературы

1. Кашаев Р.С. Аппаратура и методики ЯМР-анализа нефтяных дисперсных систем. Lambert Academic Publishing. 2012. -91 с.

СЕКЦИЯ 2. Информационные и управляющие системы
технологическими процессами и системы автоматизации
технологических процессов и производственных комплексов

2. Kashaev R.S., Temnikov A.N., Idiatullin Z.Sh., Charitonov M.V., Farachov T.I. NMR-Analyser for Automatic Control of Physical-Chemical Parameters of Crude Oil and Bitumen//Extended Abstracts "Magnetic Resonance & Related Phenomena", XXVIII Ampere Congress, 1996, Canterbury, England, p.295-296.

3. Кашаев Р.С., Темников А.Н., Идиятуллин З.Ш. Способ измерения влажности нефти и нефтепродуктов. Бюллетень изобретений РФ. 1997, №28. Заявка на патент № 95117256/ 25, 10.12.1995.

4. Свидетельство на полезную модель №40496 U1 от 10.09.2004 г. на «Устройство для измерения состава и расхода многокомпонентной жидкости на основе ЯМР». авторы Валиев Р.Ф., Харисов А.Г., Садыков И.И., Шмелев А.А., патентообладатель ОАО «Альметьевский з-д «Радиоприбор»

5. Жерновой А.И., Латышев Г.Д. Ядерный магнитный резонанс в проточной жидкости. Атомиздат. 1964 с. 25, 26.

6. Одиванов В., Курбанов Р., Садыков И., Харисов А. Программно-аппаратный комплекс «Канал-квант» для измерения состава и расхода жидкости, добываемой из нефтяных скважин. ж. СТА 2/2006, с.44-48, www.sta.ru

7. Патент РФ №74710 от 10.07.2008 г. Устройство для измерения состава и расхода многокомпонентных жидкостей методом ЯМР авторов Кашаев Р.С. (RU), Темников А.Н. (RU), Идиятуллин З.Ш. (RU), Даутов И.Р. (RU), патентообладатель ООО «Идея-Резонанс» (RU).

8. Патент № №67719 от 25.06. 2007 г. авт. Идиятуллин З.Ш., Кашаев Р.С., Темников А.Н.

УДК 621.65:62-83

УПРАВЛЕНИЕ ЭЛЕКТРОСНАБЖЕНИЕМ ЭЛЕКТРОПРИВОДОВ
НЕФТЕДОБЫВАЮЩИХ, НАГНЕТАТЕЛЬНЫХ СКВАЖИН И
УСТАНОВОК ОБЕЗВОЖИВАНИЯ НЕФТИ ПО ДАННЫМ ЯМР

Р. С. Кашаев, Б. Э. Кубанго

*Казанский Государственный Энергетический университет,
г.Казань*

В работе рассматривается электроснабжение автоматизированных электроприводов и система автоматического управления (САУ) технологических процессов нефтедобычи, повышения нефтеотдачи и подготовки нефти по данным экспресс-контроля продуктивности и качества продукции скважин проточным анализатором ядерного магнитного резонанса.

Ключевые слова: электроснабжение, автоматизированный электропривод, САУ, контроль, ядерный магнитный резонанс.

Автоматизация играет решающую роль в технологиях нефтедобычи и подготовки и требуют создания системы автоматического управления (САУ), основанной на проточном экспресс-контроле количества и качества продукции скважин. Ни один крупный промысел не может в настоящее время обойтись без систем автоматизации и документооборота. Для работы информационных систем уровня АСУП (автоматизированная система управления предприятием) необходимо постоянно или периодически, но часто передавать данные о добыче, закачке воды в пласт, энергопотреблении и т.д. Однако зачастую эти данные вносятся вручную или загружаются в базы данных 1-4 раза в сутки.

Целью работ является разработка системы электроснабжения проточного пробоотбора, анализа и подготовки нефти путем обезвоживания с использованием автоматизированных электроприводов (АЭП) и аппаратуры для реализации методик экспресс-контроля нефти методом ЯМРР:

- газосодержания СКЖ и плотности компонентов СКЖ;
- концентрации воды в СКЖ и сырой нефти;

СЕКЦИЯ 2. Информационные и управляющие системы
технологическими процессами и системы автоматизации
технологических процессов и производственных комплексов

- расхода СКЖ на нефтедобывающих и нагнетательных скважинах и на групповых замерных установках (ГЗУ).

Поэтому еще одной целью работы является разработка автоматизации систем электроснабжения нефтедобывающих скважин с использованием управляющих сигналов от проточного анализатора ядерного магнитного резонанса (ЯМРА) по данным о дебите скважин, концентрации газа и воды в скважинной жидкости, плотности и солесодержании в воде. При этом не предполагается размещение первичных преобразователей непосредственно в скважинах, поскольку это ведет к сложностям их энергоснабжения и создает потери напора.

На технологические процессы, связанные с нефтедобычей и повышением нефтеотдачи оказывают влияние: скачкообразный характер изменения давления СКЖ, изменения плотности и вязкости жидкости, изменение газового фактора (газовая пробка), дискретный характер срабатывания противоаварийной защиты. Поэтому системы автоматического управления нефтедобывающими насосами, установками отделения пластовой воды от сырой нефти, ее очистки от солей и остаточной нефти, ЭП нагнетательных скважин включают решение следующих основных задач:

- определение параметров сырой нефти (концентраций воды, пластовых солей и остаточной нефти, газонасыщенности);
- регулирование параметров водоотделения от сырой нефти в установках обезвоживания с поддержанием ее параметров на заданном уровне;
- определение параметров процесса (расхода закачиваемой в пласт воды);
- сигнализацию (оповещение, предупреждение) об отклонениях значений параметров и процесса в целом за допустимые пределы;
- блокировку (запрещение) включения оборудования;
- защиту оборудования в аварийных ситуациях (выключение, перевод на безопасный режим).

Таким образом, назначение САУ энергоснабжением – оперативное распределение энергии между электроприемниками месторождения.

СЕКЦИЯ 2. Информационные и управляющие системы
технологическими процессами и системы автоматизации
технологических процессов и производственных комплексов

В системах промышленного электроснабжения (СПЭ) нефтедобывающих скважин часто имеет место изменение нагрузки электродвигателей (ЭД) центробежных погружных (УЭЦН), штанговых плунжерных (станок-качалка) и цепных насосов (ПЦ), связанные с изменениями наполнения скважины скважинной жидкостью (СКЖ), а также ее состава, что ведет к соответствующему изменению моментов на валу ЭД электроприводов (ЭП) этих исполнительных органов нефтедобычи. Так, на ЭД штанговых насосов моменты даже уравновешенного ЭП (не говоря уже об неуравновешенном) резко изменяются в соответствии с рис.4 и потребляемая мощность может меняться от 0.5 кВт до 4.5 кВт.

Для электроприводов глубинно-насосных станков-качалок и насосов, нагнетающих в пласты воду и реагенты (рис. 2.9) чаще всего применяют асинхронные двигатели с короткозамкнутым ротором и повышенным моментом – серия АОП2, у которых $M_{п}/M_{ном} = 1,8-2$ при кратности пускового тока 5,5–7 и с повышенным скольжением – серия АОС2, у которых кратность пускового тока еще выше (2,6–3,3) при кратности тока 4,5–8,2. Однако, наибольшее применение все же находят ЭД единой серии 4А, которые в диапазоне мощностей 1,1–11 кВт и для мощностей 15; 18,5; 20 и 30 кВт при частоте вращения 1500 об/мин.

Контроль параметров АЭП может производиться, например по схеме, представленной на рис. 1. Здесь в качестве расходомера и анализатора параметров СКЖ, сырой нефти или воды, нагнетаемой в пласт, может использоваться многопараметрический проточный ЯМР-анализатор.

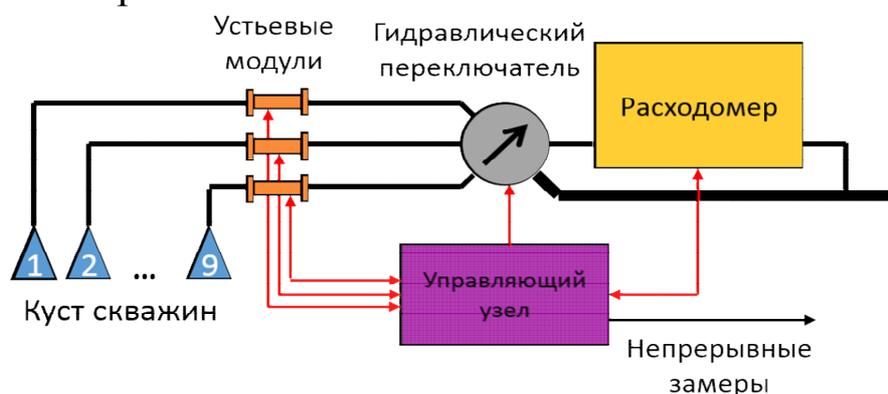


Рисунок 1 – Схема контроля параметров нефтедобычи

СЕКЦИЯ 2. Информационные и управляющие системы
технологическими процессами и системы автоматизации
технологических процессов и производственных комплексов

Создание систем автоматического управления (САУ), автоматизированных ЭП и автоматизированных систем управления технологических комплексов (АСУ ТП) потребовали внедрения регулируемых электроприводов (РЭП). Их использование решает также проблему энергосбережения. Энергоаудит, проведенный на ряде отечественных предприятий показал, что большинство установленных ЭД имеют завышенную мощность, не соответствующую потребностям управляемого механизма, а средняя загрузка ЭД по отношению к установленной мощности, не превышает 0,4–0,6, а коэффициент загрузки составляет 0,3–0,4, то есть КПД электропривода значительно ниже номинального. В то же время в промышленно развитых странах принято считать, что средняя загрузка ЭД должна составлять 0,6–0,7. При столь низких коэффициентах загрузки отечественных ЭП кпд ЭД уменьшается на 2–6 %, а $\cos \varphi$ – на 20–30 %. По Российской Федерации это приводит к потерям 1–1,5 % электроэнергии.

Применение силовых модулей регулируемых ЭП, управляемых полупроводниковых преобразователей, выпрямителей и инверторов, тормозных модулей и устройств, обеспечивает рекуперацию электроэнергии от ЭД в сеть и максимально возможное исключение потерь электроэнергии при использовании тормозных резисторов.

Регулирование скорости АД изменением напряжения и частоты питающего напряжения используется для качественного регулирования, прежде всего скорости АД, и широко используется в последнее время. Принцип – в изменении скорости $\omega_0 = 2\pi f_1/p_1$ путем изменения f_1 . Способ обеспечивает плавное регулирование в широком диапазоне, а получаемые характеристики обладают высокой жесткостью (стабильностью ω_0 в зависимости от момента M). При таком регулировании не увеличивается скольжение S , поэтому потери мощности от этого фактора оказываются минимальными. Механические характеристики при частотном регулировании могут существенно отличаться от естественных. При постоянной амплитуде напряжения статора с уменьшением f_1 пусковой и критический моменты ЭД увеличиваются, а жесткость характеристик повышается, резко увеличивается ток намагничивания и статора. Магнитная система насыщается и резко

СЕКЦИЯ 2. Информационные и управляющие системы
технологическими процессами и системы автоматизации
технологических процессов и производственных комплексов

увеличиваются электрические и магнитные потери. Поэтому для оптимального использования способа необходимо одновременно с частотой менять и напряжение. Рациональный закон изменения напряжения при этом зависит от характера момента нагрузки M_C . При $M_C = \text{const}$ напряжение U_1 должно меняться пропорционально f_1 :

$$U_1/f_1 = \text{const}. \quad (1)$$

Это следует из формулы:

$$U_1 \gg E = 4,44\Phi w_1 f_p k_{об} \quad (2)$$

где w_1 – число витков фазы обмотки статора, $k_{об}$ – коэффициент, учитывающий конструкцию обмотки. С уменьшением f_p при $U_1 = \text{const}$ увеличивается магнитный поток Φ и ток холостого тока I_0 , требуемый для создания магнитного потока. При этом, вследствие насыщения магнитной системы, небольшое увеличение магнитного потока может привести к значительному увеличению тока и нагреву ЭД.

Требования к ЭП определяются диапазоном требуемых скоростей и типом нагрузки. Зависимость между скоростью и моментом сопротивления неодинакова для разных нагрузок. Ряд ЭП требуют пониженной скорости вращения. Например, погружные нефтедобывающие центробежные насосы (УЭЦН), в которых момент нагрузки возрастает с увеличением скорости вращения и чья механическая характеристика описывается параболой, а следовательно потребляемая мощность пропорциональна кубу скорости вращения. Теоретически снижение скорости в центробежных насосах на 10 % дает 30 % экономии потребляемой мощности. От характера нагрузки ПЧ обеспечивает разные режимы управления ЭД, реализуя зависимость между U_1 и f_1 [1-5].

Режим с линейной зависимостью между U и f ($U/f = \text{const}$) реализуется простейшими ПЧ для обеспечения постоянного момента нагрузки и используется для управления СД или двигателями, включенными параллельно. Вместе с тем, при уменьшении частоты, начиная с некоторого значения, максимальный момент ЭД начинает падать. Для его повышения на низких частотах в ПЧ предусмотрено повышение выходного

СЕКЦИЯ 2. Информационные и управляющие системы
технологическими процессами и системы автоматизации
технологических процессов и производственных комплексов

напряжения.

При вентиляторном характере нагрузки соотношение между напряжением и частотой имеет вид:

$$U_1/f_1^2 = \text{const.} \quad (3)$$

При моменте, обратно пропорциональном скорости:

$$U_1/\sqrt{f_1} = \text{const} \quad (4)$$

Таким образом, необходимо использовать полупроводниковый преобразователь частоты (ППЧ), регулирующий и напряжение на статоре. Используются и более сложные законы частотного регулирования, учитывающие, в частности наличие активного сопротивления статора.

Системы управляемого пуска ЭП могут выполнять функции ступенчатого или плавного в ограниченном диапазоне регулирования скорости. Однако они обладают большими потерями электроэнергии. Их использование возможно для кратковременного снижения скорости и исключено при плавном регулировании в большом диапазоне.

Наряду с факторами нестабильности момента сопротивления M_C на валу погружного электродвигателя центробежных насосов УЭЦН вследствие скачкообразного характера изменения давления СКЖ, изменения плотности и вязкости жидкости, изменения газового фактора (газовая пробка), дискретного характера срабатывания противоаварийной защиты, имеют место и неполнофазные режимы работы ЭД в результате аварий в линиях электропередач системы энергоснабжения.

Неполнофазные режимы (НПФР) возникают в случае перегорания плавкой вставки в одной из фаз линии, питающей электродвигатель, или потери электрического контакта в одной из фаз кабельной линии от шин главной понизительной подстанции (ГПП) к потребителям. Все эти НПФР имеют локальный характер и для их избежания используются защиты: в первом случае защита от перегрузок, устанавливаемой в двух фазах, и если ее нет, то специальной защитой от работы двигателя на двух фазах. Во втором случае можно использовать современные виды защит на цифровых реле, где уставка выставляется в процентном отношении

СЕКЦИЯ 2. Информационные и управляющие системы
технологическими процессами и системы автоматизации
технологических процессов и производственных комплексов

разность токов в фазах. Если имеется обрыв фазы, то эта разность составляет 100 %.

Однако, при обрыве фазы в линии электропередачи (ЛЭП) электрической системы, от которой питается система питания электродвигателей (СПЭ), несимметричный режим накладывается на всю СПЭ. При этом разность токов в фазах уже не будет составлять 100 % и какие токи будут в фазах, зависит от группы соединения трансформаторов. Причем необходимо отметить, что НПФР в электрической системе может быть длительным, т.к для электрических систем не является таким аварийным как короткое замыкание (КЗ).

Для исследования последствий НПФР в СПЭ в электрической системе была выбрана типичная схема электроснабжения, представленная на рис. 1, где трансформатор ГПП (Т1) мощностью $16 \text{ МВ} \cdot \text{А}$, напряжением $110/10 \text{ кВ}$ через ЛЭП длиной 50 км с системой (С) напряжением 110 кВ мощность КЗ которая равна $120 \text{ МВ} \cdot \text{А}$. От шин 10 кВ ГПП через трансформатор Т2 мощностью $1 \text{ МВ} \cdot \text{А}$ напряжением $10/0,4 \text{ кВ}$ получают питание три асинхронных двигателя (М1), каждый мощностью 250 кВт , и такой же мощностью семь асинхронных двигателей (М2) питаются через трансформатор Т3. Трансформатор Т1 имеет группу соединения обмоткой Ун/Д-11, трансформатор Т2 – У/Ун-0, а трансформатор Т3 – Д/Ун-11.

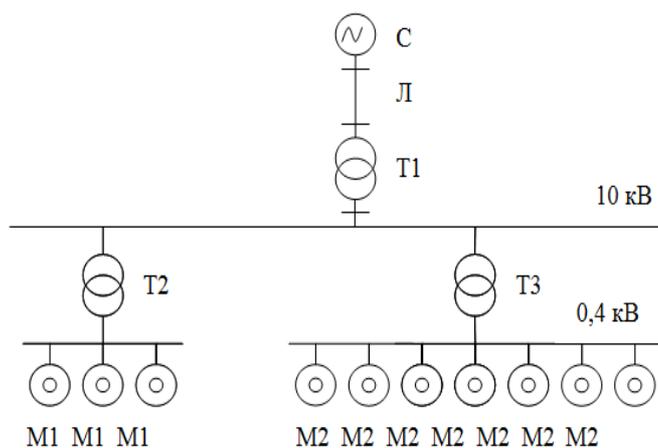


Рисунок 1 – Исследуемая схема энергоснабжения группы ЭД

Принятое допущение: при расчете не учитываются активные сопротивления различных элементов исходной схемы; расчет

СЕКЦИЯ 2. Информационные и управляющие системы
технологическими процессами и системы автоматизации
технологических процессов и производственных комплексов

производится для времени $t = 0$. Последствия НПФР в СПЭ определяются значением дополнительного сопротивления ΔZ_{Ln} в месте обрыва фазы в схеме замещения прямой последовательности. При обрыве одной фазы в линии 110 кВ

$$\Delta Z_{Ln} = \frac{Z_{L2} \cdot Z_{L0}}{Z_{L2} + Z_{L0}} \quad (1)$$

где Z_{L2} , Z_{L0} - эквивалентные сопротивления обратной и нулевой последовательностей СПЭ относительно место обрыва.

Падение напряжения ΔU_L в этом сопротивлении уменьшает напряжение прямой последовательности на нагрузке. Кроме того, такое же значение напряжения возникает в месте обрыва в схемах замещения обратной и нулевой последовательностей и определяет токи и напряжения этих последовательностей в СПЭ [6].

Рассмотрим обрыв фазы "А" в начале ЛЭП. Согласно методу симметричных составляющих падение напряжения в месте обрыва фазы определяются следующим уравнением напряжения:

Для прямой последовательности

$$\Delta U_{L1} = U_C - I_{L1} Z_{L1} \quad (2)$$

для обратной последовательности

$$\Delta U_{L2} = 0 - I_{L2} Z_{L2} \quad (3)$$

для нулевой последовательности

$$\Delta U_{L0} = 0 - I_{L0} Z_{L0} \quad (4)$$

где Z_{L1} , Z_{L2} , Z_{L0} - эквивалентные сопротивления прямой, обратной и нулевой последовательностей СПЭ относительно место обрыва фазы; I_{L1} , I_{L2} , I_{L0} - токи прямой, обратной и нулевой последовательностей, протекающие в поврежденный фазе ЛЭП, так что в ЛЭП:

$$I_{L1} + I_{L2} + I_{L0} = I_{LA} = 0 \quad (5)$$

падение напряжения в месте обрыва

$$\Delta U_{L1} = \Delta U_{L2} = \Delta U_{L0} \quad (6)$$

На основе этих уравнений и с учетом группы соединения трансформаторов были определены токи и напряжения в фазах, которые представлены в табл. 1 и 2, где показаны их значения в линии Л 110 кВ, на стороне высокого напряжения (ВН) 10 кВ и на стороне низкого напряжения (НН) 0,4 кВ трансформаторов Т2 и Т3.

СЕКЦИЯ 2. Информационные и управляющие системы
технологическими процессами и системы автоматизации
технологических процессов и производственных комплексов

Для сравнения в табл. 3 и 4 представлены соотношения токов и напряжений элементов схем электроснабжения и наибольшие токи в фазах, протекающие в неполнофазном режиме.

Анализ полученных результатов показывает, что существующие защиты трансформаторов (максимальная токовая защита - МТЗ) от перегрузки не срабатывают. В тяжелых условиях находятся электродвигатели, величины токов которых в некоторых фазах намного превышают номинальные.

Кроме этого, наблюдается снижение напряжения на шинах 0,4 кВ, что приводит к увеличению скольжения и реактивной мощности асинхронного двигателя, и в зависимости от его загрузки, к нарушению устойчивости.

Результаты расчета подтверждаются практикой. Обрыв одной фазы в линии 110 кВ, от которой осуществляется питание потребителей птицефабрики, привел к повреждению (сгоранию) 70 % всех электродвигателей на 0,4 кВ и к значительному ущербу, который выразился в виде падежа птиц.

Отсюда следует вывод, что необходимо усовершенствовать защиту от таких повреждений и устанавливать защиту от перегрузок не только в одной фазе, но во всех трех, или применять специальную защиту.

Таблица 1. Токи в фазах А, В и С при обрыве.

	Ток фазы А, кА		Ток фазы В, кА		Ток фазы С, кА	
	ВН	НН	ВН	НН	ВН	НН
Линия (Л)	0		0,075		0,075	
Трансформатор (Т ₁)	0	0,477	0,075	0,695	0,075	0,477
Трансформатор (Т ₂)	0,14	3,5	0,204	5,09	0,14	3,5
Трансформатор (Т ₃)	0,335	6,61	0,488	11,1	0,335	11,1

Таблица 2. Напряжение в фазах А, В и С при обрыве.

	Напряжение фазы А, кВ		Напряжение фазы В, кВ		Напряжение фазы С, кВ	
	ВН	НН	ВН	НН	ВН	НН
Линия (Л)	25,3		0		0	
Трансформатор(Т ₁)	25,3	5,5	0	8	0	5,5
Трансформатор(Т ₂)	5,5	0,22	8	0,32	5,5	0,22
Трансформатор(Т ₃)	5,5	0,17	8	0,29	5,5	0,29

СЕКЦИЯ 2. Информационные и управляющие системы
технологическими процессами и системы автоматизации
технологических процессов и производственных комплексов

Таблица 3. Соотношение токов в фазах А, В и С.

	$I_{\text{ф.нр}} / I_{\text{ф.нпф}}$		
	фаза А	фаза В	фаза С
Линия (Л)	∞	1,2	1,2
Трансформатор (Т ₁)	1,94	1,34	1,94
Трансформатор (Т ₂)	0,41	0,28	0,41
Трансформатор (Т ₃)	0,5	0,3	0,3
Двигатель (М1)	0,35	0,25	0,35
Двигатель (М2)	0,4	0,26	0,26

Из таблицы 3 видно, что на ЛЭП МТЗ не срабатывает. Ток НПФР значительно превышает номинальный в большинстве случаев в двигателях, что приводит к выходу их из строя.

Таблица 4. Соотношение напряжений в фазах А, В и С.

	$U_{\text{ф.нр}} / U_{\text{ф.нпф}}$		
	Фаза А	фаза В	фаза С
Линия (Л)	2,51	∞	∞
Трансформатор (Т ₁)	1,05	0,72	1,05
Трансформатор (Т ₂)	1,04	0,72	1,05
Трансформатор (Т ₃)	1,35	0,79	0,79
Двигатель (М1)	1	0,72	1
Двигатель (М2)	1,35	0,79	0,79

где $I_{\text{ф.нр}}$, $I_{\text{ф.нпф}}$ - ток фаз в нормальном и НПФР; $U_{\text{ф.нр}}$, $U_{\text{ф.нпф}}$ - фазное напряжение в нормальном и НПФР. В таблицах 3 и 4 отношение токов и напряжений для трансформаторов были определены со стороны низкого напряжения.

Так как приёмниками в данной работе являются асинхронные двигатели, следует анализировать переходные процессы в АД. Основными характеристиками переходных процессов в АД, представляющими наибольший интерес, являются величины токов и моментов, время протекания, потери энергии в обмотках и их нагрев. При анализе переходных процессов АД обычно рассматриваются: включение обмотки статора при разомкнутой обмотки ротора, пуск с короткозамкнутой обмоткой ротора, процесс разбега, тепловые потери в обмотках АД при пуске, повторное включение, реверсирование, отключение АД [7-11].

СЕКЦИЯ 2. Информационные и управляющие системы
технологическими процессами и системы автоматизации
технологических процессов и производственных комплексов

Из вышесказанного можно сделать следующие выводы:

§ из-за обрыва одной из фаз ЛЭП на вторичной обмотке трансформатора восстанавливается ток во всех фазах;

§ для предотвращения неполнофазных режимов следует использовать математическое моделирование переходных процессов;

§ из-за обрыва фаз двигателя перестают запускаться или начинают забирать необходимый ток из других фаз, в такой ситуации обмотки двигателя подвергаются неравномерным нагрузкам, что может послужить причиной его повреждения;

§ значение токов в фазах потребителей (асинхронных двигателей) значительно превышает ток фазы в нормальном режиме, что приводит к повреждению самих двигателей;

§ защиту от перегрузок необходимо устанавливать в трёх фазах.

Список литературы

1. Кашаев Р.С. «Автоматизированный электропривод и средства контроля в технологических и измерительных комплексах нефтяной промышленности». Учебное пособие. Гриф. УМО. КГЭУ. Казань. 2010 г. 363 с.
2. Кашаев Р.С. Электропривод общепромышленных механизмов. Типовые расчеты. Учебное пособие. Казань: Каз. гос. энерг. у-т, 2008.
3. Кашаев Р.С. «Автоматизированный электропривод типовых производственных механизмов и технологических комплексов». Учебное пособие. ЗАО «Новое знание» Казань. 2005 г. 118 с
4. Кашаев Р.С. «Автоматизированный электропривод типовых производственных механизмов и технологических комплексов». Методические указания к типовым расчетам. КГЭУ. Казань. 2007 г. 61 с.
5. Белов М.П., Новиков Л.Н., Рассудов Л.Н. «Автоматизация электропривода общепромышленных механизмов и технологических комплексов». Учебник. Изд. «Академия» 2004. - 576 с.

СЕКЦИЯ 2. Информационные и управляющие системы
технологическими процессами и системы автоматизации
технологических процессов и производственных комплексов

6. Былкин М.В. Моделирование, анализ и устранение последствий несимметричных режимов в системах электроснабжения. – Москва, 1999.
7. Гольдберг О.Д. Переходные процессы в электрических машинах и аппаратах и вопросы их проектирования. – М.: высшая школа, 2001.
8. Кубанго Б. Исследования влияния неполнофазных режимов в электрической системе на режимные характеристики систем электроснабжения, 2009 (IV Международной Молодежной научной конференции «Тинчуринские Чтения», Том 1);
9. Кубанго Б. Влияние несимметричных режимов на двигательную нагрузку в системе электроснабжения, 28-29 апреля 2010 г. (IV Международной Молодежной научной конференции «Тинчуринские Чтения», Том 1);
10. Кубанго Б. Несимметричные режимы работы двигателей, 2011 (XII Аспирантско-Магистерского Семинара, посвященного дню энергетика и 40-летию образования кгэу, 1-5 декабря 2008г.);
11. Кубанго Б. Режимные характеристики систем электроснабжения при продольной несимметрии в электрической системе, 2010 г. № 2 (5) (ВЕСТНИК КГЭУ)

УДК 621.65:62-83

КОНТРОЛЬ ПАРАМЕТРОВ СЫРОЙ НЕФТИ ПО ДАННЫМ ЯМР-
АНАЛИЗА И УПРАВЛЕНИЕ ПРОЦЕССОМ ОТДЕЛЕНИЯ ВОДЫ
ОТ НЕФТИ И ЕЁ ОЧИСТКОЙ

Р.С.Кашаев, Ч.В.Тунг

*Казанский государственный энергетический университет, г.
Казань*

Рассмотрены вопросы on-line контроля параметров балласта скважинной жидкости системой пробоотбора на базе автоматизированного электропривода (АЭП) и управления отделением воды от нефти по данным анализа проточным ЯМР- анализатором (ЯМРА).

Ключевые слова: on-line контроль, параметры, автоматизированный электропривод, обезвоживание, проточный, анализатор, ядерный магнитный резонанс.

СЕКЦИЯ 2. Информационные и управляющие системы технологическими процессами и системы автоматизации технологических процессов и производственных комплексов

Первоначально нефть добываемыми скважинами извлекают, используя высокое начальное давление в пласте, превышающее давление на забое скважины. Но по мере выработки пласта синхронно с понижением давления падает и дебит скважины. Для сохранения продуктивности скважин и темпов добычи нефти используют метод внутриконтурного заводнения путем закачки в недра воды через нагнетательные скважины.

В последние годы многие отечественные месторождения находятся на последних стадиях разработки и в связи с резким повышением обводненности добываемой скважинной жидкости (СКЖ) актуальна задача разработки экспресс-методов контроля СКЖ на расход по ГОСТ 8.615-2005, концентрацию солей и остаточной нефти в пластовой воде для оптимизации технологических процессов нефтедобычи, а также удаления и очистки балласта СКЖ (пластовой воды) от солей и использования очищенной воды для заводнения нефтеносных пластов. Существующие методы контроля и анализа не обладают достаточной представительностью пробоотбора, не дают полной информации, осуществляются комплектов разных анализаторов и не обладают достаточной оперативностью.

Такими возможностями обладает метод импульсного ядерного магнитного резонанса (ЯМР), в частности метод ЯМР-релаксометрии (ЯМРР), являющийся неконтактным, неразрушающим и позволяющим проводить экспресс-анализ без подготовки пробы и в автоматизированном режиме. Перечисленные аспекты определяют актуальность и важность поставленных и решаемых в работе задач.

Целью работ является разработка автоматической системы проточного пробоотбора на базе АЭП и аппаратуры контроля сточных вод нефтедобычи и нефтеподготовки путем реализации ЯМР методик экспресс-контроля:

- концентрации воды в эмульсии при отделении пластовой воды от СКЖ;
- концентрации солей и остаточной нефти в пластовой и очищенной воде;

СЕКЦИЯ 2. Информационные и управляющие системы технологическими процессами и системы автоматизации технологических процессов и производственных комплексов

- расхода воды при закачке воды в пласт через нагнетательные скважины.

Разработка методик экспресс-контроля одним измерительным комплексом на базе метода ЯМР обеспечит аппаратную поддержку оптимизации технологических процессов добычи, подготовки нефти, повышения нефтеотдачи пластов.

Для работы информационных систем нефтедобычи уровня АСУП (автоматизированная система управления предприятием) необходимо постоянно или периодически, но часто передавать данные о добыче, закачке воды в пласт, энергопотреблении и т.д. Однако зачастую эти данные вносятся вручную или загружаются в базы данных 1-4 раза в сутки.

Нами предложена система автоматического пробоотбора, функционирующая от АЭП и представленная на рис.1. Здесь: 1 – емкость с растворителем; 2, 14 – воздушные обратные клапаны; 3, 4, 7, 10 – электромагнитные клапаны; 5 – ЯМР - анализатор; 6 – счетчик воды с импульсным выходом; 8, 11,12,15 – вентили; 9 – насос; 13 – расширитель; 16 – емкость с отходами.

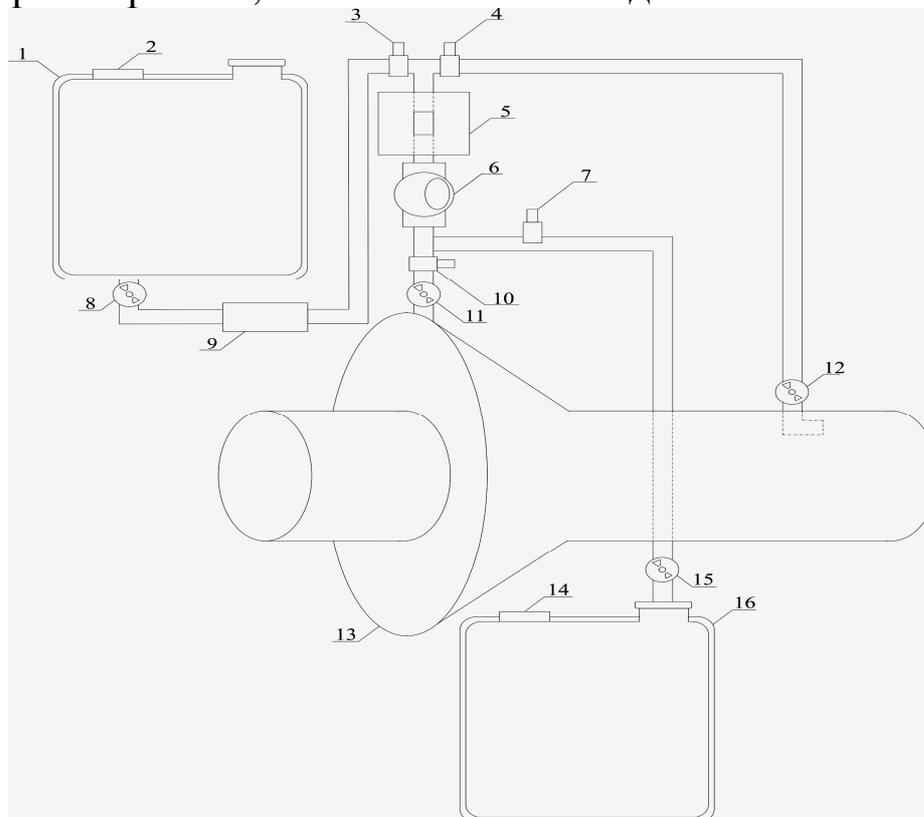


Рисунок1 – Общий вид автоматизированной установки контроля концентрации нефти в воде

СЕКЦИЯ 2. Информационные и управляющие системы
технологическими процессами и системы автоматизации
технологических процессов и производственных комплексов

Поток жидкости проходя через основной трубопровод попадает в расширитель 13, в котором поток жидкости снижает скорость и увеличивает давление. В результате происходит интенсивная турбулизация смеси, т.е. жидкость интенсивно перемешивается до однородной смеси создаваемыми вихревыми потоками и попадает в трубу с анализатором. При этом электромагнитные клапана 4 и 11 находятся в открытом положении. Далее жидкость проходит через счетчик воды с импульсным выходом 6, где идет отсчет необходимого нам количества жидкости. Электромагнитные клапаны 3 и 7 находятся в закрытом положении для исключения возможности попадания жидкости в ёмкости 1 и 16. После прохождения смеси через счетчик воды 6, примеси нефти осаждаются на фильтре, расположенном в трубе под ЯМР – анализатором 5, и далее жидкость попадает по замкнутому контуру обратно в основной трубопровод. Как только импульсный счетчик воды 6 отсчитает X литров – количество воды, задаваемое оператором, клапана 4 и 10 закрываются. ЯМР – анализатор 5 начинает анализ примесей нефти, осажденных на фильтре. По окончании анализа процесс повторяется с самого начала, если допустимое значение загрязненности фильтра не превышает норму. В случае превышения предела загрязненности фильтра поступает сигнал от ЯМР – анализатора 5, дающий команду на очистку фильтра анализатора. При этом открываются соленоидные клапаны 3 и 7, включается насос 9 и начинается процесс перекачки растворителя из емкости 1 в емкость 16. Обратные клапаны 2 и 14 необходимы соответственно для всасывания и выпуска воздуха. С помощью вентиля 8, 11, 12, 15 можно регулировать пропускную способность трубопровода, либо перекрыть его для технических работ.

Для управления автоматизированной установкой контроля концентрации примесей нефти в воде, используется отладочный набор и система проектирования 57X500 для AVR флэш-контроллеров фирмы Atmel, который поставляется с микроконтроллером ATMEGA8515L на панели с маркировкой SCKT3000D3.

СЕКЦИЯ 2. Информационные и управляющие системы
технологическими процессами и системы автоматизации
технологических процессов и производственных комплексов

Еще одной целью работы является разработка системы автоматического управления процессом отделения пластовой воды от СКЖ и контроля ее очистки с использованием управляющих сигналов от проточного анализатора ядерного магнитного резонанса (ЯМРА).

На технологические процессы, связанные с повышением нефтеотдачи оказывают влияние: скачкообразный характер изменения давления СКЖ, изменения плотности и вязкости жидкости, изменение газового фактора (газовая пробка), дискретный характер срабатывания противоаварийной защиты. Поэтому системы автоматического управления отделения пластовой воды от сырой нефти, ее очистки от солей и остаточной нефти включают решение следующих основных задач:

- определение параметров сырой нефти (концентраций воды, пластовых солей и остаточной нефти);
- регулирование параметров водоотделения от сырой нефти в установках обезвоживания с поддержанием ее параметров на заданном уровне;
- определение параметров процесса (расхода закачиваемой в пласт воды);
- сигнализацию (оповещение, предупреждение) об отклонениях значений параметров и процесса в целом за допустимые пределы;
- блокировку (запрещение) включения оборудования;
- защиту оборудования в аварийных ситуациях (выключение, перевод на безопасный режим).

На рис.2. представлена схема куста нагнетательных скважин.

СЕКЦИЯ 2. Информационные и управляющие системы технологическими процессами и системы автоматизации технологических процессов и производственных комплексов

Блок устьевой телеметрии БУТ2
Поддержка RS-485 или токовый сигнал 4-20 мА

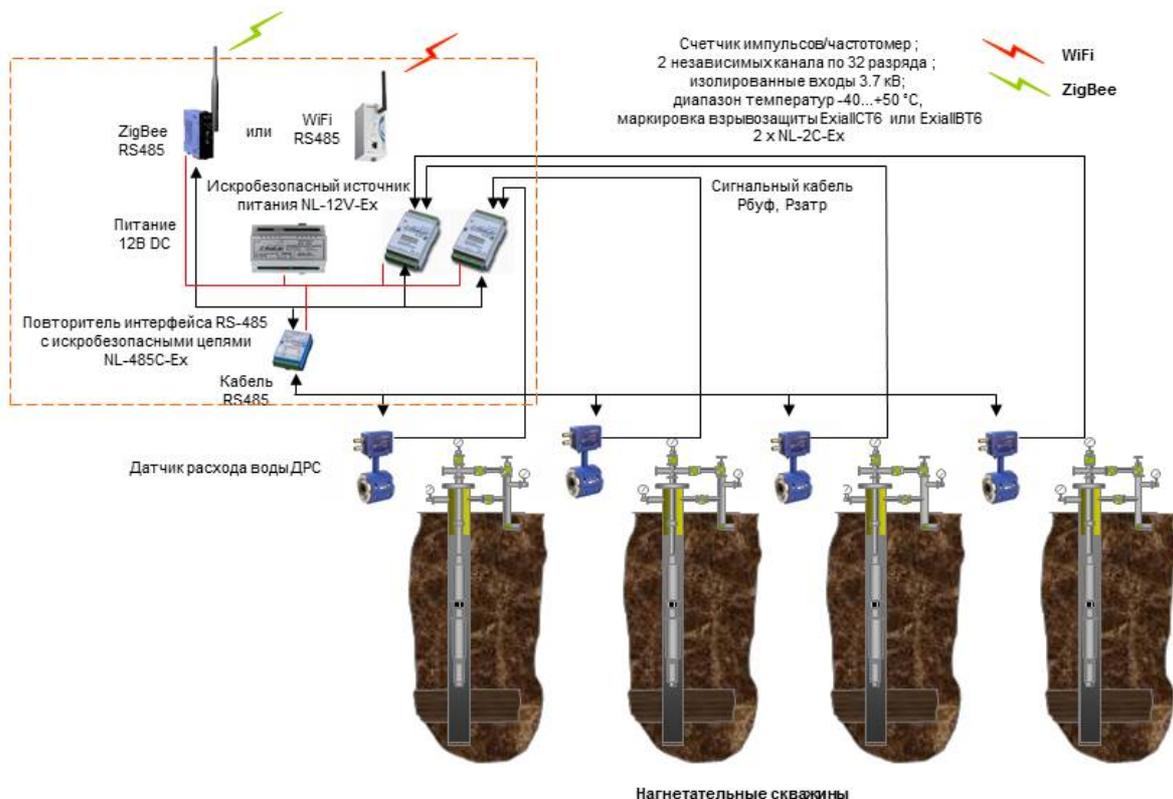


Рисунок 2 – Схема куста нагнетательных скважин

Основным видом разработки месторождения является режим разработки с поддержанием пластового давления. Для этого в пласт закачивают воду, водные растворы полимеров, щелочные растворы, эмульсии. При этом реагент выполняет две основные функции: поддержания пластового давления и улучшение процесса вытеснения нефти из пласта в добывающие скважины. Закачиваемый реагент поступает в пласт через нагнетательные скважины. Жидкость из пласта в эксплуатационную скважину поступает под действием перепада давления между пластом и забоем скважины.

Схема водоснабжения для заводнения пластов состоит из водозаборных сооружений для забора воды из источников и подачи ее насосами в водопроводную сеть или на водоочистную установку.

С водоочистной установки вода подается в сеть, кустовые насосные станции для подачи воды и закачки ее в нагнетательные

СЕКЦИЯ 2. Информационные и управляющие системы
технологическими процессами и системы автоматизации
технологических процессов и производственных комплексов

скважины.

Для закачки воды в нефтяные пласты применяют блочно-кустовые насосные станции БКНС., которые поднимают давление до давления нагнетания в пласт и направляют ее к водораспределительным гребенкам и далее к нагнетательным скважинам. На КНС применяются центробежные насосы типа ЦНС с номинальной подачей $180 \text{ м}^3 / \text{ч}$ воды и напором от 900 до 1900 м. Технологическая схема нефтедобычи, например, НГДУ «Альметьевнефть», представлена на рис. 3.

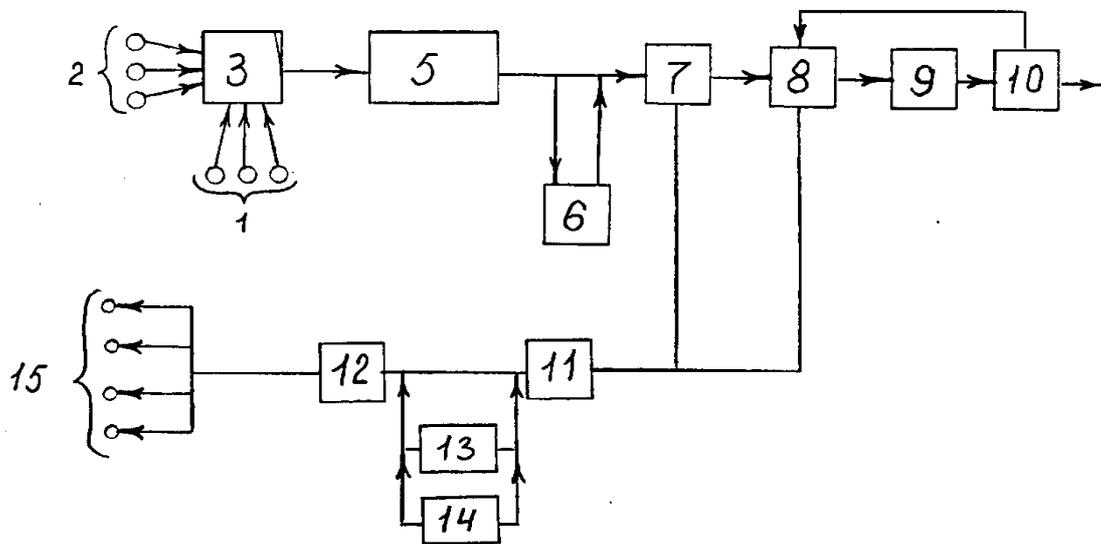


Рисунок 3 – Технологическая схема нефтедобычи НГДУ
«Альметьевнефть».

В соответствии со схемой скважинная жидкость (СКЖ) в виде газонефтяной смеси с примесью воды с добывающих скважин 1,2 поступает по трубопроводу на автоматизированную групповую замерную установку (ГЗУ) 3, где каждая скважина автоматически по программе подключается к измерительному устройству. После измерения дебитов жидкости и газа газожидкостная смесь от ГЗУ поступает в сепарационную установку 5, где происходит частичное отделение газа от жидкости (первая ступень сепарации). Продукция обводненных скважин по трубопроводам после измерения транспортируются в цех комплексной подготовки и перекачки нефти (ЦКППН). В случае низких буферных давлений эксплуатационных скважин для транспортировки нефти по системе нефтепромыслового сбора

СЕКЦИЯ 2. Информационные и управляющие системы
технологическими процессами и системы автоматизации
технологических процессов и производственных комплексов

применяют дожимные насосные станции (ДНС) 6. В случае большого содержания воды (более 30 %) в транспортируемой жидкости применяются сепарационные установки с предварительным сбросом воды 7, 8.

Отделившаяся на обезвоживающих установках пластовая вода поступает на установки очистки пластовых вод, где она очищается для использования ее в системе поддержания пластового давления. С установок очистки вода попадает на автоматизированные КНС 10, откуда она поступает для закачки в нагнетательные скважины 15. На КНС подается также вода с водозаборных 13 и очистных 14 сооружений. После установки 8 водонефтяная смесь поступает в сепарационную установку 9, предназначенную для извлечения из нефти углеводородных фракций. На установке 10 осуществляется учет товарной нефти по объему и массе и откачка ее на головные сооружения магистрального нефтепровода. Если обводненность нефти, поступившей на установку 10, превышает допустимые нормы, нефть автоматически возвращается на повторную обработку в электрообезвоживающую очистную установку ЭЛОУ 12.

В системе поддержания пластового давления к наиболее важному и конструктивно сложному звену относятся КНС, которая состоит из блоков: буферного, насосов, управления АЭП, распределительной гребенки, распределительных устройств. Буферный блок состоит из двух горизонтальных емкостей 1 по 50 м³ для отстаивания воды и удаление механических примесей. Насосные блоки закачивают воду в нагнетательные скважины. Для автоматического управления, защиты и контроля параметров КНС применяется система «Пласт-1М» (рис. 2). На рисунке: 1, 14 – блоки управления; 2, 15 – блоки защиты; 3, 16 – панели КИП; 4, 17 – блоки исполнительных реле; 5, 20 – аппаратура давления; 6, 21 – манометры; 7, 19 – щиты сигнализации; 8, 9, 28 – насосы откачивающие; 11, 25 – электродвигатели на нагнетание; 12, 26 – датчики по месту; 13 – устройство формирования сигналов ТУ и ТС; 18 – блок контроля температуры; 22 – шкаф теристорного возбуждения; 23, 24 – маслонасосы; 27 – пусковое устройство; 28 – насосный агрегат; 29 – аппаратура щита автоматизации насосного агрегата; 30 – аппаратура щита местного контроля и управления

СЕКЦИЯ 2. Информационные и управляющие системы
технологическими процессами и системы автоматизации
технологических процессов и производственных комплексов

насосным агрегатом; 31 – силовое оборудование; 32 – оборудование насосов. Система выполнена по блочно-функциональному принципу и включает следующую аппаратуру: щиты автоматизации КНС, автоматизации насосного агрегата, контроля и управления вспомогательного оборудования станции, а также комплект датчиков, необходимых для нормальной работы технологического оборудования КНС.

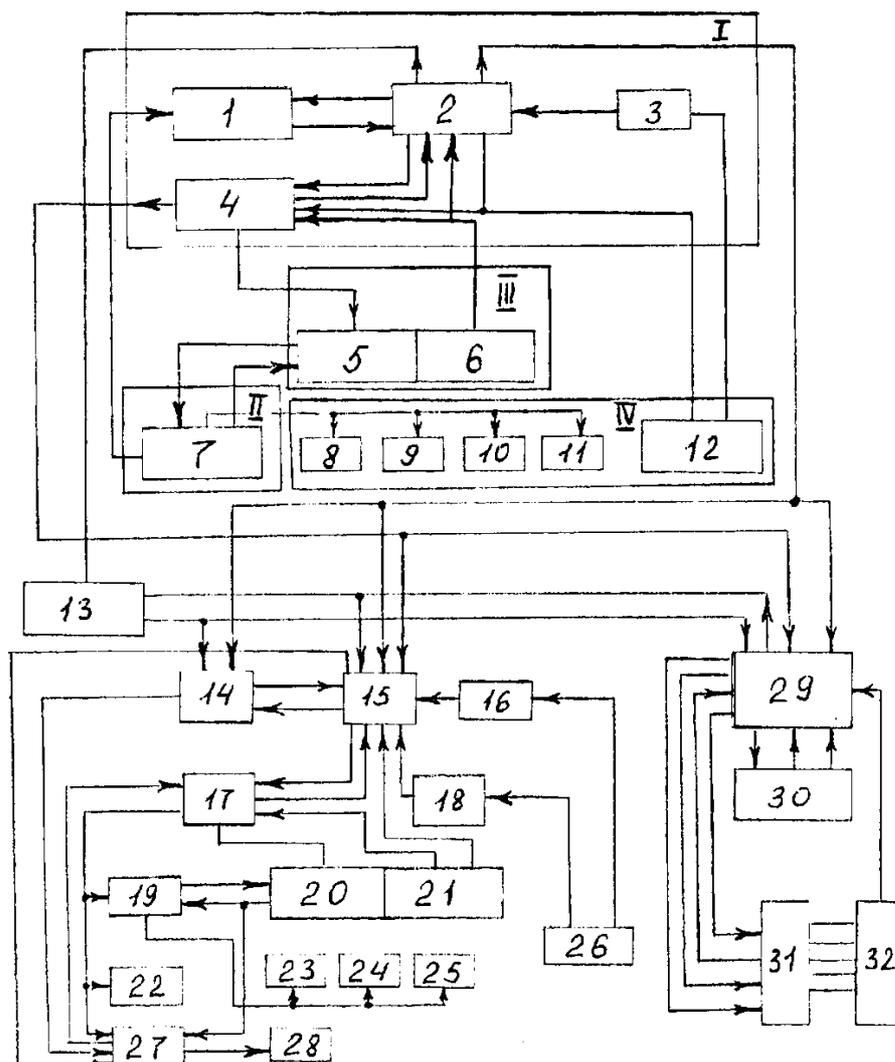


Рисунок 4 – Функциональная схема системы «Пласт-1М»

АЭП обеспечивает существенную часть роста нефтедобычи, повышения КПД насосных установок. Другим фактором, значительно улучшившим показатели, стало широкое применение микропроцессорных (МП) средств управления, защиты и регулирования. МП-контроллер осуществляет формирование

СЕКЦИЯ 2. Информационные и управляющие системы
технологическими процессами и системы автоматизации
технологических процессов и производственных комплексов

режимов работы АЭП с помощью сигналов ШИМ- управления транзисторами автономных инверторов напряжения (АИН), защиты и аварийного отключения АЭП, приема и передачи внешних управляющих, задающих и информационных сигналов.

Специально для нефтедобывающей отрасли фирма Триол производит: СУС ТРИОЛ-01 – станции управления станком качалкой добычи нефти от 5.5 до 37 кВт. СУ ЭЦН ТРИОЛ – станция управления центробежным насосом добычи нефти от 22 до 250 кВт, комплектуется мягким пускателем, что обеспечивает снижение энергозатрат на 50 %, двухкратное снижение суммарных эксплуатационных затрат, имеется устройство управления ЭП задвижки как при наличии сети 380 В, 50 Гц, так и при ее отсутствии. Управление от УМКА-01 – МП-контроллера для нефтедобычи.

Нами также ведутся работы по применению МП-контроллеров для контроля параметров СКЖ, управления процессом отделения воды от нефти, её очисткой с целью использования для внутриконтурного заводнения.

УДК 622.002.5

МОДЕРНИЗАЦИЯ РЕМОНТНОЙ БАЗЫ РАЗРЕЗА
«КРАСНОГОРСКИЙ»

В. А. Корнеев¹, И. А. Злыгостев², Е. В. Корнеева¹

¹ФГБОУ ВО «Сибирский государственный индустриальный университет», г. Новокузнецк

²ОАО «Угольная компания «Южный Кузбасс», г. Междуреченск

Статья посвящена модернизации ремонтной базы разреза «Красногорский». В статье приведены индукционные нагреватели различных фирм-производителей с их достоинствами и недостатками. Произведен выбор оптимального индукционного нагревателя.

Ключевые слова: подшипники, монтаж, нагрев, метод, достоинства, недостатки.

СЕКЦИЯ 2. Информационные и управляющие системы
технологическими процессами и системы автоматизации
технологических процессов и производственных комплексов

При постоянном увеличении объемов добычи полезных ископаемых остро встает проблема проведения непродолжительных и высококачественных ремонтов горной техники, которые невозможно осуществлять без высокотехнологичного ремонтного оборудования.

Горная техника содержит большое количество подшипников. Для того чтобы полностью использовать возможности подшипников необходимо не только правильно подобрать нужные их типы и выбрать сопряженные с ними детали, но и уделить особое внимание хранению, монтажу и демонтажу, смазке и процессу их эксплуатации. Стоит отметить, что около 16 % поломок подшипников вызваны неправильным монтажом и отсутствием необходимого контрольно-измерительного и монтажного инструмента.

В зависимости от типа и размеров подшипников используют различные методы монтажа. Эти методы могут быть механическими, гидравлическими и термическими.

Монтаж подшипников с большим натягом и крупногабаритных подшипников производят путем нагрева подшипника или только одного кольца, устанавливаемого по посадке с натягом, если подшипник разборный. Необходимое расширение подшипника достигается при нагревании до температуры 80 – 100 °С.

Для нагрева подшипников используются в основном масляные ванны и индукционные нагреватели, значительно реже используют нагревательные плиты и термостаты с горячим воздухом.

Подшипники с защитными шайбами и уплотнениями не допускается нагревать в масляных ваннах. Их рекомендуется нагревать другими вышеназванными методами до температуры не более 80 °С.

На данный момент для монтажа подшипников в условиях разреза «Красногорский» ОАО «Угольная компания «Южный Кузбасс» используется метод нагрева в масляной ванне.

Для равномерного нагрева подшипники обычно погружают в масляную ванну (рис. 1) с чистым минеральным маслом, обладающим высокой температурой вспышки, нагретым до

СЕКЦИЯ 2. Информационные и управляющие системы
технологическими процессами и системы автоматизации
технологических процессов и производственных комплексов

температуры 80 – 90 °С и выдерживают в течение 10 – 30 мин в зависимости от размера подшипника. Подшипник укладывают на решетку или подвешивают на державке, что обеспечивает его равномерный нагрев.

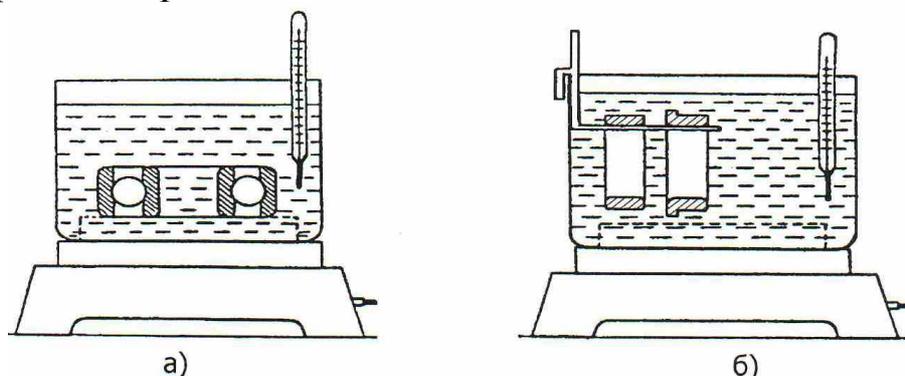


Рисунок 1 – Нагрев в ванне на вложенной решетке (а) и на державке (б)

Данный метод нагрева обладает рядом серьезных недостатков:

- подшипники с защитными шайбами и уплотнениями в масляных ваннах нагревать не допускается;
- процесс нагрева протекает медленно;
- раскаленное масло представляет опасность для человека и наносит вред окружающей среде.

Учитывая недостатки присущие методу нагрева подшипников в масляной ванне, модернизация технологии монтажа подшипников на горное оборудование в условиях разреза «Красногорский» ОАО «Угольная компания «Южный Кузбасс» приобретает особую актуальность.

Метод индукционного нагрева признан в мировой передовой практике наиболее оптимальным способом при монтаже подшипников на цилиндрические валы, а также для нагрева других деталей, таких как шестерни, втулки и корпуса подшипников. По сравнению с традиционными методами нагрева он является гораздо более экологичным и безопасным для персонала.

Индукционный нагрев проводящих тел основан на поглощении ими электромагнитной энергии, возникновении наведенных вихревых токов, нагревающих тело по закону Джоуля-Ленца.

СЕКЦИЯ 2. Информационные и управляющие системы
технологическими процессами и системы автоматизации
технологических процессов и производственных комплексов

Индукционный нагреватель для подшипников по принципу действия можно сравнить с электрическим трансформатором, имеющим первичную обмотку с большим числом витков и вторичную короткозамкнутую обмотку, в роли которой выступает подшипник или нагреваемая металлическая деталь с отверстием, через которое проходит магнитопровод трансформатора. Переменный ток большой силы, протекающий во вторичной обмотке – в кольцах подшипника – вызывает их равномерный нагрев до требуемой температуры. Первичная обмотка и магнитопровод трансформатора при этом не нагреваются. Принцип действия индукционного нагревателя показан на рис. 2.

Таким образом, индукционный нагрев является прямым нагревом сопротивления, а включение нагреваемого тела в цепь тока производится за счет магнитной связи.

Основные преимущества индукционного нагрева:

- максимальная производительность (нагрев происходит практически мгновенно, без необходимости предварительного нагрева и охлаждения (например, в некоторых случаях более 1000 °С менее чем за секунду));
- энергетическая эффективность (до 90 % потребленной энергии превращается в полезную теплоту);
- контроль и автоматизация процесса (индукционный метод позволяет достигать равномерного регулируемого нагрева детали по заданному алгоритму);
- высокое качество монтажа подшипника (при индукционном нагреве обрабатываемая деталь никогда не вступает в прямой контакт с пламенем или с другим нагревающим элементом; теплота возникает прямо внутри детали под действием переменного тока, в результате, деформации, искажения и брак подшипника сводится к минимуму);
- экологичность процесса (в процессе индукционного нагрева отсутствуют вредные выбросы а так же снижается влияние опасных производственных факторов на персонал).

СЕКЦИЯ 2. Информационные и управляющие системы
технологическими процессами и системы автоматизации
технологических процессов и производственных комплексов

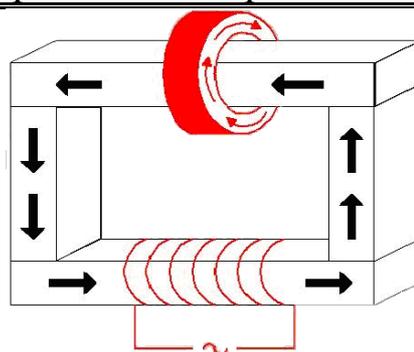


Рисунок 2 – Принцип действия индукционного нагревателя

На данный момент на российском рынке представлены несколько компаний производящих установки индукционного нагрева, такие как: «BALTECH», «TM Russia», «Проминдуктор».

Параметры однотипных индукционных нагревателей приведены в табл. 1.

Таблица 1 – Сводная таблица параметров однотипных индукционных нагревателей разных производителей

Компания	«BALTECH»	«Проминдуктор»	«TM Russia»
Модель	BALTECH HI-1650	RGZC-6	Easytherm 30
Номинальная мощность, кВт	10	11	12,8
Напряжение, В	380	380	380
Частота, Гц	50	50	50
Сердечник	поворотный	поворотный	поворотный
Мах вес подшипника, кг	210	250	300
d, мм (min внутренний диаметр)	45	30	30
D, мм (max наружный диаметр)	720	1000	740
Установка температуры, °C	0-400	0-400	0-400
Автоматическое размагничивание	есть	нет	есть
Габаритные размеры, мм	470x440x330	950x960x980	880x320x570
Масса нагревателя, кг	50	120	125
Цена тыс. руб	209	180	420

В процессе модернизации ремонтной базы разреза «Красногорский» ОАО «Угольная компания «Южный Кузбасс» для монтажа подшипников на горное оборудование будут введены в эксплуатацию индукционные нагреватели VALTECH HI-1650. Использование данных нагревателей позволит осуществить снижение затрат связанных с ремонтом горного оборудования.

УДК 62-83:681.5

СИНТЕЗ КОМБИНИРОВАННОЙ ОПТИМАЛЬНОЙ СИСТЕМЫ УПРАВЛЕНИЯ ДЛЯ АСИНХРОННЫХ ЭЛЕКТРОПРИВОДОВ ЭКСКАВАТОРОВ

Н.С. Курочкин

*Хакасский технический институт – филиал ФГАОУ ВО
"Сибирский федеральный университет" г. Абакан*

В статье рассмотрены системы с КОСУ. Целесообразно строить системы комбинированного оптимального управления, учитывающие как положительные свойства систем подчиненного регулирования, так и систем с АКОР.

Ключевые слова: автоматизированный электропривод; комбинированная оптимальная система управления; аналитически конструируемый оптимальный регулятор.

Для приближения системы «ПЧ–АД» по быстрдействию к системе «Transvector» выполним последовательную коррекцию потокосцепления статора по оси «х». При этом математическое описание объекта управления уменьшается на один порядок [1].

Рассмотрим двухконтурную систему подчиненного регулирования внутренних координат. Структурная схема внутреннего контура тока статора по оси «х» приведена на рис. 1.

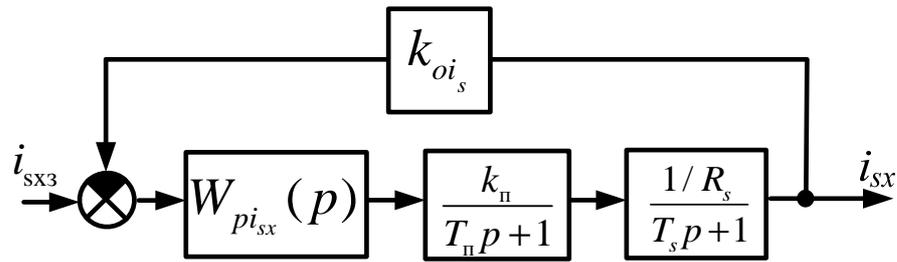


Рисунок 1 - Структурная схема контура тока статора

По методике расчета систем на «технический оптимум», приравнявая желаемую и реальную передаточные функции разомкнутого контура тока статора по оси «х», определим передаточную функцию регулятора тока статора $W_{pi_{sx}}(p)$

Передаточная функция разомкнутого контура тока:

$$W_{раз.i_{sx}}(p) = W_{pi_{sx}}(p) \frac{k_{\pi}}{T_{\pi}p + 1} \frac{1/R_s}{T_s p + 1} k_{oi_s}, \quad (1)$$

где R_s - активное сопротивление обмоток статора,

Желаемая передаточная функция разомкнутого контура тока

$$W_{раз.i_{sx}}^{жс}(p) = \frac{1}{2T_m p (T_m p + 1)}, \quad (2)$$

где $T_m = T_{\pi}$ некомпенсируемые постоянные времени

$$W_{pi_{sx}}(p) = \frac{T_s p + 1}{T_{\pi} p}, \quad \text{где } T_{\pi} = 2T_m k_{\pi} \frac{k_{oi_s}}{R_s}$$

Полученный регулятор пропорционально-интегральный.

Передаточная функция замкнутого контура тока статора

$$W_{zi_s}(p) = \frac{1/k_{oi_s}}{2T_m p + 1} \quad (3)$$

Передаточная функция разомкнутого контура потокосцепления

$$W_{раз.\Psi_{sx}}(p) = W_{p.\Psi_{sx}}(p) \frac{1/k_{oi_s}}{2T_m p + 1} \frac{L_m}{T_R p + 1} k_{oy}, \quad (4)$$

где L_m – взаимная индуктивность между статором и ротором.

Желаемая передаточная функция разомкнутого контура потокосцепления

$$W_{раз. \Psi_{sx}}^{жс}(p) = \frac{1}{4T_m p \cdot (2T_m p + 1)}. \quad (5)$$

Приравниваем желаемую и реальную передаточные функции разомкнутого контура потокосцепления

$$\frac{1}{4T_m p \cdot (2T_m p + 1)} = W_{р. \Psi}(p) \frac{1/k_{oi_s}}{2T_m p + 1} \frac{L_m}{T_R p + 1} k_{oy}. \quad (6)$$

Находим передаточную функцию регулятора потокосцепления

$$W_{р. \Psi}(p) = \frac{T_R p + 1}{T_{и2} p}, \text{ где } T_{и2} = 4T_m L_m \frac{k_{oy}}{k_{oi_s}}$$

Полученный регулятор пропорционально-интегральный.

Передаточная функция замкнутого контура потокосцепления

$$W_{з. \Psi}(p) = \frac{1/k_{oy}}{4T_m p + 1}. \quad (7)$$

Пренебрегаем некомпенсируемыми постоянными времени в двухконтурной системе подчинённого регулирования тока и потокосцепления статора в канале «х» [2].

Остальные уравнения систем описывают внешние координаты электромеханической системы, которые необходимо скорректировать методом АКОР. Для этого из математического описания [3]:

$$\left\{ \begin{array}{l} \frac{d\Psi_{Rx}}{dt} = -\frac{1}{T_R} \Psi_{Rx} + r_R \cdot k_R \cdot i_{sx} \\ \frac{di_{Sy}}{dt} = -\frac{1}{T_s} i_{Sy} - \frac{k_R}{x'_s} \cdot \omega_1 \\ \frac{d\omega_1}{dt} = \frac{m \cdot p_n \cdot k_R}{2J_1} \Psi_{Rx} i_{Sy} - \frac{1}{J_1} M_y \\ \frac{dM_y}{dt} = c_{12} (\omega_1 - \omega_2) + \beta_{в.т} (\omega_1 - \omega_2) \\ \frac{d\omega_2}{dt} = \frac{1}{J_2} M_y \end{array} \right. \quad (8)$$

СЕКЦИЯ 2. Информационные и управляющие системы
технологическими процессами и системы автоматизации
технологических процессов и производственных комплексов

Исключаем первое уравнение уже скорректированной координаты, а во второе уравнение добавляем слагаемое $\frac{1}{x'_s} u_y^*$.

Получаем математическую модель уже скорректированной двухмассовой электромеханической системы в относительных единицах:

$$\begin{cases} \frac{di_{sy}^*}{dt} = -\frac{1}{T_s} i_{sy}^* - \frac{k_R \omega_{\delta}}{x'_s I_{\delta}} \omega_1^* + \frac{u_{\delta}}{x'_s I_{\delta}} u_y^* \\ \frac{d\omega_1^*}{dt} = \frac{3 p_{\Pi} k_R \cdot I_{\delta}}{2 J_1 \cdot \omega_{\delta} \cdot k_{\omega y_x}} i_{sy}^* - \frac{3 p_{\Pi} k_R \cdot M_{\delta}}{2 J_1 \cdot \omega_{\delta}} M_y^* \\ \frac{dM_y^*}{dt} = \beta_{\text{в.т}} \frac{3 p_{\Pi} k_R \cdot I_{\delta}}{2 J_1 \cdot \omega_{\delta} \cdot k_{\omega y_x}} i_{sy}^* + \frac{c_{12} \omega_{\delta}}{M_{\delta}} \omega_1^* - \beta_{\text{в.т}} \frac{J_1 + J_2}{J_1 J_2} M_y^* - \frac{c_{12} \omega_{\delta}}{M_{\delta}} \omega_2^* \\ \frac{d\omega_2^*}{dt} = \frac{3 p_{\Pi} k_R \cdot M_{\delta}}{2 J_2 \cdot \omega_{\delta}} M_y^* \end{cases} \quad (9)$$

Введем обозначения:

$$a_{11} = \frac{1}{T_s}, a_{12} = \frac{k_R \omega_{\delta}}{x'_s I_{\delta}}, b_k = \frac{u_{\delta}}{x'_s I_{\delta}}, a_{21} = \frac{3 p_{\Pi} k_R \cdot I_{\delta}}{2 J_1 \cdot \omega_{\delta} \cdot k_{\omega y_x}}, a_{23} = \frac{3 p_{\Pi} k_R \cdot M_{\delta}}{2 J_1 \cdot \omega_{\delta}}, a_{32} = a_{34} = \frac{c_{12} \omega_{\delta}}{M_{\delta}},$$

$$a_{31} = b_{\text{в.т}} \frac{3 p_{\Pi} k_R \cdot I_{\delta}}{2 J_1 \cdot \omega_{\delta} \cdot k_{\omega y_x}}, a_{33} = b_{\text{в.т}} \frac{J_1 + J_2}{J_1 J_2}, a_{43} = \frac{3 p_{\Pi} k_R \cdot M_{\delta}}{2 J_2 \cdot \omega_{\delta}}.$$

Тогда в относительных единицах ЭМС описывается системой уравнений:

$$\begin{cases} \dot{x}_1 = -a_{11} x_1 - a_{12} x_2 + b u \\ \dot{x}_2 = a_{21} x_1 - a_{23} x_3 \\ \dot{x}_3 = a_{31} x_1 - a_{32} x_2 - a_{33} x_3 - a_{34} x_4 \\ \dot{x}_4 = a_{43} x_3 \end{cases}, \quad (10)$$

где a_{ij} – коэффициенты, выраженные в реальном масштабе времени, в отличие от рассмотренных ранее; x_1, x_2, x_3, x_4 – соответственно ток якорной цепи, скорость двигателя, упругий момент и скорость второй массы в относительных единицах; u – управляющее воздействие.

Аналогичным образом получаем математическое описание одномассовой электромеханической системы в относительных единицах

$$\begin{cases} \dot{\mathbf{x}}_1 = -a_{11}x_1 - a_{21}^0x_2 + bu_y, \\ \dot{\mathbf{x}}_2 = a_{21}x_1 \end{cases}, \quad (11)$$

где $a_{21}^0 = \frac{3p_{\Pi} k_R \cdot M_{\bar{\sigma}}}{2J_{\Sigma} \cdot \omega_{\bar{\sigma}}}$.

Для того чтобы увеличить быстродействие и снизить динамические нагрузки привода, необходимо осуществить регулирование по дополнительным координатам. Обычно в наличии есть информация только по электрическим координатам и можно получить дополнительно сигналы по производным электрических координат. Если есть информация и по механическим координатам, то можно получить дополнительно сигналы по производным всех координат.

Рассмотрим введение дополнительных координат: производных скорости первой массы и упругого момента. Представим систему уравнений (10) в векторно-матричной форме:

$$\dot{\mathbf{x}} = \mathbf{A}\mathbf{x} + \mathbf{B}u, \quad (12)$$

где $\mathbf{x} = \begin{bmatrix} x_1 \\ x_2 \\ x_3 \\ x_4 \end{bmatrix}$, $\mathbf{A} = \begin{bmatrix} -a_{11} & -a_{12} & 0 & 0 \\ a_{21} & 0 & -a_{23} & 0 \\ a_{31} & -a_{32} & -a_{33} & -a_{34} \\ 0 & 0 & a_{43} & 0 \end{bmatrix}$, $\mathbf{B} = \begin{bmatrix} b \\ 0 \\ 0 \\ 0 \end{bmatrix}$.

Введем обозначения $x_6 = \dot{\mathbf{x}}_2$ и $x_7 = \dot{\mathbf{x}}_3$. Возьмем производные от введенных координат

$$\begin{cases} \dot{\mathbf{x}}_6 = [a_{21} \ 0 \ -a_{23} \ 0] \dot{\mathbf{x}} \\ \dot{\mathbf{x}}_7 = [a_{31} \ -a_{32} \ -a_{33} \ -a_{34}] \dot{\mathbf{x}} \end{cases} \quad (13)$$

Подставив в систему (13) значения x_j из системы (10), получим:

$$\begin{cases} \dot{\mathbf{x}}_6 = a_{21} \sum_{j=1}^4 (a_{1,j}x_j) + 0 \sum_{j=1}^4 (a_{4,j}x_j) + 0x_6 + (-a_{23})x_7 + a_{21}bu \\ \dot{\mathbf{x}}_7 = a_{31} \sum_{j=1}^4 (a_{1,j}x_j) + (-a_{34}) \sum_{j=1}^4 (a_{4,j}x_j) + (-a_{32})x_6 + (-a_{33})x_7 + a_{31}bu \end{cases} \quad (14)$$

Данное выражение можно записать в следующем виде:

$$\begin{cases} \dot{\mathbf{x}}_6 = [a_{21}\mathbf{a}^1 + 0 \cdot \mathbf{a}^4] \mathbf{x} + 0 \cdot x_6 + (-a_{23})x_7 + a_{21}bu \\ \dot{\mathbf{x}}_7 = [a_{31}\mathbf{a}^1 + (-a_{34})\mathbf{a}^4] \mathbf{x} + (-a_{32})x_6 + (-a_{33})x_7 + a_{31}bu \end{cases}, \quad (15)$$

СЕКЦИЯ 2. Информационные и управляющие системы
технологическими процессами и системы автоматизации
технологических процессов и производственных комплексов

где \mathbf{a}^1 и \mathbf{a}^4 – 1 и 4 строки матрицы \mathbf{A} из системы (15), $[a_{21}\mathbf{a}^1 + 0 \cdot \mathbf{a}^4]$ и $[a_{31}\mathbf{a}^1 + (-a_{34})\mathbf{a}^4]$ – матрицы размерностью 1×4 .

Введем следующие обозначения:

$$\begin{bmatrix} a_{61} & a_{62} & a_{63} & a_{64} & a_{66} & a_{67} \\ a_{71} & a_{72} & a_{73} & a_{74} & a_{76} & a_{77} \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} [a_{21}\mathbf{a}^1 + 0 \cdot \mathbf{a}^4] & 0 & -a_{23} \\ [a_{31}\mathbf{a}^1 + (-a_{34})\mathbf{a}^4] & -a_{32} & -a_{33} \end{bmatrix}. \quad (16)$$

Таким образом, математическое описание объекта регулирования с введением дополнительно производных по скорости первой массы и упругому моменту примет вид:

$$\dot{\mathbf{x}}_{o,p} = \mathbf{A}_{o,p} \mathbf{x}_{o,p} + \mathbf{B}_{o,p} u, \quad (17)$$

где

$$\mathbf{x}_{o,p} = \begin{bmatrix} x_1 \\ x_2 \\ x_3 \\ x_4 \\ x_6 \\ x_7 \end{bmatrix}, \mathbf{A}_{o,p} = \begin{bmatrix} -a_{11} & -a_{12} & 0 & 0 & 0 & 0 \\ a_{21} & 0 & -a_{23} & 0 & 0 & 0 \\ a_{31} & -a_{32} & -a_{33} & -a_{34} & 0 & 0 \\ 0 & 0 & a_{43} & 0 & 0 & 0 \\ a_{61} & a_{62} & a_{63} & a_{64} & a_{66} & a_{67} \\ a_{71} & a_{72} & a_{73} & a_{74} & a_{76} & a_{77} \end{bmatrix}, \mathbf{B}_{o,p} = [b \ 0 \ 0 \ 0 \ a_{21}b \ a_{31}b]^T.$$

Далее представлена методика нахождения математического описания объекта регулирования с введением дополнительных координат для любой электромеханической системы, математическое описание которой представлено в регулярной форме (17)

$$\dot{\mathbf{x}} = \mathbf{A}\mathbf{x} + \mathbf{B}u, \quad (18)$$

$$\text{где } \mathbf{x} = \begin{bmatrix} x_1 \\ x_2 \\ \mathbf{K} \\ x_n \end{bmatrix}, \mathbf{A} = \begin{bmatrix} a_{11} & a_{12} & \mathbf{K} & a_{1n} \\ a_{21} & a_{22} & \mathbf{K} & a_{2n} \\ \mathbf{K} & \mathbf{K} & \mathbf{K} & \mathbf{K} \\ a_{41} & a_{42} & \mathbf{K} & a_{4n} \end{bmatrix}, \mathbf{B} = \begin{bmatrix} b \\ 0 \\ \mathbf{K} \\ 0 \end{bmatrix}.$$

Введем матрицу \mathbf{C} размерностью $n \times n$, коэффициенты которой получены следующим образом. Коэффициенты главной диагонали c_{jj} равны 1, если вводится производная по координате x_j , остальные коэффициенты матрицы \mathbf{C} равны 0.

Найдем преобразованные матрицы \mathbf{A}_n , \mathbf{B}_n и \mathbf{x}_n

$$\mathbf{A}_n = \begin{bmatrix} \mathbf{A} & \mathbf{0} \\ [\mathbf{C}\mathbf{A} - \mathbf{C}\mathbf{A}\mathbf{C}^T] \mathbf{A} & \mathbf{C}\mathbf{A}\mathbf{C}^T \end{bmatrix}, \mathbf{B}_n = \begin{bmatrix} \mathbf{B} \\ [\mathbf{C}\mathbf{A} - \mathbf{C}\mathbf{A}\mathbf{C}^T] \mathbf{B} \end{bmatrix}, \mathbf{x}_n = \begin{bmatrix} \mathbf{x} \\ \mathbf{C}\mathbf{x} \end{bmatrix}, \quad (19)$$

СЕКЦИЯ 2. Информационные и управляющие системы
технологическими процессами и системы автоматизации
технологических процессов и производственных комплексов

где $\mathbf{0}$ – нулевая матрица размерностью $n \times n$, $[\mathbf{CA} - \mathbf{CASC}^T]$ – матрица размерностью $n \times n$.

При принятых обозначениях вектор координат объекта регулирования $\mathbf{x}_{o,p}$ может быть получен из \mathbf{x}_n удалением строк с нулевыми значениями.

Математическое описание объекта регулирования с введением дополнительных координат в виде производных по некоторым из основных координат примет вид:

$$\dot{\mathbf{x}}_{o,p} = \mathbf{A}_{o,p} \mathbf{x}_{o,p} + \mathbf{B}_{o,p} u, \quad (20)$$

где $\mathbf{x}_{o,p}$ – вектор координат объекта регулирования, $\mathbf{A}_{o,p}$ – матрица, полученная из \mathbf{A}_n удалением строк и столбцов, имеющих те же номера, что были удалены при получении $\mathbf{x}_{o,p}$ из \mathbf{x}_n , $\mathbf{B}_{o,p}$ – матрица, матрица, полученная из \mathbf{B}_n удалением тех же строк, что и при получении $\mathbf{x}_{o,p}$.

Не следует забывать, что вводить в математическое описание производные для дальнейшего расчета коэффициентов оптимальных обратных связей можно только по тем координатам, в уравнениях которых отсутствует управляющее воздействие u , иначе математическое описание (20) будет неверным, а полученная замкнутая система неустойчивой.

Рассмотренные системы отличаются от классических комбинированных систем управления, сочетающих системы управления по отклонению и возмущению [4]. В общем виде структура аналитически конструируемого оптимального регулятора определяется транспонированной моделью объекта регулирования. В комбинированных оптимальных системах управления в частном случае решен вопрос определения весовых коэффициентов критериев оптимальности, а в общем случае задача нахождения весовых коэффициентов не решена. За счет применения КОСУ удалось значительно уменьшить максимальное значение бросков упругого момента (M_y) и при этом уменьшить время переходного процесса ($t_{\text{пер}}$).

Список литературы

1. Кочетков, В.П. Основы теории управления, Ростов н/Д: Феникс, 2012. – 411 с.

2. Кочетков, В.П., Курочкин Н.С. Динамика автоматизированного электропривода с комбинированной оптимальной системой управления. – Журнал «Вестник СибГАУ» Том 17 №2, Красноярск, 2016. – С. 393-402.

3. Герман-Галкин, С. Г. Matlab & Simulink. Проектирование мехатронных систем на ПК [текст]. - СПб. КОРОНА - Век, 2008. - 368 с.

4. Ключев, В.И. Ограничение динамических нагрузок электропривода, В.И. Ключев. – М.: Энергия, 1973. – 320 с.

УДК 681.51

ОЦЕНИВАНИЕ ПОДОБИЯ СИСТЕМ УПРАВЛЕНИЯ

**Г. В. Макаров, К. А. Ивушкин, В. Ф. Евтушенко,
Л. П. Мышляев**

*Сибирский государственный индустриальный университет,
г. Новокузнецк*

Рассмотрены два способа оценивания подобия систем управления, основанные на непосредственном использовании показателей эффективности функционирования систем управления и соотношений, описывающих условия подобия. Отмечены особенности их практического применения.

Ключевые слова: подобие систем управления, моделирование, натурно-математическое моделирование, физико-математическое моделирование.

Оценивание подобия систем управления является важной задачей, например, в процессе их исследования и настройки, особенно если они осуществляются с использованием натуральных, физических или комбинированных (натурно-математических и/или физико-математических) моделей. Подобие этих систем обеспечивает обоснованный перенос результатов исследований и настройки с модельных систем на натурные.

Ниже, в кратком изложении, приведено описание способов оценивания подобия систем управления. Логической основой для разработки и исследования методов, процедур и алгоритмов подобия систем управления, в том числе и его оценивания,

СЕКЦИЯ 2. Информационные и управляющие системы
технологическими процессами и системы автоматизации
технологических процессов и производственных комплексов

являются *утверждения* подобия, сформулированные в [1,2]. На их основе разработаны [3-5] следующие способы оценивания систем управления

1) способ, в основу которого положено непосредственное использование *утверждения 1. Системы управления подобны, если их функционирование характеризуется точным или приближенным равенством значений целевых показателей (критериев) эффективности управления.*

Условия подобия систем управления, удовлетворяющие утверждению 1, можно записать в виде

$$|Q_j\{(t-T),t\} - Q_l\{(t-T),t\}| \leq dQ_{jl}^*; \quad j \neq l; j = \overline{1,L}; l = \overline{1,L}, \quad (1)$$

где Q_j и Q_l – значения целевых показателей эффективности функционирования на заданном интервале времени T , соответственно, j -ой и l -ой систем управления; dQ_{jl}^* – величина, определяемая предельно допустимый (заданный) порог близости показателей Q_j и Q_l , при котором эффективность этих систем управления считается одинаковой; L – число систем управления. Соотношение в виде неравенства (1) может быть реализовано с использованием модельных, натурных, физических, либо комбинированных (натурно-математических или физико-математических) данных;

2) способ, основанный на использовании соотношений, описывающих условия подобия, т.е. условия, выполнение которых справедливо для подобных систем. Эти условия могут быть получены либо аналитическими методами (постановка задачи, схема решения, условия эффективного применения приведены в [3]), либо с использованием методов численного моделирования и поисковой оптимизации (постановка задачи, схема решения, условия эффективного применения приведены в [4, 5]).

В [3] рассмотрен пример применения аналитического метода получения условий подобия двух систем автоматического регулирования по отклонению в виде следующего соотношения

$$\left| \sqrt{s_{npj}^2 (1 - e^{-2a_{npj} t_{uj}})} - \sqrt{s_{npl}^2 (1 - e^{-2a_{npj} t_{ul}})} \right| \leq dQ^*, \quad (2)$$

СЕКЦИЯ 2. Информационные и управляющие системы
технологическими процессами и системы автоматизации
технологических процессов и производственных комплексов

где s_{npj}^{H2} – нормированные значения дисперсии приведенного возмущения; α_{np} – коэффициент его автокорреляционной функции; T_u – время чистого запаздывания канала преобразования регулирующих воздействий, индексы « j » и « l » означают номер системы.

Область эффективного применения неравенства (2) ограничивается следующими основными условиями.

1. Математическая модель канала преобразования регулирующих воздействий, представленная в операторной форме с помощью последовательно соединенных инерционного звена первого порядка и звена чистого запаздывания

$$j(s) = \frac{k_u}{T_u s + 1} \cdot e^{-t_u s}, \quad (3)$$

где k_u – коэффициент передачи объекта, T_u – время инерции,

2. Приведенные к выходу объекта возмущения – стационарный динамический процесс, с автокорреляционной функцией

$$r_{np}(q) = S_{np}^2 \cdot e^{-a \cdot |q|}, \quad (4)$$

где θ – время сдвига между сечениями ряда приведенных возмущений.

3. Оптимальный по среднеквадратичному критерию регулятор имеет передаточную функцию следующего вида [6]

$$W(s) = \frac{e^{-at_u}}{1 - e^{-at_u} e^{-at_u}} \cdot \frac{1}{k_u} (T_u + 1). \quad (5)$$

4. Критерий точности регулирования – среднеквадратичный.

Для проведения численных исследований систем автоматического управления и регулирования важной задачей является моделирование внешних и внутренних воздействий. В задаче оценивания подобия САР по отклонению требуется воспроизводить с достаточной точностью приведенные к выходу объекта возмущения. Для этого разработан многовариантный генератор воздействий [7] в составе моделирующего имитационного комплекса [8].

СЕКЦИЯ 2. Информационные и управляющие системы
технологическими процессами и системы автоматизации
технологических процессов и производственных комплексов

В случае математического моделирования процесс осуществляется на всем интервале моделирования, при этом результатом является реализация значений приведенных возмущений заданного объема N . В качестве входного воздействия используется выборка нормально распределенного белого шума, которому придаются динамические за счет авторегрессионной модели и полученная реализация масштабируется к заданной дисперсии или среднеквадратическому ожиданию. Моделирование осуществляется с помощью генератора в виде замкнутой динамической системы [9] по следующему выражению

$$W(i) = \sum_{j=1}^k (a_j \cdot W(i-j)) + e(i), \quad i \in [1; N_M], \quad (6)$$

где $W(i)$ – моделируемая реализация, k – порядок авторегрессии, $e(i)$ – белый шум, a_j – коэффициенты авторегрессии, i – дискретное время, j – переменная, N_M – интервал моделирования.

В случае натурно-математического или физико-математического моделирования в качестве входных данных используются оценки действующих возмущений, полученные, соответственно, в системе управления натурным объектом или его физической моделью. Принцип формирования при этом остается прежним при работе в ретроспективном варианте, на уже имеющейся выборке. При этом целесообразно генерировать временной ряд данных не заново, от «белого шума», а «в приращениях» к имеющимся фактическим значениям АКФ. Предложенная модель формирования временного ряда данных (7) генератора в виде замкнутой динамической системы позволяет изменять «в приращениях» влияние значений ряда в прошедший момент времени ($i-j$).

Таким образом заданная «память ряда» формируется на основе уже имеющейся фактической памяти натурального или физического сигнала возмущения «в приращениях»

$$\begin{aligned} W_o^{\Phi M}(i) &= W^{\Phi}(i) + dW^M(i), \\ dW^M(i) &= \sum_{j=1}^k (a_j \cdot W_o^{\Phi M}(i-j)), \end{aligned} \quad (7)$$

СЕКЦИЯ 2. Информационные и управляющие системы
технологическими процессами и системы автоматизации
технологических процессов и производственных комплексов

где $W_o^{\Phi M}(i)$ – получаемая физико-математическая реализация возмущения, $W^{\Phi}(i)$ – исходная реализация возмущения с физической модели, a_j – коэффициенты авторегрессии, i – дискретное время, j – переменная.

Важным этапом при этом является предварительная обработка исходных данных, включающая, по необходимости, оценивание текущих значений переменных, проверка достоверности, восстановление и др.

Следующей задачей является применение данного генератора в темпе с процессом в режиме оперативного натурно-математического или физико-математического моделирования. Для этого процедуры оценивания характеристик и генерирования приводятся к рекуррентной форме. Высокую точность такого моделирования (например, в интервале $\pm 5\%$) позволяет обеспечить форма генератора в виде замкнутой динамической системы, настройками параметров которой можно управлять, добиваясь достаточно малого времени реагирования на изменяющиеся условия и, соответственно, на изменение характеристик физических или натуральных воздействий.

Примером условий подобия двух систем автоматического регулирования, полученных с использованием численного моделирования и поисковых методов оптимизации, является система следующих соотношений [4]

$$\left\{ \begin{array}{l} \left| \frac{t_{uj}}{T_{uj}} - \frac{t_{ul}}{T_{ul}} \right| \leq dQ^* ; \\ \left| s_{npj}^H - s_{npl}^H \right| \leq dQ^* ; \\ \left| a_{npj} \cdot t_{uj} - a_{npl} \cdot t_{ul} \right| \leq dQ^* \\ k_{IIj} = k_{III} \cdot \frac{k_j t_j T_l}{k_l t_l T_j} \cdot e^{\frac{1}{b} (a_j t_j - a_l t_l)} ; \\ k_{Iij} = k_{III} \cdot \frac{k_l t_l}{k_j t_j} \cdot e^{\frac{1}{b} (a_j t_j - a_l t_l)} , \end{array} \right. \quad (8)$$

СЕКЦИЯ 2. Информационные и управляющие системы
технологическими процессами и системы автоматизации
технологических процессов и производственных комплексов

где β – настраиваемый коэффициент; индексы «II» и «I» означают принадлежность коэффициента k пропорциональной и интегральной части закона регулирования.

Область эффективного применения соотношений (8) описывается теми же основными условиями, что и для случая неравенства (2), за исключением того, что вместо оптимального по среднеквадратичному критерию закона регулирования (5), использовали в исследуемых системах регулирования типовой пропорционально-интегральный закон.

Первый способ оценивания подобия систем управления, базирующийся на непосредственном использовании целевых показателей эффективности функционирования систем управления с помощью соотношения (1), является более универсальным с точки зрения его практического применения. Он может быть применен практически для оценивания подобия любых систем управления, имеющих разные структуры и функционирующих в различных условиях, если значения целевых показателей на конечном интервале времени оценивать с непосредственным привлечением натуральных, модельных или натурно-модельных данных. Однако для получения адекватных результатов оценивания здесь необходимо располагать значительным числом массивов с большим объемом достоверных данных, что требует значительных вычислительных и временных затрат. Кроме того, получение достоверных натуральных данных в действующих системах управления связано со значительными трудностями и не всегда может быть реализовано.

Второй способ, основанный на использовании специальных соотношений, характеризующих условия подобия систем управления, требует существенно меньших вычислительных и временных затрат и с этой точки зрения является более предпочтительным. Однако он, также как и аналитические методы, существенно ограничен в практическом применении. Такого рода соотношения получены лишь для сравнительно узкого класса систем регулирования, что требует дальнейшего расширения исследований в этом направлении.

Список литературы

1. Мышляев Л.П. Подобие систем в задачах управления / Л.П. Мышляев, В.Ф. Евтушенко, К.А. Ивушкин, Г.В. Макаров, Д.Г. Березин // Вестник Сибирского государственного индустриального университета, 2012, №2, С. 41-43.

2. Мышляев Л.П. О подобии натурной и модельной систем при управлении с физической прогнозирующей моделью / Л.П. Мышляев, В.Ф. Евтушенко, К.А. Ивушкин, Г.В. Макаров // Известия высших учебных заведений. Черная металлургия, 2013, №12, С. 40-42.

3. Развитие теории подобия для систем управления. В.Ф. Евтушенко, Л.П. Мышляев, С.Н. Старовацкая, Г.В. Макаров и др. Отчет о НИР. № Госрегистрации 01201260312. Этап 2. СибГИУ. – Новокузнецк. –2013.

4. Макаров Г.В. Настройка систем регулирования типовых агрегатов обогатительных фабрик с использованием методов подобия / Макаров Г.В., Линков А.А., Демченко Д.Г., Зайцев А.В. // Системы автоматизации в образовании, науке и производстве : тр. X Всерос. науч.-практ. конф., под ред. д.т.н. проф. С.М. Кулакова, д.т.н. проф. Л.П. Мышляева; СибГИУ. - Новокузнецк, 2015. - С. 212-215.

5. Макаров Г.В. Исследование подобия систем автоматического регулирования с типовыми моделями объектов / Г.В. Макаров, В.Ф. Евтушенко, Н.Л. Лысенко // Системы автоматизации в образовании, науке и производстве : тр. X Всерос. науч.-практ. конф., под ред. д.т.н. проф. С.М. Кулакова, д.т.н. проф. Л.П. Мышляева ; СибГИУ. - Новокузнецк, 2015. - С. 498-501.

6. Ротач В.Я. Расчет динамики промышленных автоматических систем регулирования. / В.Я. Ротач. – М.: Энергия, 1973. – 439 с.

7. Многовариантные генераторы сигналов с заданными свойствами / Макаров Г.В., Буркова Е.В. // Труды Всероссийской

СЕКЦИЯ 2. Информационные и управляющие системы
технологическими процессами и системы автоматизации
технологических процессов и производственных комплексов

научной конференции студентов, аспирантов и молодых ученых «Наука и молодежь: проблемы, поиски, решения». Технические науки. Часть 4., г. Новокузнецк, СибГИУ, 2016г. – с. 61-65.

8. Макаров Г.В. Имитационный комбинированный комплекс для задач исследования систем управления / Макаров Г.В., Буркова Е.В., Лесников А.В. // Перспективы развития информационных технологий: Труды Всероссийской молодежной научно-практической конференции, г. Кемерово, 29-30 мая 2014 г. – Кемерово, 2014. с. 245-246

9. Л.П. Мышляев. Генератор модельных воздействий с заданными свойствами как замкнутая динамическая система / Л.П. Мышляев, В.Ф. Евтушенко, Г.В. Макаров, Е.В. Буркова. // Информационно-телекоммуникационные системы и технологии» (ИТСиТ-2014): Материалы Всероссийской научно-практической конференции, г. Кемерово, 16-17 октября 2014 г.; Кузбас. гос. техн. ун-т им. Т.Ф. Горбачева. – Кемерово, 2014. с.402-403

УДК 621.332.019.3: 629.4

ВЫЯВЛЕНИЕ ПАРАМЕТРОВ ДИАГНОСТИРОВАНИЯ
ТЯГОВОГО ЭЛЕКТРОПРИВОДА ТРОЛЛЕЙБУСА

Б. В. Малозёмов, Е. Г. Порсев

*Федеральное государственное бюджетное образовательное
учреждение высшего образования Новосибирский
государственный технический университет, Новосибирск*

В работе представлен анализ статистических данных отказа подсистем и элементов тягового электропривода троллейбуса Сибирского региона

Ключевые слова: диагностирование, электропривод, транспортные средства.

В настоящее время на троллейбусах (марок ЗиУ, АКСМ, ВМЗ, Тролза) в зависимости от типа подвижного состава применяют тяговые электродвигатели постоянного тока [1] с последовательным и смешанным возбуждением (типов Тр-9, Тр-14, Тр-15, ДАК-317, ДАК-217).

СЕКЦИЯ 2. Информационные и управляющие системы
технологическими процессами и системы автоматизации
технологических процессов и производственных комплексов

В результате анализа режимов работы тягового электродвигателя (ТЭД) выяснено, что в процессе работы происходит изменение эксплуатационных технических параметров ряда его элементов [2], что в конечном итоге приводит к следующим наиболее значимым отрицательным последствиям:

- потере работоспособности тягового электродвигателя;
- возникновению на корпусе двигателя напряжения, опасного для пассажиров и персонала;
- увеличенному износу отдельных элементов тягового электродвигателя;
- повышенным вибрациям с отрицательным воздействием на комфортабельность поездки и безотказность работы других элементов троллейбуса, повреждаемых вибрацией кузова и креплений.

В троллейбусах, где применяется ТЭД со смешанным возбуждением, вследствие частичного межвиткового замыкания параллельных обмоток, снижается эффективность электродинамического торможения. Это вынуждает водителя применять механический тормоз при дотормаживании с высоких скоростей, интенсифицируя тем самым износ деталей тормозных механизмов. Таким образом, техническое состояние ТЭД влияет на безотказность других технических элементов, комфортабельность, электробезопасность, экономические показатели и качество обслуживания пассажиров.

В процессе исследования была собрана статистическая информация об отказах элементов электродвигателей троллейбусов Сибирского региона [1], которая позволила создать классификацию диагностических параметров ТЭД, наиболее существенно влияющих на надежность и безотказность работы электропривода троллейбуса.

Выводы:

1. В ходе экспериментальных исследований износа узлов тяговых электродвигателей разных типов было установлено, что допустимый износ коллекторных пластин по глубине не должен превышать $0.3 \div 0.35$ мм. В противном случае тяговый электродвигатель должен подлежать внеплановому или

СЕКЦИЯ 2. Информационные и управляющие системы
технологическими процессами и системы автоматизации
технологических процессов и производственных комплексов

капитальному ремонту.

2. Основной из причин ухудшения коммутации ТЭД и повышенного темпа износа токосъемных элементов является отклонение нажатия электрощетки от нормируемого правилами технической эксплуатации [2].

Литература

1. Малозёмов Б.В. Апостериорный анализ надежности транспортных систем / Малозёмов Б.В., Бабаева О.В., Андреев А.И. // Научные проблемы транспорта Сибири и Дальнего Востока. 2014. № 1-2. С. 93-95.

2. Диагностика состояния тяговых электродвигателей электрического транспорта / М. Е. Вильбергер, Ю.А. Рылов, М. В. Калугин, Б. В. Малозёмов // Транспорт. Наука, техника, управление. – 2011. – № 12. – С. 13–15.

УДК 621.314.25

О НОВОМ ПОДХОДЕ К ДИАГНОСТИРОВАНИЮ ТРАНСПОРТНЫХ СРЕДСТВ

Б.В. Малозёмов

*Федеральное государственное бюджетное образовательное
учреждение высшего образования Новосибирский
государственный технический университет, Новосибирск*

В работе рассмотрен новый подход к диагностированию электродвигателей транспортных средств, обеспечивающий повышение надежности транспортных систем на основе определенной совокупности диагностических параметров

Ключевые слова: диагностирование, электродвигатели, транспортные средства.

Необходимый уровень надежности электрооборудования транспортных средств может поддерживаться только при условии систематического контроля, диагностирования его технического

СЕКЦИЯ 2. Информационные и управляющие системы
технологическими процессами и системы автоматизации
технологических процессов и производственных комплексов

состояния и своевременного проведения регламентных работ, предотвращающих снижение надежности [1].

Используя теорему умножения вероятностей, согласно которой вероятность произведения независимых событий равна произведению вероятностей этих событий, можно определить вероятность сложного события. Далее, исходя из теоремы умножения вероятностей определяется точка в используемой системе координат. Каждая такая точка соответствует акту диагностирования и, соответственно, чем больше производится актов диагностирования, тем больше точек будет располагаться на координатной плоскости. Такой метод применим как для диагностических стендов, так и для бортовой диагностики, с помощью которой можно проводить диагностирование непрерывно в режиме реального времени и получать, тем самым, кривые изменения технического ресурса оборудования.

Реализацию данного метода определения надежности по предварительно определенным диагностическим параметрам следует считать новым оригинальным алгоритмом к диагностированию транспортных средств и электротехнического оборудования. В качестве диагностических параметров были выбраны три параметра: сопротивление изоляции двигателя; ток якоря тягового электродвигателя, потребляемый во время пуска; величина биения якоря.

Как показали исследования надежности тяговых электродвигателей парка троллейбусного депо № 2 Кировского района г. Новосибирска [1] с помощью предложенных диагностических параметров, кривые, полученные этим методом, проходят выше стохастических вероятностных кривых, давая, таким образом, завышенную оценку надежности. Это объясняется тем, что вероятностный стохастический метод учитывает влияние случайных факторов изменения надежности оборудования в условиях эксплуатации.

Используя предложенный метод исследования надежности электротехнического оборудования троллейбуса с помощью диагностических признаков, появляется возможность оценивать качество диагностического процесса, сравнивая полученные диагностические кривые со стохастическими. Один из приемов

СЕКЦИЯ 2. Информационные и управляющие системы
технологическими процессами и системы автоматизации
технологических процессов и производственных комплексов

повышения точности метода тем выше, чем больше диагностических признаков используется при диагностировании оборудования и чем точнее будут параметры диагностических признаков.

Выводы:

Таким образом, представленный алгоритм диагностирования, позволяет повысить надежность на 15-20%, а также выработать рекомендации для совершенствования технологической карты регламентных работ по техническому обслуживанию.

Литература.

1. Малозёмов Б. В. Диагностика и анализ вибрации электрических машин / Б. В. Малозёмов // Научные проблемы транспорта Сибири и Дальнего Востока: Научный журнал. – Новосибирск: Изд-во НГAVT, 2010. №2 – С. 326-329.

УДК 681.5.017

МОДЕЛЬ ОБЪЕКТА С РАСПРЕДЕЛЕННЫМИ ПАРАМЕТРАМИ*

**Л. П. Мышляев¹, И. А. Леонтьев², М. В. Раскин¹, А. С.
Саламатин¹**

¹*Сибирский государственный индустриальный университет
г. Новокузнецк*

²*ЗАО «Стройсервис», г. Кемерово*

Предложена математическая модель распределенного объекта на примере процесса сушки горячей поверхностью угольных концентратов. В модели выделяются управляющие воздействия координатного и параметрического типов с учетом их взаимовлияния.

Ключевые слова: объект с распределенными параметрами, сушка горячей поверхностью, математическая модель, координатные и параметрические управляющие воздействия.

В настоящее время большинство технологических комплексов представляют собой объекты с распределенными параметрами,

* Работа поддержана грантом РФФИ по проекту №15-07-02231

значения которых различны в разных точках объекта. Это приводит к существенным проблемам управления такими комплексами и сложностям создания систем автоматизации.

Наиболее эффективным способом управления объектами с распределенными параметрами является использование координатно-параметрического управления, суть которого заключается в разделении управляющих воздействий на координатные и параметрические [1].

С учетом этих особенностей построена математическая модель сушки горячей поверхностью угольных концентратов [2]. Координатным управлением является электропитание нагревательных элементов, параметрическими управлениями – нагрузка на конвейер и скорость конвейера.

Структура модели имеет следующий вид:

$$W_K(t) = W_K^H(t) - dW_K(t); \quad (1)$$

$$T(t, q, v) \cdot \frac{d[dW_K(t)]}{dt} + dW_K(t) = \sum_{l=1}^h k_l(t, q, v, u_l) \cdot u_l(t - t_l); \quad (2)$$

$$T(t, q, v) = T^*(t) - a_q[q_t(t) - q^*(t)] - a_v[v(t) - v^*(t)]; \quad (3)$$

$$k_l(t, q, v, u_l) = k_l^* - b_q \left[\frac{1}{t_l} \int_{t-t_l}^t q(q - t_l) dq - q^*(t) \right] - b_v \left[\frac{1}{t_l} \int_{t-t_l}^t v(q - t_l) dq - v^*(t) \right] - b_u \left[\sum_{l=1}^n \frac{C_l(t)}{dt_l} \int_{t-dt_l}^t u_l(q - dt_l) dq - u^*(t) \right]; \quad (4)$$

$$C_l(t) = \frac{d}{dt} \int_{t-t_l}^t u_{l-1}(q - t_{l-1}) dq, \quad (5)$$

где $W_K(t)$, $W_K^H(t)$ – влажность концентрата на выходе и входе объекта в t -ый момент времени; $dW_K(t)$ – уменьшение влажности концентрата; T – постоянная времени; q, v, u_l – нагрузка на конвейер, скорость конвейера и электропитание нагревательных элементов l ; k_l – коэффициент передачи нагревательных элементов l ; t_l – запаздывание нагревательных элементов l ; a_q, a_v – настроечные коэффициенты; T^*, q^*, v^* – опорные значения;

СЕКЦИЯ 2. Информационные и управляющие системы
технологическими процессами и системы автоматизации
технологических процессов и производственных комплексов

b_q, b_v, b_u, d – настроечные коэффициенты; q – переменная интегрирования; k^*, u^* – опорные значения.

Структура этой модели может быть использована для других технологических объектов (проходные нагревательные печи, агломерационные ленты и т.п.). На основе модели синтезирован алгоритм координатно-параметрического управления сушкой горячей поверхностью угольных концентратов на углеобогадательной фабрике «Матюшинская».

Список литературы

1. Емельянов С. В. Новые типы обратной связи / С. В. Емельянов, С. К. Коровин – М.: Наука, 1997. – 352 с.
2. Сазыкин Г. П. Сушка угольного концентрата горячей поверхностью. / Г. П. Сазыкин, К. Н. Сывороткин, Л. П. Мышляев и др. // Научно-технические разработки и использования минеральных ресурсов. – 2016 - №3 – С. 286-287

УДК 621.313.282.2

ПРИМЕНЕНИЕ ЭЛЕКТРОМАГНИТНОГО ПРИВОДА В
ГЛУБОКИХ СКВАЖИНАХ ДЛЯ ПОВЫШЕНИЯ
ЭФФЕКТИВНОСТИ ВИБРОСЕЙСМИЧЕСКОГО МЕТОДА

Б. Ф. Симонов¹, В. Ю. Нейман², А. С. Шабанов²

¹*Институт горного дела СО РАН, г. Новосибирск*

²*Новосибирский государственный технический
университет, г. Новосибирск*

Для повышения эффективности вибросейсмического метода безвзрывной технологии обоснована новая концепция электромагнитного привода скважинного виброисточника, обеспечивающая возможность увеличения полезной механической работы в условиях ограничения внутренним диаметром обсадной трубы до 120 мм.

Ключевые слова: скважинный виброисточник, вибросейсмический метод, линейный электромагнитный привод, полезная механическая работа, силовая характеристика.

СЕКЦИЯ 2. Информационные и управляющие системы
технологическими процессами и системы автоматизации
технологических процессов и производственных комплексов

Работы Института горного дела СО РАН в области техники и технологии вибровоздействия на нефтяные пласты показали эффективность применяемого наземного оборудования для повышения нефтеотдачи [1, 2].

Однако сейсмические поля на большой глубине 2-3 км от вибровоздействия с поверхности достаточно малы, что снижает эффективность применения виброисточников.

В связи с этим большой интерес вызывают скважинные виброисточники, которые можно установить непосредственно на уровне нефтяного пласта и создавать необходимое силовое воздействие в обсадной колонне на уровне призабойной зоны скважины. Применение на большой глубине безвзрывной технологии с ударным воздействием позволит существенно повысить эффективность вибросейсмического метода без использования громоздкого наземного оборудования.

Генерирование силовых импульсов может осуществляться в результате возвратно-поступательного движения ударной массы управляемой электромагнитным полем катушки и ее периодическим взаимодействием через обсадную колонну в виде ударных волн с массивом горных пород расположенным на большой глубине.

По виду энергоносителя, концепция в использовании исключительно электрического привода, по отношению к пневматическому или гидравлическому исходит из возможности доставки на глубину 3...4 км электрической энергии с минимальными потерями энергоносителя. При проектировании подобного оборудования представляющего в своей основе линейный электромагнитный привод и систему для его управления основной проблемой стоящей перед разработчиком следует считать выбор параметров ударной системы. Ударная система должна обеспечивать необходимые условия для передачи энергии в деформируемую среду при минимальных весовых показателях и самое главное размерах привода, которые ограничены внутренним диаметром обсадной трубы до 120 мм.

Для гарантированного спуска электропривода в колонну труб такого диаметра на глубины до 3...4 км его наружный диаметр не должен превышать 105 мм, и функционировать в течение

СЕКЦИЯ 2. Информационные и управляющие системы
технологическими процессами и системы автоматизации
технологических процессов и производственных комплексов

длительных интервалов времени с продолжительностью включения не менее $PВ = 20...30\%$.

Различные конструктивные исполнения основных элементов в магнитной цепи привода для разгона ударной массы бойка электромагнитными силами имеет важное значение, поскольку в прямой зависимости от этого будут находиться энергетические параметры виброисточника [3, 4].

По этой причине решение вопросов о целесообразности применения того или иного конструктивного исполнения электропривода для импульсной системы особенно важно.

Практический опыт и многочисленные исследования по данному вопросу дают основание считать, что наиболее приемлемым в качестве электропривода виброисточника следует считать цилиндрический втяжной соленоидный электромагнитный двигатель, имеющий относительно большие значения хода бойка, в сравнении с другими типами электромагнитных двигателей [5-7].

Анализ различных по конструктивному исполнению основных элементов магнитной системы электроприводов показывает, что отношение длины намагничивающей катушки к радиусу сердечника в длинноходовых магнитных системах находится в интервале значений $8...12$, в то время как для остальных устройств ударного действия это отношение не превышает значений $2...4$ [8].

Представленные в работе результаты исследований получены с помощью конечно-элементного моделирования магнитного поля в программе Finite Element Method Magnetitics [9-13].

В результате моделирования установлено, что при ограничениях диаметра электропривода увеличение полезной механической работы и энергии удара может быть достигнуто за счет увеличения рабочего хода бойка и соответственно линейных размеров электромагнитного привода при полном сохранении показателя экономичности определяемого отношением механической работы приходящейся на единицу веса или объема его активных материалов [14].

По результатам выполненных исследований, в условиях ограничения внешнего диаметра, предложена новая концепция электромагнитного привода виброисточника. Прежде всего, это

СЕКЦИЯ 2. Информационные и управляющие системы
технологическими процессами и системы автоматизации
технологических процессов и производственных комплексов

относится к линейным размерам электропривода, высота которого строго не регламентируется исходя из наивыгоднейших соотношений между основными размерами длинноходовых электромагнитных двигателей работающих на потоках рассеяния. Также не существует установленных пределов в отношении диаметральных размеров бойка и катушки. В идеальном случае объем занимаемый катушкой следует рассматривать в виде однослойной намотки.

К достоинствам концепции следует отнести возможность существенного увеличения полезной механической работы при сохранении главных преимуществ электропривода, которые заключаются в простоте конструкции и технологии изготовления. Применение новой концепции расширяет границы использования электромагнитного ударного привода, однако имеющие место различия с традиционными представлениями конструктивного исполнения электропривода нуждаются в более детальных исследованиях.

Окончательно анализируя полученные результаты, можно сделать заключение, что наиболее перспективной в решении задачи увеличения энергии удара при сохранении диаметрального размера электропривода может являться идея увеличения его линейных размеров при полном сохранении показателя экономичности определяемого отношением механической работы приходящейся на единицу веса или объема его активных материалов.

Список литературы

1. Симонов Б.Ф. Результаты опытно-промысловых работ по повышению нефтеотдачи вибросейсмическим методом / Б.Ф. Симонов, С.В. Сердюков, Е.Н. Чередников // Нефтяное хозяйство. – 1996. – № 5. – С. 48.
2. Геомеханические и технические основы увеличения нефтеотдачи пластов в виброволновых технологиях / Опарин В.Н., Б. Ф. Симонов, В. Ф. Юшкин, Л. А. Назаров, Ю. В. Погарский – Новосибирск: Наука, 2010. – 404 с.
3. Нейман В.Ю. К вопросу о рационализации рабочих процессов и выбора конструктивных схем электромагнитных

СЕКЦИЯ 2. Информационные и управляющие системы
технологическими процессами и системы автоматизации
технологических процессов и производственных комплексов

ударных машин / В.Ю. Нейман // Автоматизированные электромеханические системы: Коллективная монография / Новосиб. гос. техн. ун-т; Под ред. В.Н. Аносова. – Новосибирск: Изд-во НГТУ, 2004. – С. 155–170.

4. Нейман В.Ю. Интегрированные линейные электромагнитные двигатели для импульсных технологий / В.Ю. Нейман // Электротехника. – 2003. – № 9. – С. 25–30.

5. Симонов Б.Ф. Исследование статических параметров длинноходовых электромагнитов для молотов / Б.Ф. Симонов, А.И. Кадышев, В.Ю. Нейман // Транспорт: наука, техника, управление. – 2011. – № 12. – С. 30–32.

6. Угаров Г.Г. Анализ показателей электромагнитных ударных машин / Г.Г. Угаров, В.Ю. Нейман // Физико-технические проблемы разработки полезных ископаемых. – 1996. – № 2. – С. 72–80.

7. Нейман В.Ю. Анализ процессов энергопреобразования линейных электромагнитных машин с предварительным аккумулярованием магнитной энергии в динамических режимах / В.Ю. Нейман // Электротехника. – 2003. – № 2. – С. 30–36.

8. Мошкин В.И. Импульсные линейные электромагнитные двигатели / В.И. Мошкин, В.Ю. Нейман, Г.Г. Угаров. Курган: Изд-во Курганского гос. ун-та, 2010. – 220 с.

9. Буль О.Б. Методы расчета магнитных систем электрических аппаратов: Магнитные цепи, поля и программа FEMM: Учебное пособие. – М.: Изд. центр «Академия», 2005. – 336 с.

10. Нейман В.Ю. К вопросу учета главных размеров при выборе типа электромагнита по значению конструктивного фактора / В.Ю. Нейман, Л.А. Нейман, А.А. Петрова, А.А. Скотников, О.В. Рогова // Электротехника. – 2011. – № 6. – С. 50а–53.

11. Петрова А.А. Моделирование в FEMM магнитного поля для расчета тяговых характеристик электромагнитных двигателей постоянного тока / А.А. Петрова, В.Ю. Нейман // Сборник научных трудов Новосибирского государственного технического университета. – 2008. – № 2. – С. 101–108.

12. Neyman V.Yu., Neyman L.A., Petrova A.A. Calculation of efficiency of DC electromagnet for mechanotronic systems // IFOST 2008: Proceedings of the 3d International Forum on Strategic Technology, June 23–29, 2008, Novosibirsk, Tomsk. – P. 452–454.

13. Нейман Л.А. Применение метода проводимостей для учета силы одностороннего магнитного притяжения асимметричного электромагнита / Л.А. Нейман, В.Ю. Нейман // Вестник Иркутского государственного технического университета. – 2015. – № 2 (97) – С. 214–218.

14. Нейман В.Ю. Влияние соотношений главных размеров электромагнитов на значения конструктивного фактора и показателя экономичности / В.Ю. Нейман, Л.А. Нейман, А.А. Петрова // Автоматизированные электромеханические системы: [сб. науч. тр.]. Под общ. ред. В.Н. Аносова. – Новосибирск: Изд-во НГТУ, 2011. – С. 177-187.

УДК 621.8.02

ПОДХОДЫ К РАЗРАБОТКЕ ЭЛЕКТРОМЕХАНИЧЕСКОГО УЗЛА МЕДИЦИНСКОГО ЭКЗОСКЕЛЕТА КОЛЕННОГО СУСТАВА

М.Н. Николенко, Д.А. Котин

*Новосибирский государственный технический университет,
г. Новосибирск*

В докладе освещены общие недостатки существующих медицинских экзоскелетов. Рассмотрены вопросы проектирования новых медицинских модульных экзоскелетов коленного сустава с электромеханическим приводом.

Экзоскелет, модульная конструкция, реабилитация, электрический привод.

В последнее время всё большее количество публикуемых статей посвящено разработкам в области построения экзоскелетов. Несмотря на то, что отрасль их проектирования находится в начале своего развития и перед исследователями стоит множество задач по обеспечению наиболее эффективного и удобного

СЕКЦИЯ 2. Информационные и управляющие системы
технологическими процессами и системы автоматизации
технологических процессов и производственных комплексов

объединения человеческих возможностей и преимуществ внешнего механического каркаса, уже сейчас очевидно, что в будущем экзоскелеты станут важной частью жизни человека, в частности, в медицинской, военной, промышленной и космической сферах.

Положительное влияние применения экзоскелетов при реабилитации и абилитации пациентов отмечено в ряде медицинских исследований, частичный обзор которых приведен в работе [1]. Эффективность их использования заключается в активном вовлечении пациента в поддерживаемый или даже корректируемый экзоскелетом процесс перемещения, вследствие чего пациент двигается более осознанно и сосредоточенно, чем при использовании других средств реабилитации. Также, медицинские экзоскелеты применяются для социальной реабилитации людей, которым современный этап развития медицины не способен осуществить восстановление двигательных функций. В этом случае экзоскелет применяется для длительного ношения и должен обеспечить движение неработающих конечностей.

Существующие прототипы направлены как на постоянное ношение инвалидами, так и на реабилитацию и абилитацию пациентов в условиях стационара. Такой подход приводит к ряду негативных последствий [2]. Функциональность существующих экзоскелетов не позволяет реализовать такие виды перемещений, как подъем по ступенькам и приседание без сторонней помощи, или же они не пригодны для ношения вне дома, что негативно для социальной реабилитации. При этом стоимость существующих устройств высока для применения в муниципальных стационарах.

Предполагается, что направленное проектирование экзоскелета нижних конечностей для применения в медицинской сфере для реабилитации и абилитации пациентов, не утративших способность ходить после курса лечения, сократит капитальные затраты медицинских учреждений и позволит более качественно выполнять процессы выздоровления больных.

Авторами принято решение о реализации модульного принципа построения подобных устройств, предполагающего создание локальных экзоскелетов для каждого сустава в отдельности. Применение одного активного (снабженного приводом) модуля экзоскелета для реабилитации пациентов

СЕКЦИЯ 2. Информационные и управляющие системы
технологическими процессами и системы автоматизации
технологических процессов и производственных комплексов

является недопустимым, так как смещаются локальный центр масс частей тела, на которые воздействует экзоскелет, и увеличивается нагрузка на здоровые части тела, что неблагоприятно скажется на процессе реабилитации. Пассивный модуль (без привода) не может осуществлять корректировку движений человека. Совместное применение активных и пассивных модулей позволит скорректировать и поддержать движения человека, не увеличивая нагрузку на здоровые части тела. При этом можно будет подбирать конфигурацию экзоскелета в зависимости от вида патологии пациента. Наличие всего нескольких комплектов модулей может позволить осуществлять реабилитационные процедуры для большего числа пациентов, чем при использовании неразборных экзоскелетов при аналогичных финансовых затратах.

В качестве первого модуля было решено спроектировать экзоскелет коленного сустава с электромеханическим приводом. Выбор электрического привода объясняется его неоспоримыми преимуществами по сравнению с другими способами реализации системы движения коленного сустава. Работа пневмопривода зависит от температуры окружающей среды, потому его применение нежелательно. Гидропривода развивают большие моменты, но требуют дополнительных элементов, что понижает надежность и увеличивает вес конструкции. Также гидропривода не могут обеспечить полный угол вращения коленного сустава. Вследствии линейного характера движения, наибольшую эффективность гидропривод будет развивать при удаленном креплении от коленного сустава, но такое расположение плохо вписывается в концепцию модульного построения. Гидропривода подходят для военных и промышленных экзоскелетов, но не применимы в медицинских целях, одной из задач которых, является доведение коленного сустава до требуемого положения. Электропривод с вращательным движением не имеет указанных недостатков, но развивает меньший механический момент. Однако в медицинских экзоскелетах для реабилитации основными параметрами являются функциональность и вес, при этом требования по моменту не столь велики, следовательно применение электропривода наиболее перспективно.

СЕКЦИЯ 2. Информационные и управляющие системы
технологическими процессами и системы автоматизации
технологических процессов и производственных комплексов

Общий вид электромеханического узла экзоскелета коленного сустава представлен на рисунке 1 [3].

В качестве приводного элемента будет использован бесколлекторный электродвигатель постоянного тока (Brushless DC electric motor), представляющий собой синхронный электродвигатель с постоянными магнитами и автономным инвертором напряжения, установленным непосредственно на корпус электродвигателя. Такое решение существенно уменьшает габариты системы, сохраняя преимущества синхронных двигателей по развиваемому моменту на единицу массы.

Центр вращения коленного сустава перемещается во время движения, данное перемещение может быть воспроизведено четырехзвенным механизмом [4]. В экзоскелетах коленного сустава, в отличие от поддерживающих устройств реабилитации, широко используется упрощенная механика одноосевого вращения. Но так как разрабатываемое устройство будет применяться в медицинских целях, было принято решение о проектировании более сложной механики, наиболее точно повторяющей движение человека.

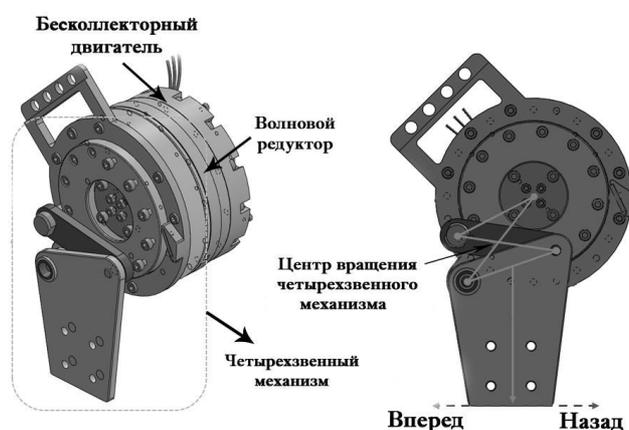


Рисунок 1 – Электромеханический узел экзоскелета коленного сустава

На данном этапе производится расчет механической передачи для различных пар волновой редуктор – бесколлекторный двигатель в целях нахождения наиболее легкой конструкции приемлемых габаритов. Пары были подобраны исходя из условия обеспечения необходимого момента для хождения человека массой 70 кг по прямой поверхности, согласно экспериментальным данным [5]. Поскольку максимальный и

СЕКЦИЯ 2. Информационные и управляющие системы
технологическими процессами и системы автоматизации
технологических процессов и производственных комплексов

номинальный момент таких двигателей практически не зависит от уровня подводимого к обмоткам питания, значение напряжения электрической машины будет выбрано после расчета механической части, исходя из условия обеспечения необходимых скоростей вращения. В качестве источника питания выбран литий-полимерный аккумулятор. Данная структура источника обладает малыми габаритами и весом. Однако для повышения срока эксплуатации такие аккумуляторы заряжаются следуя особому алгоритму, что блокирует возможность рекуперативных режимов.

Следующим этапом развития исследований станет разработка авторами системы управления передвижением коленного сустава. Основной особенностью рассматриваемой электромеханической системы является ее постоянная работа в переходных режимах. Поэтому главным предъявляемым к системе регулирования требованием, является обеспечение быстрой реакции на изменяющиеся задающее и возмущающие воздействия. Предлагается рассмотреть работу позиционных систем автоматического управления с векторным принципом подчиненного регулирования координат. Методом цифрового моделирования сравнить качество ее работы при использовании классических ПИ-регуляторов и релейных регуляторов координат состояния. В цифровой модели в качестве управляющих и возмущающих воздействий планируется использовать математические функции, аппроксимирующие кинематические параметры движения коленного сустава при ходьбе [6].

Полученные в ходе исследования результаты, будут использованы для разработки активных экзоскелетов голеностопного и тазобедренного суставов. После чего планируется начать работы по обеспечению их согласованного функционирования.

Литература

1. Экзоскелет как новое средство в абилитации и реабилитации инвалидов (обзор) / А.А. Воробьев, А.А. Петрухин, О.А. Засыпкина, П.С. Кривоножкина, А.М. Поздняков // Современные технологии в медицине – №2 – том 7 – 2015 – С. 185-197 – DOI: 10.17691/stm2015.7.2.22.

2. Nikolenko M.N. Reasonability of modular motion maintaining device / M.N. Nikolenko, P.O. Beketov; research advisers: D.A Kotin, E.V. Prohorenko// *Aspire to Science: тезисы городской научно-практической конференции студентов, магистрантов и аспирантов, Новосибирск, 7 апреля 2016 г.* – Новосибирск: Изд-во НГТУ, 2016. – С. 29-30 – ISBN 978-5-7782-2942-6.

3. Jung-Hoom Kim. Design of knee exoskeleton using foot pressure and knee torque sensors / Jung-Hoom Kim, Myounghoon Shim, Dong Hyun Ahn, Byoung Jong Son, Suk-Young Kim, Deog Young Kim, Yoon Su Baek, Baek-Kyu Cho. // *International Journal of Advanced Robotic Systems*, August 2015, vol. 12 no. 8 112.

4. M.P. Greene. Four bar linkage knee analysis. *Journal "Orthotics and Prosthetics"* – № 37(1): 15-24, 1983.

5. Winter David A. Biomechanics and motor control of human movement / David A. Winter. — 4th ed. – ISBN 978-0-470-39818-0.

6. Труханов К.А. Анализ кинематики коленного модуля с гидравлическим исполнительным механизмом и сопоставление результатов расчета с поведением коленного сустава человека при ходьбе / К.А. Труханов, Р.А. Прокопенко // *Наука и Образование. МГТУ им. Н.Э. Баумана. Электронный журнал.* 2014. № 11. С. 52–71.

УДК 62.51: 621.313.333: 622.6

СПОСОБЫ УПРАВЛЕНИЯ АСИНХРОННЫМ
ЭЛЕКТРОПРИВОДОМ ШАХТНЫХ ПОДЪЕМНЫХ
УСТАНОВОК

В. Ю. Островляничик, И. Ю. Поползин

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

Рассмотрены современное состояние и перспективы развития асинхронного электропривода шахтных подъемных установок и обосновывается перспективность применения в электроприводе шахтных подъемных установок схемы машины двойного питания.

СЕКЦИЯ 2. Информационные и управляющие системы
технологическими процессами и системы автоматизации
технологических процессов и производственных комплексов

Ключевые слова: машина двойного питания, асинхронный двигатель, фазный ротор, шахтный подъем, модернизация.

По состоянию на 2016 год в Российской Федерации эксплуатируются более 2000 вертикальных грузовых, грузопассажирских и пассажирских шахтных подъемов. Шахтные подъемные установки (ШПУ), являясь основными транспортными агрегатами, связывающими подземные и надземные участки шахт и рудников, во многом определяют производительность процесса добычи полезных ископаемых в целом, а также являются одними из наиболее мощных потребителей электрической энергии.

На подъемных машинах (ПМ) мощностью до 250 кВт используются низковольтные двигатели, на подъемных машинах с большей мощностью – двигатели с номинальным напряжением статора 6 кВ. Большинство ПМ эксплуатируются свыше 15 лет, при этом отдельные ПМ находятся в эксплуатации 30 лет и более, хотя регламентированный нормативный срок службы ПМ составляет 25 лет [1]. На шахтах Кузнецкого бассейна количество ПМ со сверхнормативным сроком службы составляет 75 единиц; со сроком службы от 20 до 30 лет – 33 единицы, со сроком до 20 лет – 13 единиц [2].

Для электропривода (ЭП) существующих шахтных подъемных машин применяются следующие типы двигателей:

- 1) Двигатель постоянного тока с независимым возбуждением;
- 2) Синхронный двигатель;
- 3) Асинхронный двигатель с фазным ротором.

Двигатели постоянного тока, несмотря на высокие регулировочные и перегрузочные характеристики, имеют сравнительно высокие эксплуатационные затраты. Кроме того, для приводов постоянного тока необходимо преобразовывать переменный ток в постоянный с помощью мощных полупроводниковых преобразователей, что негативно влияет на питающую сеть из-за изменения гармонического состава напряжения. По этим причинам машины постоянного тока находят все меньшее применение в ЭП ПУ мощностью до 1000 кВт и заменяются при модернизациях на асинхронные двигатели.

СЕКЦИЯ 2. Информационные и управляющие системы
технологическими процессами и системы автоматизации
технологических процессов и производственных комплексов

Синхронный электропривод ПМ, несмотря на такие очевидные достоинства, как высокая перегрузочная способность, возможность повышения коэффициента мощности и компенсации реактивной мощности, также имеет недостатки. К ним можно отнести затрудненный пуск синхронных машин в асинхронном режиме и высокая чувствительность синхронных двигателей к изменениям напряжения на статоре. Кроме того, в синхронных электроприводах высока сложность регулирования скорости, а приводные двигатели имеют значительные габариты. Поэтому синхронный электропривод ПУ сравнительно мало распространен и применяется для ПУ мощностью свыше 1000 кВт.

В настоящее время наиболее распространенным типом электропривода ПМ, имеющих мощность до 1000 кВт, является асинхронный. Большинство существующих электроприводов подъемных установок построено по схеме «асинхронный двигатель с фазным ротором – роторная резисторная станция» (АД ФР – РС), в котором скорость регулируется изменением активного сопротивления ротора.

За цикл подъема (спуска) электропривод работает в следующих режимах: растормаживание, движение с малой скоростью (трогание подъемного сосуда, вход в разгрузочные кривые и выход из них), разгон, движение с максимальной допустимой скоростью и торможение. При этом диапазон изменения скорости составляет до 36:1 – 40:1.

Рассмотрим режимы работы электропривода подъемной установки, построенного по схеме АД ФР – РС. В двигательном режиме происходит растормаживание, движение с малой скоростью при наличии реостата в цепи ротора, разгон и движение на установившейся скорости. В такой схеме электропривода возможны следующие тормозные режимы:

1) Генераторный (рекуперативный) режим можно применять для двухскиповых установок в случае, когда опускающийся подъемный сосуд, нагружен больше чем поднимающийся; при этом максимальная скорость подъема превышает скорость идеального холостого хода на 3-5%.

2) Торможение противовключением осуществляется при условии вращения магнитного поля статора в направлении,

СЕКЦИЯ 2. Информационные и управляющие системы
технологическими процессами и системы автоматизации
технологических процессов и производственных комплексов

противоположном направлению вращению ротора двигателя, из-за чего возникает тормозной момент. В электроприводе, построенном по схеме АД ФР – РС при торможении противовключением только первые две-три ступени реостата обеспечивают устойчивые характеристики двигателя, и регулирование тормозного момента по этой причине является грубым и сопровождается бросками тока. Кроме того, при таком торможении велики потери на нагрев сопротивлений в роторной цепи.

3) Режим динамического торможения, осуществляемый отключением статора от сети переменного тока и питанием его постоянным током при замкнутом накоротко или на реостат роторе.

Электроприводу ПМ, построенному по схеме АД ФР – РС, присущи следующие недостатки:

1) При торможении противовключением ступенчатое изменение активного сопротивления цепи статора приводит к ступенчатому изменению тока статора, что, в свою очередь, приводит к рывкам электромагнитного момента двигателя. Реализация динамического торможения требует наличия в статорной цепи мощного управляемого выпрямителя;

2) Во всех режимах работы имеются значительные потери активной энергии в роторе, обусловленные бесполезным ее рассеиванием на резисторах роторной станции в виде тепла, что ведет к недоиспользованию машины по моменту;

4) Ненадежность роторной станции, особенно контакторов ускорения и релейно-контакторной системы управления;

5) Диапазон регулирования скорости и плавность этого регулирования ограничены числом ступеней роторной станции. Увеличение числа ступеней ведет к значительному усложнению конструкции роторной станции и снижению ее надежности.

Несмотря на указанные выше недостатки, электроприводы, построенные по схеме АД ФР – РС, по состоянию на 2016 г. являются самыми распространенными для привода ПМ. Причина этого – сравнительная простота таких приводов, а также удовлетворительные динамические характеристики.

В настоящее время назрела необходимость модернизации существующих электроприводов подъемных установок. Вопросами

СЕКЦИЯ 2. Информационные и управляющие системы
технологическими процессами и системы автоматизации
технологических процессов и производственных комплексов

разработки и внедрения современных систем управления электроприводами ШПУ занимаются такие организации как Региональный канатный центр (г. Пермь), ЗАО «Эрасиб» (г. Новосибирск), ООО НТФ «Автоматуглерудпром» (г. Санкт-Петербург), ООО «НИИ АЭМ СибГИУ» (г. Новокузнецк), ОАО «Рудоавтоматика» (г. Железногорск). За рубежом исследованиями в области подъёмных машин и их систем управления занимаются такие предприятия как ABB Ltd., Siemens, AEG, Rockwell Automation и другие.

По вышеуказанным причинам существует необходимость разработки и внедрения в эксплуатацию современной системы управления асинхронным электроприводом ШПУ с учетом современных достижений в области силовой электроники, асинхронного электропривода и вычислительной техники.

Перспективным видится использование следующих схем электропривода:

- схемы частотного управления асинхронными двигателями;
- каскадные схемы асинхронного электропривода;
- схема машины двойного питания.

Применение частотного управления для уже имеющихся асинхронных двигателей, рассчитанных на неизменную частоту питающего напряжения 50 Гц, как было показано в [3], сопряжено с такими проблемами как:

- Падение жесткости характеристик и снижение перегрузочной способности двигателя при работе на пониженной частоте;
- Перегрев стали и рост потребляемой двигателем реактивной мощности;
- Снижение КПД и коэффициента мощности двигателя.

Вышеуказанные недостатки могут быть устранены при использовании специальных асинхронных двигателей с шихтованным ротором, рассчитанных на использование в системах частотного управления. Данное решение является дорогостоящим из-за стоимости самих двигателей, а также из-за стоимости, трудоемкости и сложности работ по демонтажу старого двигателя и монтажу нового.

СЕКЦИЯ 2. Информационные и управляющие системы
технологическими процессами и системы автоматизации
технологических процессов и производственных комплексов

В асинхронно-вентильном каскаде (АВК) в цепь ротора включен вентильный преобразователь, непосредственно связанный с питающей сетью. Простейшим АВК является АВК с промежуточным звеном постоянного тока, в котором роторная (выпрямительная) группа вентиляей является неуправляемой, а от нее запитан управляемый инвертор. Мощность скольжения в таком каскаде передается в сеть через инвертор, в том числе, и в тормозных режимах. Регулирование скорости осуществляется регулированием добавочной ЭДС в цепи выпрямленного тока статора. Диапазон регулирования ограничен допустимыми углами открытия вентиляей инверторной группы.

В вентильно-машинных каскадах мощность скольжения используется для питания рабочей машины постоянного тока. В машинных каскадах мощность скольжения передается обратно в питающую сеть. Для этого используется вентильный преобразователь в цепи статора, подключенный к машинному преобразователю, состоящему из двигателя постоянного тока и механически соединенного с ним синхронного генератора

Однако данным схемам присущи следующие недостатки:

- В асинхронно-вентильных каскадах используются преобразователи с одной управляемой группой вентиляей, что не позволяет полностью управлять потоком мощности скольжения. Преобразователи АВК неблагоприятно влияют на питающую сеть;
- Машинные и машинно-вентильные каскады требуют установки дополнительной машины постоянного тока.

В свете вышеизложенного, перспективным видится применение для шахтных подъемных установок электропривода, построенного на основе асинхронного двигателя с фазным ротором, включенного по схеме машины двойного питания (МДП).

В отличие от АВК, в МДП присутствует возможность независимого управления частотой напряжения на роторе.

Для достижения машиной установившегося режима работы необходимо, чтобы векторы МДС статора и ротора были неподвижны друг относительно друга [4]. Для этого необходимо, чтобы вектор МДС обмотки ротора вращался относительно самого ротора со скоростью:

$$\omega_R = \omega_S - \omega = \omega_0(1 - s), \quad (1)$$

где ω_R – скорость вращения вектора МДС ротора (поля ротора) относительно ротора, $\omega_S = \omega_0$ – скорость вращения вектора МДС статора, s – скольжение.

Значение частоты тока ротора и способ управления ей определяет режим работы МДП. При зависимом от скольжения управлении значение частоты тока ротора определяется по следующему выражению:

$$f_R = f_S s, \quad (2)$$

где f_R , f_S – частоты тока (напряжения) ротора и статора соответственно. В данном режиме МДП работает как асинхронный двигатель, и скорость, развиваемая двигателем, зависит от величины нагрузки. При этом, однако, мощность скольжения не рассеивается в виде тепла на обмотках ротора и сопротивлениях роторной станции, а рекуперирована обратно в питающую сеть. Кроме того, для МДП в асинхронном режиме возможны тормозные режимы с рекуперацией энергии, достижение которых в АД ФР с роторной станцией или частотным управлением принципиально невозможно [7]. Помимо этого, поскольку принципиальной отличительной чертой МДП в асинхронном режиме является возможность управления амплитудой и фазой результирующей ЭДС ротора, то даже при работе МДП в двигательном режиме возможно уменьшение потребления реактивной мощности по цепи статора машины.

При независимом от величины скольжения управлении частотой тока ротора МДП работает как синхронный двигатель, при этом синхронная скорость определяется заданной частотой тока ротора. При питании ротора машины постоянным током режим работы МДП полностью эквивалентен неявнополюсному синхронному двигателю. При этом, в отличие от синхронного двигателя, управление скоростью МДП в синхронном режиме осуществляется изменением частоты напряжения, подведенного к ротору, и не вызывает затруднений.

Таким образом, использование в электроприводе ШПУ АД ФР, включенного по схеме МДП, обладает следующими достоинствами [5], [7]:

СЕКЦИЯ 2. Информационные и управляющие системы
технологическими процессами и системы автоматизации
технологических процессов и производственных комплексов

1) Возможность работы машины как в асинхронном, так и в синхронном режиме определяется только алгоритмами работы преобразователя в цепи ротора и не требует изменения схемы включения приводного двигателя;

2) Высокая энергоэффективность установки в силу возможности организации специфических двигательных и тормозных режимов работы машины, которая осуществляется за счет управления преобразователем в цепи ротора;

3) Модернизация существующих электроприводов, построенных по схеме АД ФР – РС, не требует существенных изменений конструкции привода или замены приводного двигателя и заключается лишь в замене роторной станции на частотный преобразователь.

Наиболее подробно теоретические вопросы МДП разработаны в [4], [6], [8], [9], [10]. Однако в указанных работах также недостаточно внимания уделено вопросам управления скоростью МДП (так, не приведены механические и электромеханические характеристики МДП, не разработана ее структурная схема для СУЭП). В [8] же рассмотрен только синхронный режим работы МДП.

В целом, как показал анализ литературных и иных источников, вопросу применения МДП для привода ПУ уделяется мало внимания. Однако имеются сведения [5] об успешном применении МДП с ПЧ в роторе, рассчитанным на полную мощность привода, для электропривода ШПУ и о достижении приводом высоких регулировочных и динамических характеристик. При этом использованию в цепи ротора полностью управляемых вентильных групп внимания уделяется недостаточно.

Таким образом, по результатам исследования текущего состояния электропривода с МДП можно прийти к выводу о том, что теоретические и практические вопросы применения МДП в электроприводе механизмов с большим диапазоном регулирования скорости, в частности, в электроприводе ШПУ, изучены и разработаны недостаточно. Кроме того, в литературных источниках мало внимания уделяется и механическим и электромеханическим характеристикам МДП и ее динамическим свойствам. В целом, можно считать, что вопрос математического

СЕКЦИЯ 2. Информационные и управляющие системы
технологическими процессами и системы автоматизации
технологических процессов и производственных комплексов

описания МДП разработан недостаточно и, в основном, применительно к узким задачам.

Исходя из вышеизложенного, можно прийти к выводу о том, что в настоящее время исследование вопроса применения МДП для электропривода имеет как теоретическое (углубление теории МДП, исследование ее характеристик в различных режимах), так и практическое (разработка алгоритмов управления и структуры системы управления) значение.

Библиографический список

1. Методические указания по проведению экспертных обследований шахтных подъемных установок РД 03-422-01 / [Утверждены постановлением Госгортехнадзора России от 26.06.01 № 23. Введены в действие с 01.01.02 постановлением Госгортехнадзора России от 01.11.01 № 45]
2. Ерофеев Г. С., Завгородний В. И. Проблемы безопасности шахтных подъемов Кузбасса // Автоматизированный электропривод и промышленная электроника в металлургической и горно-топливной отраслях: Труды Третьей Всероссийской научно-практической конференции / Под. ред. В. Ю. Островляничика, П. Н. Кунина, Новокузнецк, 2006 г. — 300 с.
3. Островляничик В. Ю., Поползин И. Ю. Исследование магнитной системы асинхронного двигателя при частотном управлении // Вестник Кузбасского государственного технического университета. 2016. №2 (114). – с. 75-84
4. Онищенко Г. Б., Локтева И. Л. Асинхронные вентильные каскады и машины двойного питания. – М.: Энергия, 1979. – 200 с.
5. Бежок В. Р. и др. Шахтный подъем. – Донецк: ООО «Юго-Восток, Лтд», 2007. – 624 с.
6. Онищенко Г. Б. Асинхронный вентильный каскад. – М.: Энергия, 1967. – 152 с.
7. Островляничик В. Ю., Поползин И. Ю. Асинхронный электропривод шахтной подъемной установки, построенный по схеме машины двойного питания с комбинированным

- управлением // Научные технологии разработки и использования минеральных ресурсов. 2016. №3. – с. 303-309
8. Ключев В. И. Теория электропривода. – М.: Энергоатомиздат, 2001. – 704 с.
 9. Leonhard W. Control of Electrical Drives. – Berlin, Heidelberg, New York: Springer - Verlag, 2001. – 460 p.
 10. Основы автоматизированного электропривода / М. Г. Чиликин, М. М. Соколов, В. М. Терехов, А. В. Шинянский. – М.: Энергия, 1974. – 568 с.

УДК 62.51: 621.313.333: 622.6

**ОБОБЩЕННЫЙ АЛГОРИТМ УПРАВЛЕНИЯ
ЭЛЕКТРОПРИВОДОМ ШАХТНОЙ ПОДЪЕМНОЙ УСТАНОВКИ
С МАШИНОЙ ДВОЙНОГО ПИТАНИЯ**

В. Ю. Островляничик, И. Ю. Поползин

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

Рассмотрены энергетические режимы работы машины двойного питания, на основе анализа тахограмм и диаграмм движущих усилий предложен обобщенный алгоритм управления электроприводом подъемной установки на ее основе.

Ключевые слова: машина двойного питания, асинхронный двигатель, фазный ротор, шахтный подъем.

В настоящее время увеличиваются требования к экономичности и энергоэффективности электроприводов. Шахтные подъемные установки (ШПУ), являясь основными транспортными агрегатами, связывающими подземные и надземные участки шахт и рудников, во многом определяют производительность процесса добычи полезных ископаемых в целом, а также являются одними из наиболее мощных потребителей электрической энергии. Таким образом, задача модернизации электроприводов шахтных подъемных установок с

СЕКЦИЯ 2. Информационные и управляющие системы
технологическими процессами и системы автоматизации
технологических процессов и производственных комплексов

использованием энергоэффективных технологий является актуальной.

В свете вышеперечисленного перспективным видится применение в электроприводе шахтных подъемных установок асинхронных двигателей с фазным ротором (АД ФР), включенных по схеме машины двойного питания (МДП). Под МДП понимается схема включения АД ФР, при которой статор машины запитан непосредственно от сети, а ротор питается от преобразователя частоты.

Для достижения машиной установившегося режима работы необходимо, чтобы векторы МДС статора и ротора были неподвижны друг относительно друга [1]. Для этого необходимо, чтобы вектор МДС обмотки ротора вращался относительно самого ротора со скоростью:

$$\omega_R = \omega_S - \omega = \omega_0(1 - s), \quad (1)$$

где ω_R – скорость вращения вектора МДС ротора (поля ротора) относительно ротора, $\omega_S = \omega_0$ – скорость вращения вектора МДС статора, s – скольжение.

Условием вращения вектора МДС ротора относительно ротора является его ненулевая частота. Значение частоты тока ротора и способ управления ей определяет режим работы МДП. При зависимом от скольжения управлении значение частоты тока ротора определяется по следующему выражению:

$$f_R = f_S s, \quad (2)$$

где f_R , f_S – частоты тока (напряжения) ротора и статора соответственно. В данном режиме МДП работает как асинхронный двигатель, и скорость, развиваемая двигателем, зависит от величины нагрузки.

При независимом от величины скольжения управлении частотой тока ротора МДП работает как синхронный двигатель, при этом синхронная скорость определяется заданной частотой тока ротора и в определенных пределах не зависит от нагрузки.

В данной работе рассматривается асинхронный режим работы МДП. Принципиальная схема роторной цепи МДП (с тиристорами в качестве элементной базы преобразователя частоты и полным управлением преобразователем) приведена на рисунке 1.

СЕКЦИЯ 2. Информационные и управляющие системы
технологическими процессами и системы автоматизации
технологических процессов и производственных комплексов

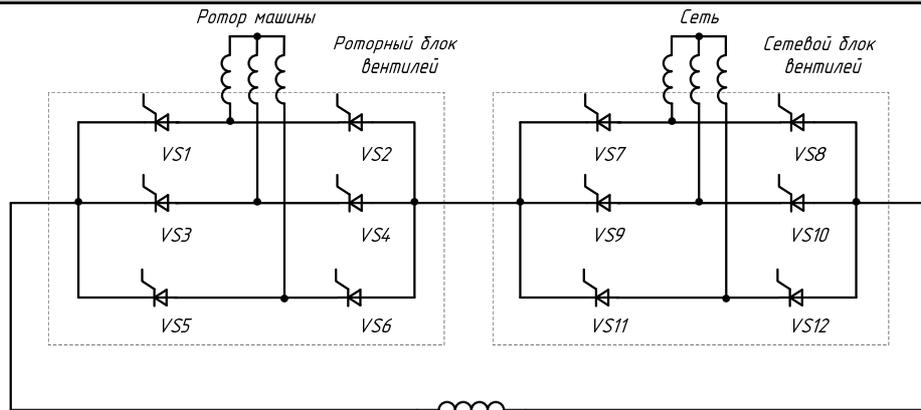


Рисунок 1 – Принципиальная схема роторной цепи МДП
Схема замещения МДП в асинхронном режиме приведена на рисунке 2.

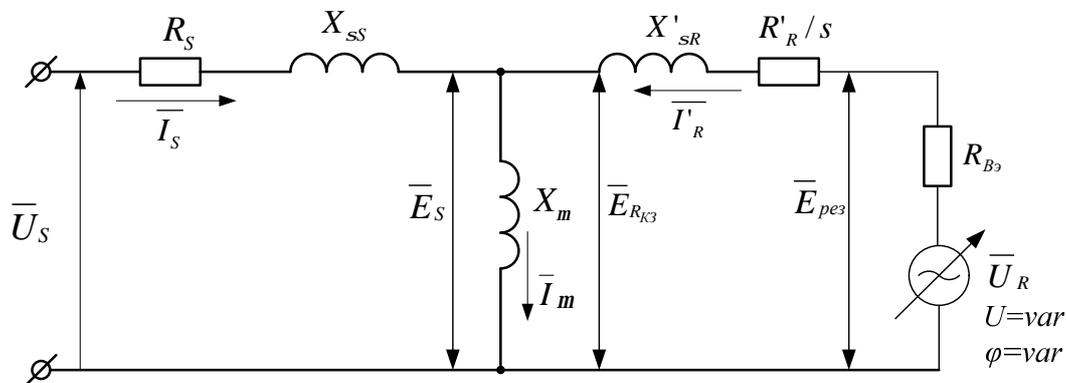


Рисунок 2 – Схема замещения МДП в асинхронном режиме

На схеме замещения приняты следующие обозначения:

- U_s – напряжение на статоре;
- I_s – ток статора;
- E_s – ЭДС, наводимая вращающимся полем в статоре;
- $X_{\sigma s}$ – собственное индуктивное сопротивление рассеяния статора;
- I_μ – ток намагничивания машины;
- X_μ – индуктивное сопротивление контура намагничивания;
- $X'_{\sigma R}$ – приведенное собственное индуктивное сопротивление рассеяния ротора;
- R'_R – приведенное активное сопротивление ротора;
- $R_{Bэ}$ – эквивалентное сопротивление вентилей;
- $E_{рез}$ – суммарная (результатирующая) ЭДС, действующая в роторе;
- $E_{Rкз}$ – ЭДС ротора в режиме короткого замыкания;

s – скольжение;

U_R – напряжение, приложенное к ротору.

Поскольку собственное сопротивление вентиляей мало (падение напряжения на исправных вентилях не превышает 2 В), то величиной эквивалентного сопротивления вентиляей $R_{Bэ}$ по сравнению с приведенным активным и индуктивным сопротивлениями ротора в дальнейшем можно пренебречь.

Кроме того, в общем случае также можно пренебречь величиной активного сопротивления статора, поскольку при номинальной частоте напряжения, приложенного к статору оно мало по сравнению с индуктивным сопротивлением.

Для рассмотрения возможных режимов работы МДП применим метод векторных диаграмм. Для этого запишем для приведенной схемы замещения уравнения Кирхгофа в комплексной форме совместно с выражением для электромеханической характеристики машины (роторные величины приведены к статору) (3).

$$\begin{cases} \bar{U}_S = \bar{I}_S R_S + j\bar{I}_S (X_{SS} + X_m) + \bar{E}_S, \\ E_{pez} = \bar{E}_{RK3} s + \bar{U} + j\bar{I}_R' (X_m + X_R') + \bar{I}_R' \frac{R_S}{s}, \\ I_m = \bar{I}_S + \bar{I}_R', \\ M = k\Phi I_r \cos j_r. \end{cases} \quad (3)$$

Активная мощность, подводимая к статору, при условии симметричности фаз статора машины, определится следующим выражением:

$$P_S = 3I_S U_S \cos j_S, \quad (4)$$

где

U_S – действующее значение фазного напряжения на статоре;

I_S – действующее значение тока фазы статора;

φ_S – угол сдвига фаз между фазным напряжением и током статора.

Вышеприведенным схемам замещения и уравнениям Кирхгофа соответствует векторная диаграмма, приведенная на рисунке 3.

На диаграмме, помимо вышеуказанных обозначений, приняты следующие обозначения:

СЕКЦИЯ 2. Информационные и управляющие системы
технологическими процессами и системы автоматизации
технологических процессов и производственных комплексов

δ – угол сдвига фаз между ЭДС статора и напряжением на роторе (при пренебрежении активным сопротивлением статора и собственным индуктивным сопротивлением рассеяния статора угол δ можно считать углом сдвига фаз между напряжениями, приложенными к статору и ротору).

Момент, развиваемый двигателем связан с током ротора следующим соотношением:

$$M = k\Phi I_R \cos j_R, \quad (5)$$

где M – электромагнитный момент двигателя;

k – коэффициент пропорциональности;

Φ – суммарный магнитный поток двигателя;

φ_R – фаза роторного тока (угол между векторами ЭДС преобразователя и тока ротора).

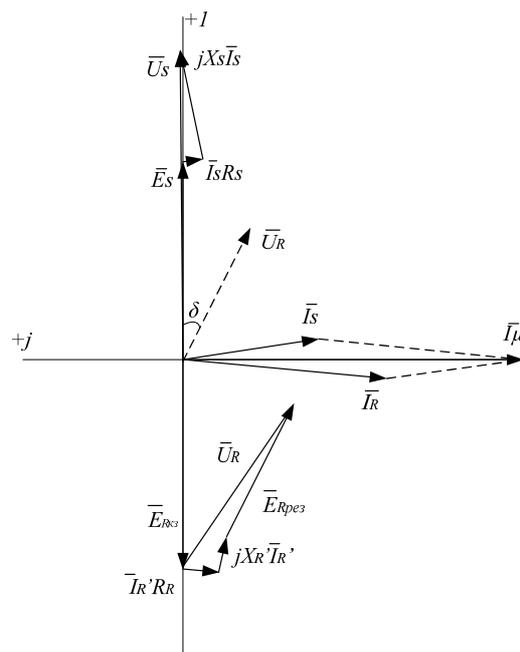


Рисунок 3 – Векторная диаграмма машины двойного питания в асинхронном режиме

Иначе говоря, момент, развиваемый машиной, пропорционален активной составляющей тока ротора $I_{Ra} = I_R \cos j_R$. При этом величина фазы тока ротора определяет направление потока мощности между двигателем и преобразователем [2]. Если $0 < j_R < \frac{p}{2}$, то двигатель отдает энергию скольжению в сеть через

роторный преобразователь, при этом роторная группа вентиляей работает в выпрямительном режиме, а сетевая – в инверторном.

Если $\frac{p}{2} < j_r < p$, то поток мощности в роторной цепи направлен от сети к ротору двигателя, при этом сетевая группа работает в выпрямительном, а роторная – в инверторном режиме. При этом, как видно из схемы, приведенной на рисунке 3, ориентация обобщенного вектора тока ротора определяется подведенным к ротору внешним напряжением.

Рассмотрим энергетические режимы работы МДП, достигаемые при полном управлении вентиляными группами преобразователя частоты, подключенного к ротору. Для их анализа составим упрощенные векторные диаграммы МДП. При этом принимается, что фазовый сдвиг между ЭДС короткого замыкания равен π , а падение напряжения в статорной цепи мало.

1) Двигательный режим со скоростью ниже синхронной.

Данный режим полностью аналогичен обычному двигательному режиму работы асинхронной машины и описывается теми же выражениями [4]. При этом роторная группа вентиляей работает в выпрямительном режиме, сетевая – в инверторном, мощность скольжения передается в питающую сеть. Векторная диаграмма для данного режима приведена на рисунке 4.

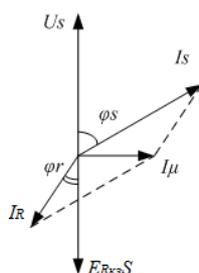


Рисунок 4 – Упрощенная векторная диаграмма для режима работы МДП как асинхронного двигателя со скоростью ниже синхронной

2) Рекуперативное торможение машины на сверхсинхронной скорости.

Данный режим также полностью аналогичен режиму рекуперативного торможения асинхронного двигателя. При этом в сеть возвращается энергия скольжения (через вентиляный преобразователь), а также происходит рекуперация энергии в цепи статора.

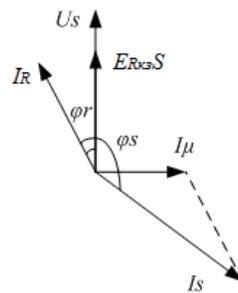


Рисунок 5 – Упрощенная векторная диаграмма МДП в режиме рекуперативного торможения на сверхсинхронной скорости

3) Режим генераторного торможения при скорости ниже синхронной

В данном режиме изменяется фаза тока ротора до величины $\frac{p}{2} < j_R < p$, в результате чего машина переходит в тормозной режим. При этом роторный блок работает в режиме инвертора, сетевой – в режиме выпрямителя. Двигатель потребляет энергию со стороны ротора на возбуждение, а в сеть передает мощность, генерируемую на валу, через цепь статора.

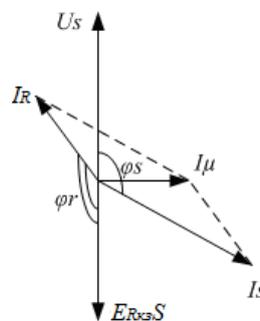


Рисунок 6 – Упрощенная векторная диаграмма МДП в режиме генераторного торможения на скорости ниже синхронной

3) Двигательный режим на сверхсинхронной скорости

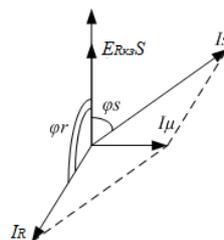


Рисунок 7 – Упрощенная векторная диаграмма МДП в режиме асинхронного двигателя на сверхсинхронной скорости

СЕКЦИЯ 2. Информационные и управляющие системы
технологическими процессами и системы автоматизации
технологических процессов и производственных комплексов

В данном режиме изменяется порядок чередования фаз тока ротора, и, в итоге, для ротора фазовый сдвиг становится больше $\pi/2$. При этом роторный блок вентиля работает в инверторном режиме, и машина питается от сети как по цепи статора, так и по сети ротора. При этом машина потребляет из сети по цепи статора мощность P_s , а из преобразователя по цепи ротора мощность $P_R = P_s |s|$.

4) Двигательный режим с вращением вала против поля статора

Возможен режим работы МДП, когда машина работает как двигатель, но вал вращается в направлении, противоположном вращению поля. Для осуществления данного режима необходимо перевести роторный блок вентиля в инверторный режим и осуществлять управление преобразователем так, чтобы выпрямленная ЭДС сетевого блока была больше ЭДС инверторного блока. Тогда возникает тормозной момент, под действием которого ротор тормозится, а затем, при дальнейшем увеличении ЭДС выпрямительного блока, разгоняется против поля статора.

Машина при этом потребляет из сети ротора мощность $P_R = P_s s$ (с учетом того, что в таком режиме работы $s > 1$), при этом часть подведенной мощности величиной $P_M = P_s (s - 1)$ идет на формирование вращающего момента, а остальная часть за вычетом потерь генерируется статором в сеть.

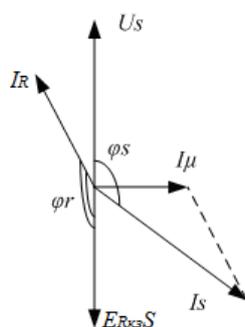


Рисунок 8 – Упрощенная векторная диаграмма МДП в режиме асинхронного двигателя в двигательном режиме с вращением ротора против поля

Данный режим может быть использован в процессе реверсирования машины для торможения ротора до нулевой скорости с дальнейшим переключением реверсора и разгоном машины в обратном направлении. В этом случае данный режим аналогичен торможению противовключением в обычном АД, но с рекуперацией энергии.

5) Режим противовключения

Режим противовключения в асинхронном двигателе или МДП возникает в том случае, если ротор разгоняется внешним моментом в направлении, обратном направлению вращения поля статора. При этом машина работает в области скольжений $s > 1$. Векторная диаграмма для режима противовключения МДП аналогична векторной диаграмме для двигательного режима работы со скоростью ниже синхронной. При этом машина работает как генератор, преобразующий механическую мощность на валу и генерирующий в сеть мощность $P_M = P_S(s-1)$ ($s > 1$). При этом машина дополнительно потребляет из сети через статор мощность P_S , которую передает в ротор. При этом возможно регулирование тормозного момента за счет изменения напряжения, подведенного к ротору.

б) Режим динамического торможения

В этом режиме статор машины питается постоянным током, при этом, в отличие от динамического торможения АД ФР, мощность возбуждения P_e , получаемая машиной через статор, не рассеивается на роторных сопротивлениях в виде тепла, а рекуперируется обратно в питающую сеть через роторный преобразователь. Роторный блок при этом работает в выпрямительном режиме, а сетевой – в инверторном.

Таким образом, можно сделать вывод, что система управления электроприводом ШПУ на основе машины двойного питания должна иметь переменную структуру для осуществления всех необходимых режимов работы машины.

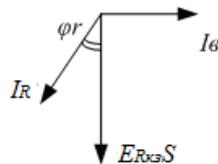


Рисунок 9 – Упрощенная векторная диаграмма МДП в режиме динамического торможения

Подробный анализ механических свойств ШПУ выходит за рамки данной работы и проведен в [3], [7], а также независимо авторами для нескольких подъемов. По результатам данного анализа можно прийти к следующим выводам:

- 1) Двигатель шахтной подъемной установки работает в двигательном и тормозном режимах;
- 2) Двигатель установки работает как с положительной, так и с отрицательной скоростью (в режиме реверса).

Исходя из данных соображений, можно прийти к выводу о том, что двигатель шахтной подъемной установки работает во всех 4 квадрантах электромеханической характеристики (режимы $(M > 0, \omega > 0)$, $(M < 0, \omega > 0)$, $(M < 0, \omega < 0)$, $(M > 0, \omega < 0)$) и, следовательно, СУЭП ШПУ на основе МДП должна обеспечивать управляемость привода во всех режимах работы.

В то же время, очевидно, что не все возможные режимы работы МДП необходимы для ШПУ и должны реализовываться. Исходя из анализа механических свойств и характеристик ШПУ была составлена таблица режимов работы МДП для двухскиповой ШПУ с реверсором в цепи статора (таблица 1).

Исходя из данных таблицы 1, был составлен алгоритм работы электропривода ШПУ (рисунок 10).

Алгоритм, приведенный на рисунке 10, полностью описывает работу электропривода ШПУ на основе МДП. По данному алгоритму могут быть составлены управляющие программы для преобразователя частоты в цепи ротора.

Указанный алгоритм полностью соответствует тахограмме двухскиповой подъемной установки. Он также может быть легко модифицирован для односкиповой или клетевой установки.

Таблица 1

**СЕКЦИЯ 2. Информационные и управляющие системы
технологическими процессами и системы автоматизации
технологических процессов и производственных комплексов**

Режимы работы МДП в электроприводе двухскиповой ШПУ

Режим работы установки	Режим работы машины	Режим работы роторной группы вентилялей	Режим работы сетевой группы вентилялей	Режим работы реверсора
Разгон сосудов, подъем загруженного скипа	Двигательный (в асинхронном или синхронном режиме)	Выпрямительный	Инверторный	Не задействован
Опускание груженого скипа	Рекуперативное торможение на сверхсинхронной скорости	Выпрямительный	Инверторный	Не задействован
	Рекуперативное торможение на скорости ниже синхронной	Инверторный	Выпрямительный	Не задействован
Подъем/опускание порожнего скипа	До точки уравнивания – двигательный; после нее - противовключение	Выпрямительный	Инверторный	Не задействован
Торможение до нулевой скорости	Встречная ЭДС в цепи ротора (двигательный против поля)	Инверторный	Выпрямительный	Не задействован
Реверсирование	-	Обеспечивает нулевой ток ротора		Задействован при нулевом токе ротора

**СЕКЦИЯ 2. Информационные и управляющие системы
технологическими процессами и системы автоматизации
технологических процессов и производственных комплексов**

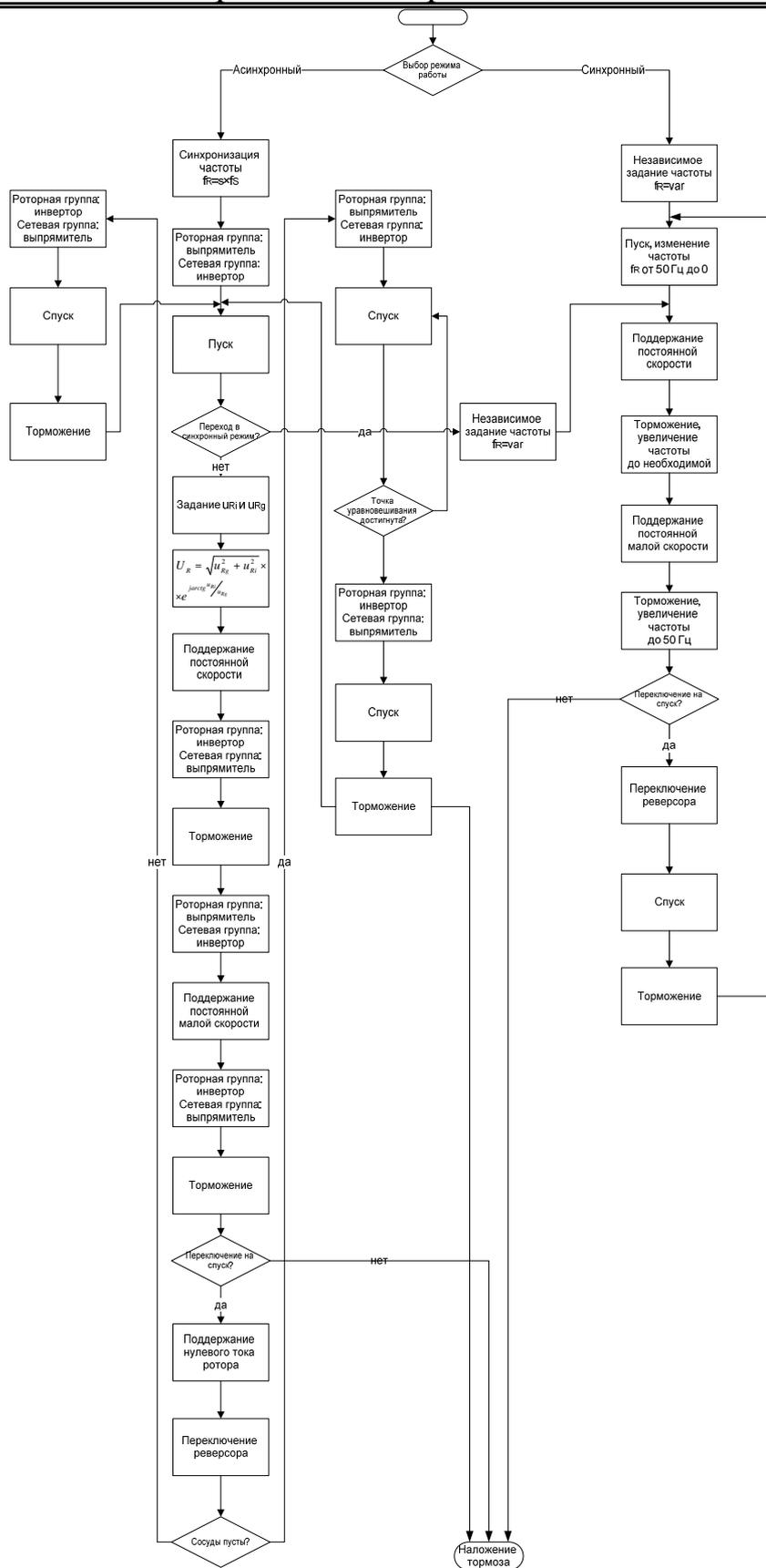


Рисунок 10. – Обобщенный алгоритм работы электропривода ШПУ с МДП

Библиографический список

1. Онищенко Г. Б., Локтева И. Л. Асинхронные вентильные каскады и машины двойного питания. – М.: Энергия, 1979. – 200 с.
2. Хватов С. В., Титов В. Г. Проектирование и расчет асинхронного вентильного каскада. – Горький: Горьковский государственный университет им. Н. И. Лобачевского, 1977. – 90 с.
3. Бежок В. Р. и др. Шахтный подъем. – Донецк: ООО «Юго-Восток, Лтд», 2007. – 624 с.
4. Ключев В. И. Теория электропривода. – М.: Энергоатомиздат, 2001. – 704 с.
5. Круг К. А. Основы электротехники. Т.2 Теория переменных токов. – М., Л.: Государственное энергетическое издательство, 1946. – 635 с.
6. Основы автоматизированного электропривода / М. Г. Чиликин, М. М. Соколов, В. М. Терехов, А. В. Шинянский. – М.: Энергия, 1974. – 568 с.
7. Песвианидзе А. В. Расчет шахтных подъемных установок. – М.: Недра, 1992. – 250 с.
8. Сиротин С. С. Шахтные подъемные установки. – Алчевск: ДГМИ, 1997. – 174 с.

УДК 62-529

МИКРОКОНТРОЛЛЕРНОЕ УПРАВЛЕНИЕ
ЭЛЕКТРОПРИВОДОМ В СОСТАВЕ КОНТРОЛЬНО-
ПРОВЕРОЧНОЙ АППАРАТУРЫ

Н. М. Соколова¹, В. Ф. Шишлаков²

*АО «НИИ Командных Приборов»¹, г. Санкт-Петербург, Санкт-Петербургский государственный университет
аэрокосмического приборостроения², Санкт-Петербург*

В статье рассматриваются принципы работы блока управления электроприводом в составе контрольно-проверочной аппаратуры (КПА),

СЕКЦИЯ 2. Информационные и управляющие системы технологическими процессами и системы автоматизации технологических процессов и производственных комплексов

критерии выбора микроконтроллера для данного круга решаемых задач, сформулированы требования к КПА и блоку управления приводом.

Ключевые слова: система управления, электропривод, микроконтроллер, контрольно-проверочная аппаратура, двигатель, блок управления приводом.

Высокие потребительские свойства привода могут быть получены только при применении мощной микропроцессорной системы управления в сочетании с современной силовой электроникой.

Основная часть массовых применений (насосы, вентиляторы, конвейеры, компрессоры и т.д.) требует относительно небольшого диапазона регулирования скорости при невысоком быстродействии, что оправдывает использование структуры скалярного управления. Для быстродействующих приводов (станки, роботы, транспортные средства) необходимо применять более сложные структуры управления – векторные [1].

Новейшие и перспективные системы управления электроприводами (СУП) разрабатываются с ориентацией на полную автоматизацию технологических процессов и слаженную работу нескольких приводов в составе одной системы, которая управляется посредством микроконтроллера (МК). Поэтому существенные затраты при создании подобной системы управления приходится на разработку алгоритмического и программного обеспечения.

Немаловажно что, векторные СУП требуют для своей реализации высокопроизводительных микроконтроллеров, имеющих набор встроенных периферийных устройств, которые обеспечивают совместную работу и потребляют минимум ресурсов на обслуживание. Более детально необходимая периферия будет рассмотрена далее.

Рассмотрим систему управления, структурная схема которой показана на рис.1. В состав СУП входят: блок управления приводом, синхронный трехфазный двигатель с дублированными статорными обмотками, одноступенчатый редуктор, два датчика угла для получения информации об угловом положении ротора двигателя, два датчика угла предназначен для получения

СЕКЦИЯ 2. Информационные и управляющие системы
технологическими процессами и системы автоматизации
технологических процессов и производственных комплексов

информации об угловом положении оси. Данная СУП предназначена для разворота силового гироскопа относительно оси подвеса на неограниченный угол в заданных режимах работы со скоростью, соответствующей цифровому управляющему коду скорости.

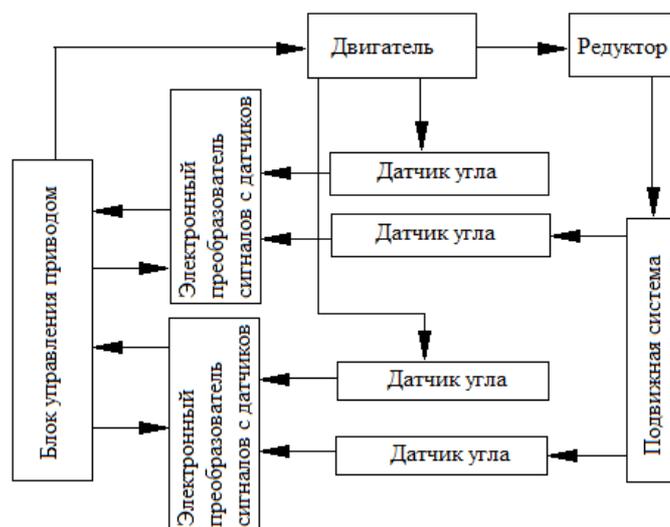


Рисунок 1 - Структурная схема исполнительного привода

Управление приводом производится по следующему алгоритму. На каждом такте управления интегратор скорости вычисляет расчетное значение угла поворота подвижной системы или ротора двигателя. Затем с помощью устройства сравнения определяется величина углового рассогласования между расчетным и фактическим углами поворота, вычисляется выходной параметр ПИД - регулятора контура регулирования угла. Происходит измерение токов в фазах двигателя и с помощью блока вычисления проекций и блока преобразования координат вычисляются проекции вектора тока статора на оси вращающейся декартовой системы координат, оси ординат и абсцисс которой ориентированы по направлениям поперечной и продольной осей ротора. Далее рассчитывается электрический угол поворота ротора двигателя.

Структурная схема КПА, в составе которой реализован подобный исполнительный электропривод показана на рис.2.

Контрольно-поверочная аппаратура предназначена для:

- проведения испытаний специализированных приборов и

СЕКЦИЯ 2. Информационные и управляющие системы
технологическими процессами и системы автоматизации
технологических процессов и производственных комплексов

комплексов;

- автономных, в том числе регламентных, проверок приборов и комплексов при входном контроле;
- проверок изделия в составе объекта (при необходимости).

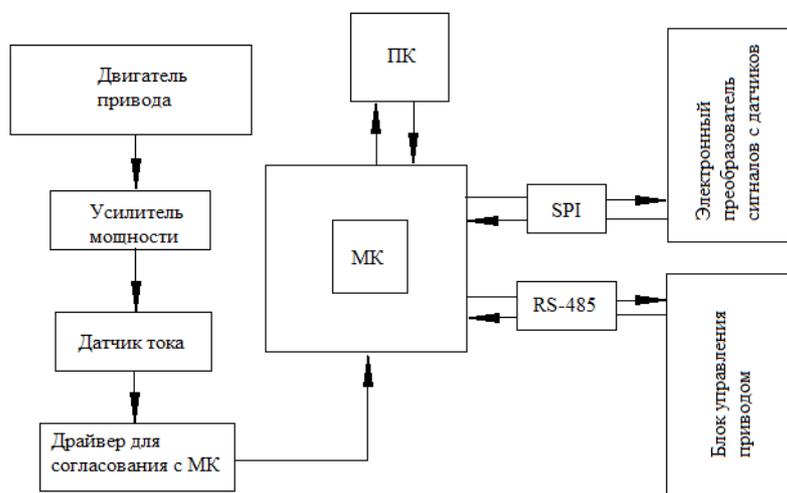


Рисунок 2 – Структура КПА

Основными задачами микроконтроллера являются обмен данными с блоком управления приводом, обмен с управляющей вычислительной системой и формирования управляющих сигналов.

Отработка управляющего кода скорости производится посредством прямого цифрового управления с тактом порядка сотен микросекунд. В каждом такте управления по интерфейсу SPI приходит код угла из электронного преобразователя, производится измерение тока в фазах и формирования через специальный драйвер для согласования логического элемента для формирования сигналов управления силовыми ключами и усилителя мощности токов управления в силовых обмотках двигателя привода, модулированных частотой ШИМ около 25 кГц.

Информационный обмен между аппаратурой верхнего (персональный компьютер оператора) и нижнего уровней (микроконтроллеры на платах) осуществляется через стандартный канал связи (RS-232 или USB). Этот стандарт представляет собой физический уровень для универсального

СЕКЦИЯ 2. Информационные и управляющие системы
технологическими процессами и системы автоматизации
технологических процессов и производственных комплексов

асинхронного интерфейса, также широко известен как последовательный порт персонального компьютера.

Блок управления приводом предназначен для управления двигателем привода и обеспечивает:

- обмен информацией с блоком управления двигателем по интерфейсу асинхронному интерфейсу CAN (RS-485);
- формирование токов управления в силовых обмотках двигателя привода посредством прямого цифрового управления;
- подачу питания 27В на электронный преобразователь и обмен с ним информацией по интерфейсу последовательному периферийному интерфейсу SPI.

Электронный преобразователь предназначен для формирования тока углов подвеса гироскопа и вала двигателя исполнительного электропривода и передачи их значений в блок управления приводом.

При выборе МК для управления двигателем необходимо обращать внимание на следующие особенности:

- наличие встроенного ШИМ-генератора;
- наличие встроенного канала АЦП;
- наличие параллельных портов для подключения датчиков обратной связи [1];

В качестве микроконтроллера, который является наиболее пригодным для стабильного выполнения рассмотренных выше задач, был выбран разработанный отечественной фирмой «ПКК Миландр» 32-разрядный микроконтроллер 1986BE1T, структурная схема которого представлена на рис. 3 [2].

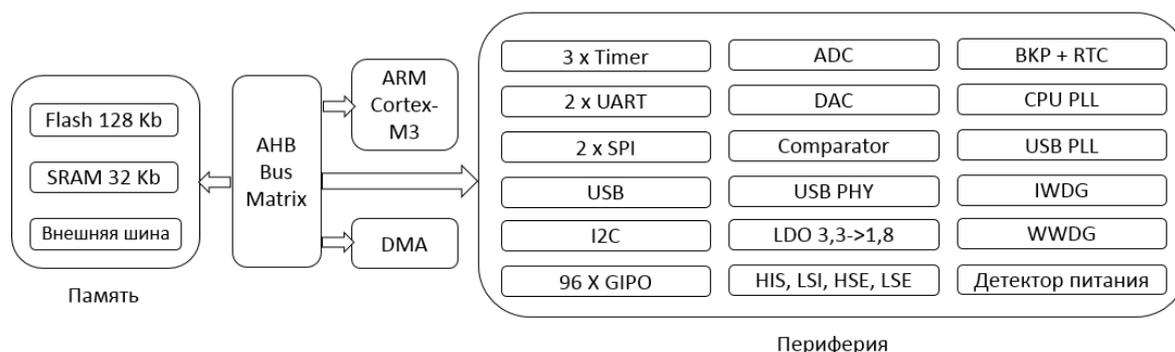


Рисунок 3 - Структурная схема СБИС 1986BE1T

СЕКЦИЯ 2. Информационные и управляющие системы
технологическими процессами и системы автоматизации
технологических процессов и производственных комплексов

Этот микроконтроллер был разработан специально для авиационного применения, в котором, согласно рис. 3, все необходимое собрано в одной микросхеме. Так как главной задачей, которую решают МК, применяемые в авиационной технике, является управление двигателями и приводами. МК содержит в составе периферийных устройств четыре универсальных 32-разрядных таймера, причем каждый имеет четыре канала схемы захвата или ШИМ [3].

В состав КПА входят множество различных плат управления, тестирования, отладки разнообразных блоков, которые осуществляют обмен данными по различным интерфейсам и каждый из них должен обеспечивать стабильную и надежную работу, что может быть достигнуто применением мощного МК.

Контрольно-проверочная аппаратура, имеющая в своем составе исполнительный привод должна обеспечивать:

- совместную работу всех блоков КПА;
- тарировку (проверка показаний, регулирование и настройка прибора) измерителя углового положения;
- вывод информации со штатного и технологического датчиков об угловом положении преобразователя сигналов, токах фазы, проекции токов управления двигателем с тактом работы блока управления приводом и осредненной скорости за n тактов;
- задание коэффициентов регуляторов блока управления приводом непосредственно с персонального компьютера;
- измерение мощности, потребляемой исполнительным электроприводом.

Таким образом, современный электропривод представляет собой систему управления, в которую неотъемлемо входят электромеханический преобразователь энергии (двигатель), силовой преобразователь и устройство управления. Показаны возможности применения электропривода под управлением микроконтроллера в составе КПА, технических особенностях критериев выбора МК и реализации алгоритма управления двигателем.

Список литературы

1. Алексеев К.Б., Палагута К.А. Микроконтроллерное управление электроприводом. Учебное пособие. — М.: МГИУ, 2008. — 298 с.
2. [Электронный ресурс] <http://milandr.ru/>
3. Андреев А., Шумилин С. «Новый отечественный микроконтроллер 1986BE1T для авиационной техники». «Компоненты и технологии», 07.2012, с. 12-14.

УДК 621.3.06

АВТОМАТИЗАЦИЯ РАСЧЁТА САМОЗАПУСКА
ДВУХСКОРОСТНЫХ АСИНХРОННЫХ МАШИН НА ОСНОВЕ
ПРИМЕНЕНИЯ ЯЗЫКА ПРОГРАММИРОВАНИЯ JAVASCRIPT

А. А. Шевченко, З. С. Темлякова, В. В. Гречкин

*Федеральное государственное бюджетное образовательное
учреждение высшего образования Новосибирский
государственный технический университет, Новосибирск*

Рассматривается возможность оптимального подбора двухскоростных асинхронных двигателей под заданные типы нагрузочных характеристик путём вычисления времени самозапуска при аварийных снижениях напряжения сети.

Ключевые слова: двухскоростной асинхронный двигатель, выбег ротора, самозапуск, математическое моделирование, автоматизация

Неотъемлемым звеном в автоматизации производственных процессов является автоматическое восстановление работы электродвигателей после кратковременного нарушения электроснабжения, сопровождаемого выбегом ротора. Выбег есть выход ротора из номинального скольжения при отключении или снижении напряжения. Физическая картина процесса следующая: при временном исчезновении или снижении напряжения двигателя ответственных механизмов не отключаются и одновременно с

СЕКЦИЯ 2. Информационные и управляющие системы
технологическими процессами и системы автоматизации
технологических процессов и производственных комплексов

восстановлением напряжения на шинах электроснабжающей установки пускаются автоматически, без участия персонала. Ввиду кратковременности коротких замыканий в сетях, вызывающих подобные снижения или исчезновения напряжения, двигатели не успевают остановиться и технологический процесс производства не нарушается.

Весь процесс расчёта автоматизирован и сведён в программный продукт, написанный на языке программирования JavaScript. Выбор данного языка обусловлен тем фактом, что JavaScript относится к интерпретируемым языкам программирования. В отличие от компилируемых языков типа C, C++, C# Java как и другие интерпретируемые языки читается медленнее, исходный код находится в открытом доступе, для работы над сценариями отсутствует потребность в дополнительном программном обеспечении, а интерпретатором может выступить любой интернет-обозреватель. Кроме того, привязка сценариев JavaScript к рабочей среде обозревателя делает их менее чувствительными к платформе и операционной системе пользователя. Ещё одним достоинством данного языка программирования является возможность совмещать разные типы данных в массивах, в том числе и другие массивы, создавая тем самым многомерные массивы, что существенно облегчает процесс написания программ.

В качестве исследуемого двигателя выбран двухскоростной асинхронный двигатель трёхфазного тока с короткозамкнутым ротором 2АДО-800/500-6000-8/10 У1М производства НПО «ЭЛСИБ» [1]. Данный двигатель предназначен для привода тягодутьевого оборудования электростанций, а также привода аналогичных механизмов в различных областях промышленности. Полученные данные численных и аналитических расчётов для обоих скоростных режимов двигателя верифицированы опытными данными. Даны предложения по оптимизации параметров асинхронного двигателя и приводного механизма.

По работе сделаны следующие выводы:

1. Неправильный подбор элементов электроустановок, в частности, крупных асинхронных двигателей под заданные типы

СЕКЦИЯ 2. Информационные и управляющие системы
технологическими процессами и системы автоматизации
технологических процессов и производственных комплексов

нагрузочных характеристик приводит к тому, что условия самозапуска не выполняются.

2. Во избежание недопустимой остановки технологического процесса необходима оптимизация технологических параметров пары «двигатель-механизм» на профессиональном уровне.

Литература:

1. Темлякова З.С., Гречкин В.В., Соловейчик Ю.Г., Персова М.Г. Компьютерная поддержка проектирования высоковольтных асинхронных двигателей // Электротехника, 2014. - № 12. – С. 33-35.

УДК 681.51

ПОВЫШЕНИЕ ЭНЕРГОЭФФЕКТИВНОСТИ СИСТЕМ
УПРАВЛЕНИЯ АВТОНОМНЫХ ЭЛЕКТРОЭНЕРГЕТИЧЕСКИХ
ОБЪЕКТОВ

**В. Ф. Шишлаков¹, А. В. Шишлаков², Н.В. Решетникова¹, Е.Ю.
Ватаева¹**

*Санкт-Петербургский государственный университет
аэрокосмического приборостроения¹, Санкт-Петербург,
АО «Концерн «Научно-производственное объединение
«Аврора»»², Санкт-Петербург*

Рассматривается решение задачи повышения энергоэффективности систем управления автономных электроэнергетических комплексов путем оптимизации алгоритмов управления на примере электроэнергетического комплекса со сверхпроводниковым оборудованием.

Ключевые слова: алгоритмы управления, электроэнергетический комплекс, энергоэффективность.

Проблемы повышения энергоэффективности и энергосбережения на этапах выработки, транспортировки и потребления энергии являются одними из самых актуальных для современной науки и техники. Основные направления решения проблемы можно разделить на две крупные группы: разработка энергоэффективных элементов и устройств и построение

СЕКЦИЯ 2. Информационные и управляющие системы
технологическими процессами и системы автоматизации
технологических процессов и производственных комплексов

эффективных алгоритмов функционирования электроэнергетических комплексов. Поэтому разработка методов синтеза алгоритмов управления сложными существенно нелинейными многорежимными системами автоматического управления (САУ) электроэнергетическими объектами, позволяющими повысить энергоэффективность систем и комплексов путем оптимизации режимов работы представляет собой актуальную задачу.

В электроэнергетических системах и комплексах, в том числе децентрализованной энергетике широко используются регуляторы, ориентированные на управление в окрестности некоторой рабочей точки (аналоговые ПИД-регуляторы). В последние годы происходит постепенное внедрение интеллектуальных регуляторов на базе нечеткой (fuzzy control), нейронной (neural control) или нейронечеткой (neurofuzzy) технологии, которые служат эффективной заменой традиционным регуляторам. Основным смыслом этого инновационного процесса заключается в том, что интеллектуальный регулятор позволяет описать нелинейный закон управления, расширяющий рабочий диапазон и улучшающий показатели качества переходных процессов.

Вместе с тем, в настоящее время отсутствуют универсальные методики синтеза интеллектуальных регуляторов, поскольку их конструирование требует обработки знаний о поведении сложного объекта, извлечение которых основано на широком использовании имитационных процедур и методов глобальной оптимизации. Интеллектуальный регулятор может быть реализован на базе современных контроллеров, обладающих высокими вычислительными возможностями, что в сочетании с их низкой стоимостью позволяет эффективно реализовывать систему управления.

В качестве объекта управления рассматривается электроэнергетический комплекс [1–4], структура которого показана на рис. 1.

Устройства, работающие на основе эффекта высокотемпературной сверхпроводимости (ВТСП) и входящие в состав электроэнергетического комплекса имеют определенные специфические особенности функционирования. С точки зрения

СЕКЦИЯ 2. Информационные и управляющие системы
технологическими процессами и системы автоматизации
технологических процессов и производственных комплексов

динамических процессов и построения алгоритма управления ВТСП генератор является существенно более сложным элементом системы, чем генераторы традиционного исполнения с обмотками из меди, что обусловлено следующим:

- в процессе работы генератора (при изменении параметров нагрузки) сверхпроводниковая обмотка не должна переходить в резистивное состояние, поскольку в случае этого перехода ее сопротивление резко увеличивается, что может привести к выходу генератора из строя. Причиной такого перехода, в частности, может стать резкое изменение скорости нарастания тока в ВТСП обмотке при скачках нагрузки. Поэтому переход ВТСП обмотки в резистивное состояние с точки зрения построения алгоритма управления должен рассматриваться как аварийный режим работы электроэнергетического комплекса.
- переход сверхпроводящей обмотки в резистивное состояние может произойти не только в случае перегрузок со стороны потребителя, но и при ухудшении условий охлаждения, что для погружной электрической машины, прежде всего, может быть связано с расходом хладагента. Расход хладагента должен контролироваться системой автоматического управления (САУ) и при уменьшении уровня ниже критического значения САУ должна обеспечивать подачу хладагента в генератор.

Создание систем управления электроэнергетическими объектами предполагает синтез алгоритма управления с помощью программного комплекса, реализующего метод решения задач синтеза и оптимизации нелинейных систем, математическую основу которого составляет обращение обобщенного метода Галеркина.

Обобщенный метод Галеркина дает возможность синтезировать параметры алгоритма управления односвязных и многосвязных САУ любых структур и порядков, так непрерывных, так и с различными видами модуляции сигнала (амплитудно-частотно-широтно-импульсная) при различных видах аппроксимации характеристик нелинейных элементов (кусочно-линейная, алгебраическая, аналитическая, аппроксимация иррациональными функциями) [5–8]. Программный комплекс дает возможность осуществлять проектирование САУ указанного

СЕКЦИЯ 2. Информационные и управляющие системы
технологическими процессами и системы автоматизации
технологических процессов и производственных комплексов

класса с оптимизацией параметров по показателям качества функционирования в динамических режимах, учитывающих энергосберегающие критерии.

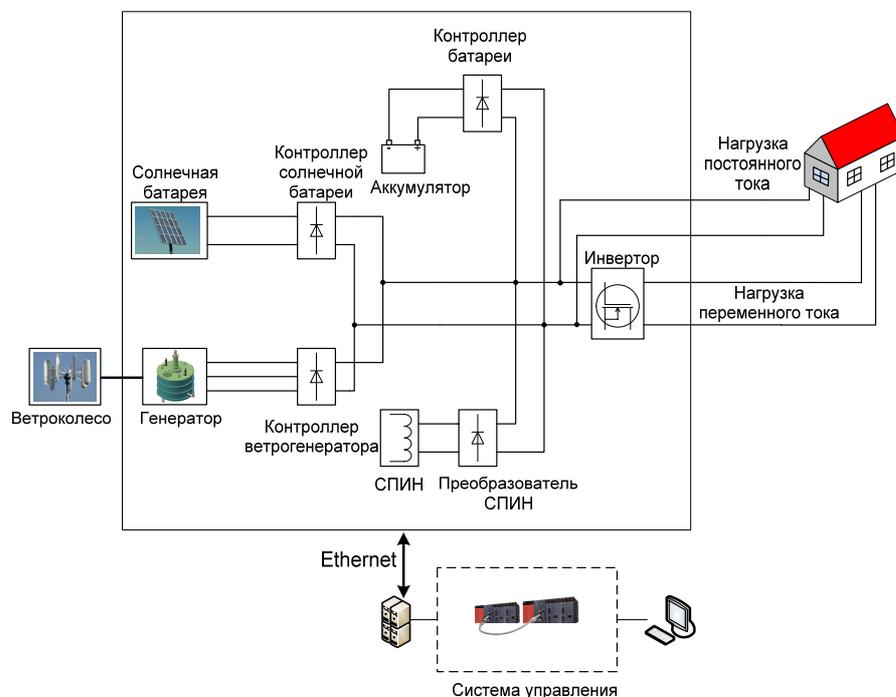


Рисунок 1 – Структурная схема комплекса

Программный комплекс, реализующий обобщенный метод Галеркина, построен по блочно-модульному принципу, что делает его универсальным и дает возможность использовать основной блок комплекса для синтеза элементов, устройств и систем управления различных классов и структур, динамика которых описывается дифференциальными уравнениями произвольного (в общем случае n -го) порядка.

Входящие в состав системы расчета программы объединены общим интерфейсом (рис.2, 3), с помощью которого на этапе ввода информации о синтезируемой системе формируется программное обеспечение для решения задачи синтеза алгоритма управления конкретной САУ. По запросам программы в диалоговом режиме требуется: задать класс рассматриваемой системы (линейная или нелинейная); определить тип модулятора, стоящего в САУ (или в случае непрерывной системы указать на его отсутствие); задать вид и параметры внешнего входного воздействия и желаемого

СЕКЦИЯ 2. Информационные и управляющие системы
технологическими процессами и системы автоматизации
технологических процессов и производственных комплексов

программного движения; из каталога нелинейных характеристик выбрать требуемые и задать их параметры; задать количество варьируемых параметров и границы изменения их возможных значений; определить число этапов и точность поиска значений варьируемых параметров, а также количество шагов на каждом этапе.

В результате работы программы определяются значения варьируемых параметров, доставляющие минимум соответствующей целевой функции, что является косвенной оценкой степени приближения процесса в САУ с синтезированными параметрами к заданному желаемому программному движению. Полученные в результате решения задачи синтеза параметры будут обеспечивать в САУ приближенное воспроизведение заданных показателей качества ее работы в переходном режиме.

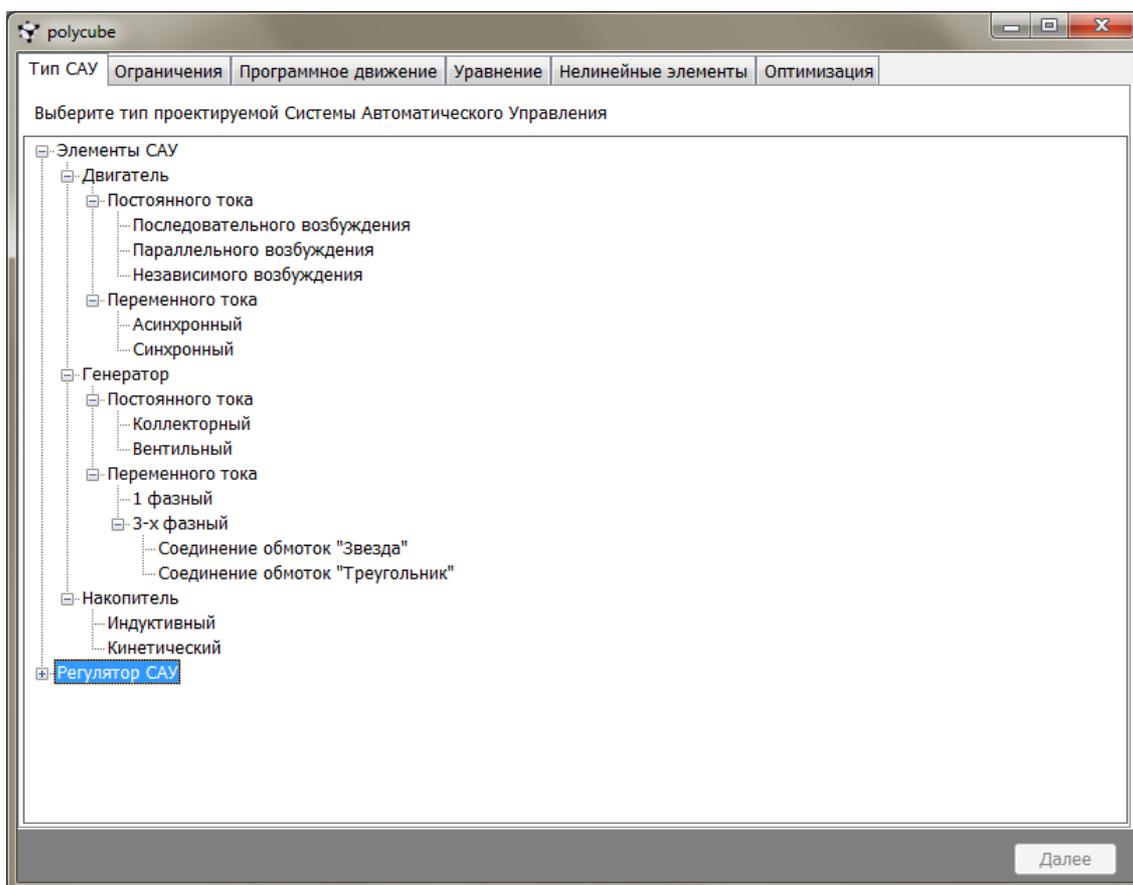


Рисунок 2 – Интерфейс программы расчета параметров регуляторов САУ (элементы и устройства, входящие в состав системы)

СЕКЦИЯ 2. Информационные и управляющие системы технологическими процессами и системы автоматизации технологических процессов и производственных комплексов

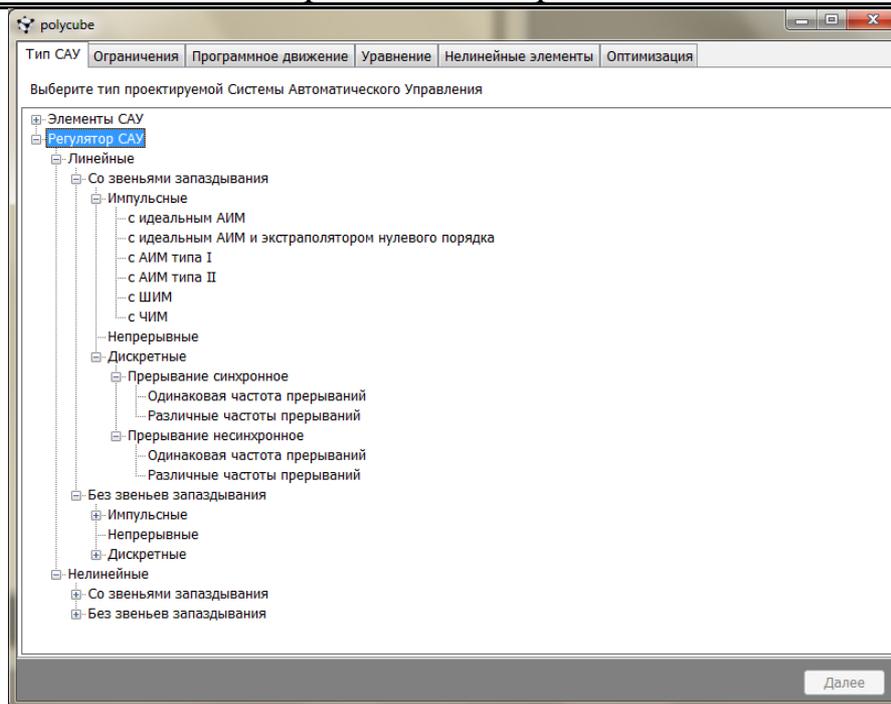


Рисунок 3 – Интерфейс программы расчета параметров регуляторов САУ (регулятор)

Если же в области заданных ограничений на значения параметров c_k не будет найдено ни одно сочетание искомых параметров, обеспечивающее выполнение условий устойчивости или минимизации целевой функции, то программа выдаст соответствующую информацию. В этом случае пользователю программного комплекса следует повторить решение задачи после выполнения следующих рекомендаций:

- изменить ограничения на значения варьируемых параметров;
- изменить параметры желаемого программного движения;
- усложнить структуру синтезируемого регулятора.

Все указанные рекомендации возможно выполнить, если это допускается условиями проектирования. Обоснованность подобных рекомендаций обусловлена следующим. При проектировании нелинейных САУ достаточно сложно задать заведомо реализуемое при заданной структуре системы и регулятора программное движение. Поэтому изменение параметров программного движения или структуры регулятора, равно, как и технических ограничений на значения искомых параметров может позволить решить задачу параметрического синтеза проектируемой системы управления

Список литературы

1. Цветков С. А., Шишлаков В. Ф., Шишлаков Д. В. Синтез и моделирование автономной электроэнергетической установки // «Информационно-управляющие системы», №4, 2008, С.12– 14
2. Цветков С. А., Шишлаков В. Ф., Шишлаков Д. В. Исследование аномальных режимов работы автономной электроэнергетической установки // «Информационно-управляющие системы», №1, 2009, С.15-20.
3. Турубанов М.А., Шишлаков В.Ф., Шишлаков А.В. Импульсная система управления комбинированной солнечно- и ветроэнергетической установкой со сверхпроводниковым оборудованием // «Информационно-управляющие системы», №3, 2014, С.8-18.
4. Чубраева Л.И., Ронжин Ан. Л., Шишлаков А.В., Ронжин Ал. Л., Шишлаков В.Ф. Концепция построения интеллектуальных защищенных систем управления для объектов децентрализованной энергетики //Труды СПИИРАН, вып. №2 (33), 2014. С.207 – 227.
5. Никитин А. В., Шишлаков В. Ф. Параметрический синтез нелинейных систем автоматического управления: Монография / Под. Ред. В. Ф. Шишлакова. – СПб. СПбГУАП, 2003. – 358с.
6. Шишлаков В. Ф., Шишлаков Д. В. Параметрический синтез многосвязных систем автоматического управления во временной области //изв. Вузов сер. Проблемы энергетики, №12, 2006. С.49-54.
7. Цветков С. А., Шишлаков В. Ф., Шишлаков Д. В. Синтез многосвязных систем автоматического управления во временной области // изв. Вузов сер. Приборостроение. 2007. №12. С.13-17.
8. Шишлаков В.Ф., Анисимова Е.В., Шишлаков А.В., Шишлаков Д.В. Синтез параметров закона управления для нелинейных САУ при различных видах аппроксимации характеристик // изв. Вузов сер. Приборостроение. 2015. №9.т.58 С.49-54.

УДК 629.421.4

ПОВЫШЕНИЕ МОЩНОСТИ ТЯГОВОГО ЭЛЕКТРОПРИВОДА МАНЕВРОВЫХ ЛОКОМОТИВОВ ПУТЕМ УСТАНОВКИ НАКОПИТЕЛЕЙ ЭЛЕКТРИЧЕСКОЙ ЭНЕРГИИ

А.А. Штанг, М.В. Ярославцев

*Федеральное государственное бюджетное образовательное
учреждение высшего образования Новосибирский
государственный технический университет, г. Новосибирск*

Предложено использование контактно-аккумуляторных электровозов для выполнения маневровой работы на электрифицированных линиях железных дорог. Определены параметры тяговой энергоустановки и показаны её преимущества.

Ключевые слова: маневровый локомотив, контактно-аккумуляторный электровоз, литий-ионный аккумулятор, топливная экономичность, накопитель энергии.

Рост стоимости топлива и ужесточение экологических требований к железнодорожному транспорту стимулируют поиск технических решений, повышающих энергетическую эффективность маневровых локомотивов, обладающих наименьшим эксплуатационным КПД по сравнению с локомотивами, занятыми в поездной работе. Так, продолжительность работы двигателя эксплуатируемых тепловозов на холостом ходу, как правило, достигает 70-75% и в отдельных случаях больших значений [1]. Возможным решением проблемы является применение на электрифицированных линиях железных дорог контактно-аккумуляторных маневровых электровозов с накопителями энергии (НЭ) на основе литий-ионных аккумуляторов.

Авторами выполнен расчет параметров накопителя по методике [2] для локомотива на основе существующего тепловоза ТЭМ18 для случая, в котором 40% 8-часовой смены локомотив работает с номинальной мощностью, из них 60% времени в автономном режиме. Расчетная энергоемкость НЭ равна 7 ГДж [3]. Оценочная масса НЭ

СЕКЦИЯ 2. Информационные и управляющие системы
технологическими процессами и системы автоматизации
технологических процессов и производственных комплексов

составляет 35 т, а его объем 30 м³, что позволяет разместить НЭ на локомотиве с учетом демонтажа дизель-генераторной установки (ДГУ). Автором выполнена оценка экономии топлива, предложена функциональная схема маневрового электровоза.

Наличие резерва по мощности источника энергии как в автономном, так и в контактном режимах делает оправданным увеличение мощности тяговых электродвигателей локомотива. Замена ДГУ аккумуляторной батареей обеспечивает свободу компоновки локомотива, позволяет существенно сократить затраты на его техническое обслуживание и достичь экономии за счет меньшей стоимости электроэнергии по сравнению с дизельным топливом. При сравнении стоимость жизненного цикла контактно-аккумуляторного тепловоза с локомотивом на газовом топливе показатели становятся близки. В то же время, прогнозируемое снижение стоимости литий-ионных НЭ обуславливает эффективность реализации локомотивов по предложенной схеме.

Литература.

1. Щуров Н. И., Гурова Е. А., Макаров С. В., Стрельникова Д. М. Анализ режимов работы силовых установок маневровых локомотивов // Современные проблемы науки и образования. – 2014. – №3. – С. 104.

2. Ярославцев М. В. Выбор основных параметров тягового привода гибридного транспортного средства // Электротехника. Энергетика. Машиностроение (ЭЭМ–2014): сб. науч. тр. 1 междунар. науч. конф. молодых ученых, Новосибирск, 2–6 дек. 2014 г. В 3 ч. – Новосибирск: Изд-во НГТУ, 2014. – Ч. 1. Секция «Электротехника». – С. 290-293.

3. Штанг А. А. Контактно-аккумуляторный маневровый электровоз с накопителем энергии на основе литий-ионных аккумуляторов = Battery-electric shunting locomotive with lithium-ion storage batteries / А. А. Штанг, М. В. Ярославцев // Электроника и электрооборудование транспорта. – 2016. – № 1. – С. 13-16.

УДК 62-838

РАСЧЕТ ЭНЕРГОЕМКОСТИ БУФЕРНОГО НАКОПИТЕЛЯ
ГИБРИДНОГО ТЯГОВОГО ПРИВОДА ПО
ЭКСПЕРИМЕНТАЛЬНЫМ ЗАПИСЯМ ЦИКЛА ДВИЖЕНИЯ
ТРАНСПОРТНОГО СРЕДСТВА

М.В. Ярославцев, В.Н. Аносов

*Федеральное государственное бюджетное образовательное
учреждение высшего образования Новосибирский
государственный технический университет, г. Новосибирск*

Определена энергоемкость накопителя энергии гибридного автобуса на основании экспериментальной записи цикла движения. Выполнен статистический анализ цикла движения. Показаны возможные области применения полученных результатов.

Ключевые слова: гибридное транспортное средство, комбинированная энергетическая установка, буферный накопитель энергии, цикл движения, энергоемкость.

По мере развития средств накопления и преобразования энергии, повышения уровня требований по защите окружающей среды и роста стоимости энергоресурсов приобретает актуальность создание гибридных транспортных средств (ТС). Такие транспортные средства имеют энергоустановку, состоящую из первичного источника энергии (теплового двигателя либо топливного элемента) и промежуточного её накопителя (аккумулятора либо суперконденсатора). Высокая стоимость накопителей энергии определяет необходимость выбора основных параметров и способов управления энергетической установкой, обеспечивающих минимизацию необходимой энергоемкости накопительного устройства (НЭ). Авторами предложен метод определения необходимой энергоемкости НЭ по циклу его движения [1, 2]. При решении этой задачи на основании зависимости скорости движения ТС от времени находится потребляемая тяговым электроприводом мощность. Необходимая энергоемкость определяется интегрированием мощности тягового привода с учетом работы первичного источника энергии. При

СЕКЦИЯ 2. Информационные и управляющие системы
технологическими процессами и системы автоматизации
технологических процессов и производственных комплексов

решении задачи принят алгоритм работы тягового привода, предусматривающий ограничение длительности работы первичного источника энергии с целью поддержания запаса энергоемкости НЭ на прием энергии торможения.

Для определения энергоемкости НЭ гибридного автобуса использованы экспериментальные записи циклов движения троллейбуса, работающего по одному из маршрутов в г. Новосибирске. Выполнен анализ потребления мощности тяговым приводом как случайного процесса, показаны его стационарность и эргодичность, что подтверждает возможность распространения полученных данных на другие транспортные средства. Получена зависимость энергоемкости накопителя энергии от мощности первичного источника энергии гибридной энергоустановки.

Показано, что минимальная мощность ПИЭ для ГТС без заряда накопителя от внешнего источника составляет 35 кВт. Рекомендуемая энергоемкость буферного накопителя гибридного автобуса составляет 1,5 – 2 МДж при мощности генератора 150 кВт. По мере снижения стоимости накопителей энергии возможно сокращение мощности генератора до 35-50 кВт с увеличением энергоемкости БНЭ до 7 МДж. Выбор конкретных значений мощности ПИЭ и энергоемкости БНЭ может быть выполнен из соображений минимизации стоимости тягового привода, что требует повышения мощности генератора.

Литература

1. Ярославцев М. В. Выбор основных параметров тягового привода гибридного транспортного средства // Электротехника. Энергетика. Машиностроение (ЭЭМ–2014): сб. науч. тр. 1 междунар. науч. конф. молодых ученых, Новосибирск, 2–6 дек. 2014 г. В 3 ч. – Новосибирск: Изд-во НГТУ, 2014. – Ч. 1. Секция «Электротехника». – С. 290-293.

2. Yaroslavtsev M. V. Assessment of performance factors of hybrid electric vehicle powertrain / M. V. Yaroslavtsev, N. I. Schurov, E. A. Belova // Applied Mechanics and Materials. - 2015. – Vol. 698 : Electrical Engineering, Energy, Mechanical Engineering, EEM 2014. – P. 7-11.

СЕКЦИЯ 2. Информационные и управляющие системы
технологическими процессами и системы автоматизации
технологических процессов и производственных комплексов

СЕКЦИЯ 3

Силовое оборудование, преобразовательная техника и микропроцессорные системы управления

УДК 621.314.25

ЭНЕРГОЭФФЕКТИВНЫЙ ДВЕНАДЦАТИПУЛЬСНЫЙ ВЫПРЯМИТЕЛЬ

М.Е. Вильбергер, Д.Д. Никифоров

*Федеральное государственное бюджетное образовательное
учреждение высшего образования Новосибирский
государственный технический университет, Новосибирск*

В работе рассмотрены три схемных решения выпрямительных агрегатов с точки зрения их устойчивости к несимметрии и несинусоидальности напряжений питающей сети. Такое исследование позволило выявить наиболее устойчивую топологию

Ключевые слова: выпрямитель, качество, гармоники, ортогональный, несинусоидальность, несимметрия.

В настоящее время в тяговом энергохозяйстве метрополитена г.Новосибирска эксплуатируются тяговые выпрямители, выполненные по шести и двенадцатипульсным схемным решениям. Переход на выпрямители с двенадцатью пульсациями напряжения на выходе позволил: повысить коэффициент мощности тяговой подстанции до 0,97-0,98; снизить состав и уровень гармонических составляющих в кривой потребляемого тока; улучшить форму кривой выпрямленного напряжения, что благоприятно сказывается на работе тяговых электродвигателей.

Множество исследований, направленных на выявление рационального числа пульсаций, показывают, что наибольшей эффективностью обладают выпрямители с пульсностью в диапазоне от 10 до 18. Такой диапазон пульсности выпрямителей обосновывается при исследованиях работы выпрямителей с учетом различных факторов, определяющих качество электрической энергии, например, несимметрии и несинусоидальности напряжений питающей сети. Также нужно учитывать, что эффективность выпрямления может зависеть не только от внешних факторов, но и от топологии построения выпрямителей. В связи с этим огромный интерес должны вызывать разработки и исследования выпрямителей, сочетающих в себе экономичность преобразования, простоту и надежность схемных построений при

работе в условиях несимметричных и несинусоидальных напряжений питающей сети [1,2].

С целью решения поставленной задачи, для каждого выпрямителя были разработаны математические модели, позволяющие определять напряжения на выходе выпрямителя в зависимости от параметров напряжения питающей сети и получены реализации графиков (Рис.1) выпрямленного напряжения.

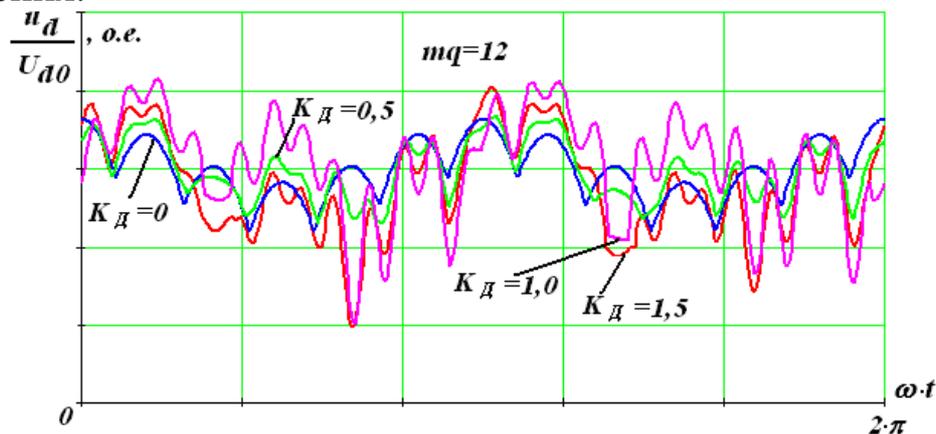


Рисунок 1 - Кривые выпрямленного напряжения ортогонального двенадцатипульсного выпрямителя

В ходе исследования установлено, что размах пульсаций выпрямленного напряжения определяется не только параметрами качества электрической энергии питающей сети, но также зависит от топологии схемного решения выпрямителя.

Литература

1. Работа двенадцатипульсных выпрямителей с учетом несимметрии и несинусоидальности питающих напряжений / Е. А. Барина [Е. А. Белова], Д. М. Стрельникова, М. Е. Вильбергер, А. В. Мятаж // Электро. Электротехника, электроэнергетика, электротехническая промышленность. - 2014. - № 1. - С. 16-18.
2. Сравнительный анализ работы двенадцатипульсных выпрямительных агрегатов различных схемных решений / Д. С. Дмитрушина, М. Е. Вильбергер, С. В. Мятаж, А. И. Журавель // В мире научных открытий. - В мире научных открытий. - Научно-инновационный центр; Красноярск. - №9.2 (33).- 2013. - С. 274-290.

УДК 621.314. 21

ВИДОВОЕ РАСПРЕДЕЛЕНИЕ КАБЕЛЕЙ ГОРОДСКИХ ПОДСТАНЦИЙ

Ю.С. Горина, Е.С. Кузнецова

*Сибирский государственный индустриальный университет
г. Новокузнецк*

В данной работе рассмотрено распределение кабелей городских подстанций по виду и параметру, проведен анализ кабельных систем.

Ключевые слова: техноценоз, кабель, мощность, сечение кабеля, видовое распределение, марка кабеля.

Кабели – это изолированные проводники, которые служат для передачи электрического тока в земле, воде и на воздухе.

Силовые кабели переменного тока с резиновой изоляцией выполняют на напряжения 0,66-10 кВ, кабели с пластмассовой изоляцией на 1,0-35 кВ, с бумажной пропитанной изоляцией на 1,0-500 кВ. В зависимости от назначения и условий применения кабели имеют различную конструкцию. Основными конструктивными элементами кабеля являются: токоведущие жилы, изоляция, защитная оболочка, броня и наружный покров. Кабели могут иметь все перечисленные элементы или некоторые из них.

В городской сети используются 959 кабельных линий, общей протяженностью 578227 м, которые можно разделить на семь типов по марке кабеля и девять типов по сечению кабеля. Кабельная сеть города образует техноценоз, где особи – кабельные линии. Они имеют слабые связи, а взаимосвязанность техноценоза определяется конечной целью – передача электрической энергии.

Термин «техноценоз» и ценологический подход предложены в 1974 г. Б.И. Кудриным, который определяет техноценоз как сообщество всех изделий, включающее все популяции; ограниченное в пространстве и времени, имеющее слабые связи и слабые взаимодействия элементов (изделий), образующих систему искусственного происхождения, которая характеризуется несопоставимостью времени жизни ценоза и особи, невозможностью выделения однозначной системы показателей. Устойчивость технической системы обусловлена действием

законов энергетического и информационного отборов по аналогии с живыми системами, где действует закон естественного отбора.

Проведен анализ по параметру и типу используемых кабелей. В качестве параметра было использовано сечение кабеля.

В таблице 1 и на рисунке 1 приведены параметры распределения по сечению кабельных линий. Самое распространенное сечение 120 мм^2 .

Таблица 1 – Ранговое и видовое распределение кабельных линий в городских сетях

Ранг	Сечение, мм^2	n, шт
1	240	76
2	185	78
3	150	154
4	120	301
5	95	160
6	70	71
7	55	54
8	50	53
9	25	4

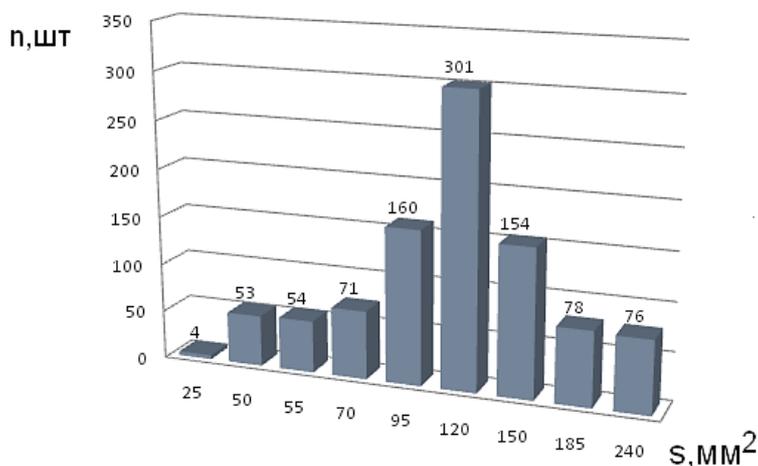


Рисунок 1 – Распределение по сечению кабельных линий

В таблице 2 и на рисунке 2 приведены параметры распределения по марке кабельных линий. Самая большая встречаемость у кабелей марки АСБ (кабель с бумажной пропитанной изоляцией с алюминиевой жилой в свинцовой оболочке, с броней из стальных лент с защитными покровами из кабельной пряжи, пропитанной битумом).

Таблица 2 – Марки и длины кабельных линий

Марка кабеля	п, шт	Длина, м
АСБ	421	241688
ААШВ	157	105238
ААБ	139	76410
А	109	96683
СБ	90	38952
ААБЛУ	25	9416
АС	18	9840

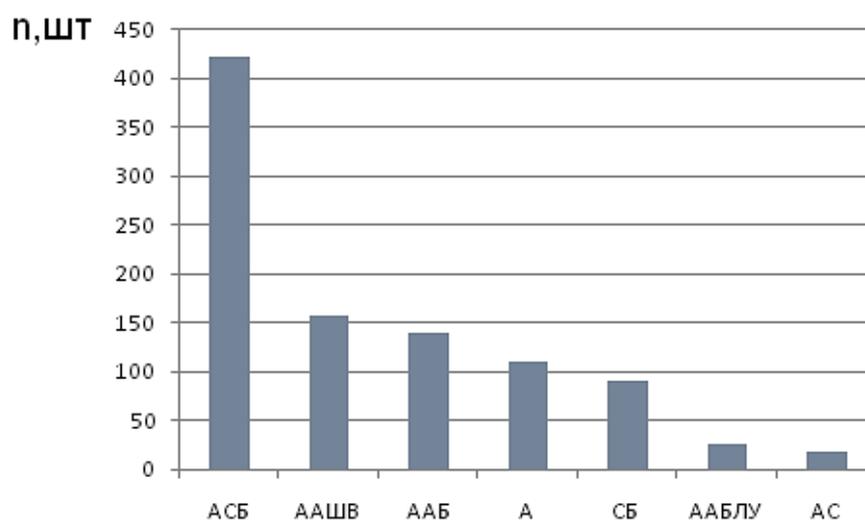


Рисунок 2 – Распределение по марке кабельных линий

На рисунке 3 приведено распределение по рангу кабельных линий.

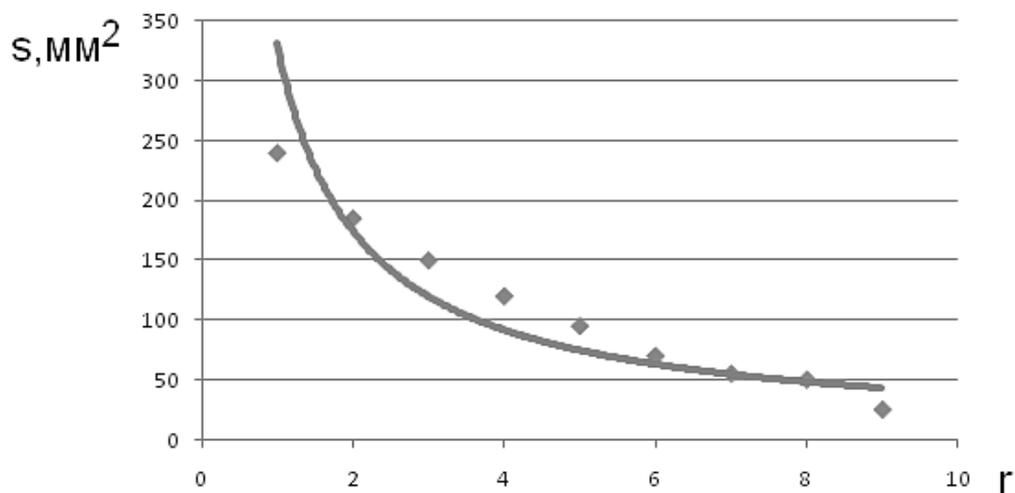


Рисунок 3 – Распределение по рангу кабельных линий

Самый большой процент потерь электроэнергии при ее передаче приходится на кабельные линии, которые зависят от тока нагрузки и сопротивления кабеля. Также на дополнительные потери электроэнергии в кабельных сетях влияют реактивная мощность, качество электроэнергии и срок службы.

Оптимизация видового парка кабельных сетей с учетом техноценологических свойств системы городского электроснабжения позволит рационально выбирать марку, сечения, трассы и длины кабелей.

Список литературы

1. Кудрин, Б.И. Введение в технетику.- 2-е изд. перераб. и доп. / Б.И. Кудрин. - Томск: Изд-во ТГУ, 1993. - 552 с.

2. Кузнецова Е.С., Свирская Г.С., Инжелевская О.В. Анализ параметров графиков электрической нагрузки городских сетей. Автоматизированный электропривод и промышленная электроника. тр. V Всерос. научн. – практ. конф., 2012 / под ред. В.Ю. Островляничка, П.Н. Кунина. – Новокузнецк: Изд-во СибГИУ, 2012. – С.245 – 249.

3. Кузнецова Е.С., Свирская Г.С., Инжелевская О.В. Анализ показателей качества электроэнергии городских сетей. Автоматизированный электропривод и промышленная электроника Труды Шестой Всероссийской научно-практической конференции. Под общей редакцией В.Ю. Островляничка. – Новокузнецк: Изд-во СибГИУ, 2014. С. 254-258.

4. Кузнецова Е.С., Свирская Г.С., Дивин Г.В., Карачевцев И.О. Анализ реактивной мощности городских подстанций. Автоматизированный электропривод и промышленная электроника Труды Шестой Всероссийской научно-практической конференции. Под общей редакцией В.Ю. Островляничка. – Новокузнецк: Изд-во СибГИУ, 2014. С. 258-261.

5. Кочуганов И.Г., Кузнецова Е.С. Пути энергосбережения в сфере ЖКХ. Наука и молодежь: проблемы, поиски, решения Труды Всероссийской научной конференции студентов, аспирантов и молодых ученых. Под общей редакцией Л.П. Мышляева. 2011. С. 345-347.

УДК 621.314. 21

ВИДОВОЕ РАСПРЕДЕЛЕНИЕ ТРАНСФОРМАТОРОВ ГОРОДСКИХ ПОДСТАНЦИЙ

А. В. Дроздова, Е.С. Кузнецова

*Сибирский государственный индустриальный университет
г. Новокузнецк*

В данной работе рассмотрено распределение трансформаторов городских подстанций по параметру, проведен анализ загрузки трансформаторов.

Ключевые слова: техноценоз, трансформатор, мощность, электрические потери, видовое распределение, перегрузка сетей, подстанция.

Электропотребление как процесс преобразования электрической энергии в другие виды энергии является конечным процессом цикла производства, преобразования, трансформации, передачи, распределения и потребления электрической энергии. Электроснабжение города осуществляется от двух ТЭЦ, десяти ПС 110 кВ и десяти ПС 35 кВ. Далее потребители получают энергию через 979 трансформаторов различной мощности.

Проведен анализ по параметру используемых 979 трансформаторов, установленных в городских подстанциях. Для группировки в качестве параметра была использована мощность установленных трансформаторов. Больше всего на подстанциях используются трансформаторы с мощностью 630 кВА и 400 кВА. Реже используются трансформаторы с мощностью 320 кВА, 250 кВА и 180 кВА, еще меньшее количество трансформаторов применяются с мощностью равной 560 кВА, 200 кВА и 240 кВА.

В таблице 1 и на рисунке 1 приведены параметры распределения по параметру.

Трансформаторные подстанции города образуют техноценоз, где особи – трансформаторы. Они имеют слабые связи, а взаимосвязанность техноценоза определяется конечной целью – преобразование, распределение и передача электрической энергии.

Таблица 1 – Ранговое и видовое распределение трансформаторов в городских сетях

Ранг	Мощность, кВА	Кол-во особей, шт
1	1000	13
2	630	291
3	560	12
4	400	334
5	320	124
6	315	18
7	250	90
8	240	5
9	200	9
10	180	50
11	160	17
12	100	16

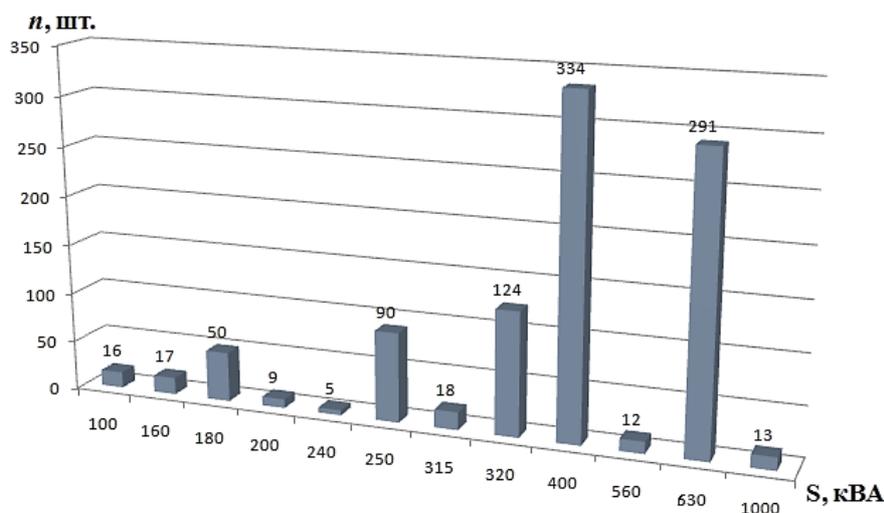


Рисунок 1 – Распределение по параметру мощности трансформаторов

Термин «техноценоз» и ценологический подход предложены в 1974 г. Б.И. Кудриным, который определяет техноценоз как сообщество всех изделий, включающее все популяции; ограниченное в пространстве и времени, имеющее слабые связи и слабые взаимодействия элементов (изделий), образующих систему искусственного происхождения, которая характеризуется несопоставимостью времени жизни ценоза и особи, невозможностью выделения однозначной системы показателей. Устойчивость технической системы обусловлена действием

законов энергетического и информационного отборов по аналогии с живыми системами, где действует закон естественного отбора.

На рисунке 2 представлено ранговое распределение, которое представляет собой зависимость количества технических особей (трансформаторов).

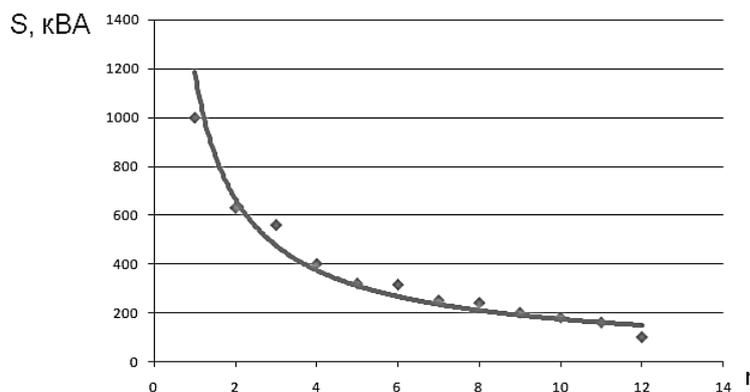


Рисунок 2 – Ранговое распределение трансформаторов на городских подстанциях

Анализ загрузки трансформаторного оборудования показал, что в некоторых случаях трансформаторы перегружены. Уменьшается пропускная способность электрических сетей, увеличивается износ электрооборудования, учащаются случаи ложного срабатывания релейной защиты, страдает надежность электроснабжения. В других случаях трансформаторы недогружены, что вызывает излишние потери электроэнергии в самом трансформаторе и по всей системе электроснабжения из-за низкого коэффициента мощности.

Оптимизация видового парка трансформаторов с учетом техникоэкономических свойств системы городского электроснабжения позволит рационально выбирать и устанавливать трансформаторы необходимой мощности, что увеличит энергоэффективность в городских сетях электроснабжения.

Список литературы

1. Кудрин, Б.И. Введение в технетику.- 2-е изд. перераб. и доп. / Б.И. Кудрин. - Томск: Изд-во ТГУ, 1993. - 552 с.

2. Кузнецова Е.С., Свирская Г.С., Инжелевская О.В. Анализ параметров графиков электрической нагрузки городских сетей. Автоматизированный электропривод и промышленная электроника. тр. Vсерос. научн. – практ. конф., 2012 / под ред. В.Ю. Островляничика, П.Н. Кунина. – Новокузнецк: Изд-во СибГИУ, 2012. – С.245 – 249.

3. Кузнецова Е.С., Свирская Г.С., Дивин Г.В., Карачевцев И.О. Анализ реактивной мощности городских подстанций. Автоматизированный электропривод и промышленная электроника Труды Шестой Всероссийской научно-практической конференции. Под общей редакцией В.Ю. Островляничика. – Новокузнецк: Изд-во СибГИУ, 2014. С. 258-261.

4. Кочуганов И.Г., Кузнецова Е.С. Пути энергосбережения в сфере ЖКХ. Наука и молодежь: проблемы, поиски, решения Труды Всероссийской научной конференции студентов, аспирантов и молодых ученых. Под общей редакцией Л.П. Мышляева. 2011. С. 345-347.

УДК 621.333.4

РЕКУПЕРАЦИЯ ОБРАТНОЙ ЭДС В ЭЛЕКТРИЧЕСКИХ СХЕМАХ ШИРОТНО-ИМПУЛЬСНОГО РЕГУЛИРОВАНИЯ

О.Н. Андрианов, И.А. Золин, К.А. Золин

*ФГБОУ ВО «Сибирский государственный индустриальный
университет», г. Новокузнецк*

Рассматриваются проблемы, связанные с возникновением обратной электродвижущей силы и идеи создания рекуперативных технологий для обратной ЭДС.

Ключевые слова: обратная ЭДС, рекуперация, широтно-импульсная модуляция.

Широтно-импульсная модуляция (ШИМ, англ. *pulse-width modulation (PWM)*) – процесс управления мощностью, подводимой к нагрузке, путём изменения скважности импульсов, при постоянной частоте.

Рекуперация (от лат. recuperatio – «обратное получение») – возвращение части материалов или энергии для повторного использования в том же технологическом процессе.

Актуальность статьи заключается в том, что электроприводы и электродвигатели повсеместно используются в сферах промышленности в составе насосов, компрессоров, станков, вентиляторов и других устройств, которые являются значительной индуктивной нагрузкой. На данный момент широко распространены способы управления асинхронными электродвигателями, на основе широтно-импульсной модуляции. Все способы управления с применением ШИМ сигналов, реализуются с использованием полевых транзисторов, работающих в ключевом режиме, что ведет к возникновению обратной ЭДС после закрытия транзистора. Именно работа транзисторов в ключевом режиме на индуктивную нагрузку в большинстве электрических схем, делает проблему рекуперации актуальной.

Сигнал ШИМ в электронике формируют с помощью микроконтроллера или специализированной микросхемы (ШИМ-контроллера). Так же для управления электродвигателями и электроприводами применяются микроконтроллеры с встроенными ШИМ модулями. Существует несколько вариантов подключения нагрузки: одновыходной, полумостовой, мостовой.

По закону Ленца, ЭДС самоиндукции катушки стремится поддержать неизменным ток через катушку. Таким образом при резком отключении индуктивной нагрузки потенциальная энергия, накопленная в электромагнитном поле катушки, перейдет в мощный всплеск напряжения, который может вывести из строя транзистор и прочие элементы электрической схемы.

Для решения этой проблемы применяют диоды, включенные параллельно транзистору. В результате энергия, накопленная в индуктивном элементе, рассеивается в виде тепла. Предполагаемые рекуперативные решения предполагают использование данной ЭДС повторно, для чего всплеск напряжения планируется отводить в конденсатор.

Для создания рекуперативных технологий требуется выполнить следующие задачи:

- Синтезировать схемы рекуперации.

- Проанализировать значения обратной ЭДС при различных параметрах ШИМ сигнала и значений индуктивной нагрузки.

- Проанализировать и усовершенствовать схемы традиционных систем электропитания.

Достоинства:

- Повышение КПД в результате сокращения потерь тепла на силовых элементах и диодах.

- Выходной каскад регулятора не требует усиленного охлаждения, даже при большой мощности двигателя.

- Повышение живучести системы, уменьшение вероятности пробоя ключевых транзисторов.

На сегодняшний день применение рекуперативных технологий возможно использовать благодаря повсеместному применению ШИМ сигналов.

УДК 669.71:621.778

МОДЕРНИЗИРОВАННЫЙ ГЕНЕРАТОР МОЩНЫХ ИМПУЛЬСОВ ТОКА

В. А. Кузнецов, В. Е. Громов, А. С. Гагарин, Е. С. Кузнецова
Сибирский государственный индустриальный университет
г. Новокузнецк

В работе представлен экономичный генератор мощных однополярных импульсов тока с модернизированным зарядным устройством на двух включенных последовательно тиристорных преобразователях, а также устройством перезаряда рапряжения на силовых конденсаторах. Создана математическая модель модернизированного генератора, получены осциллограммы переходных процессов.

Ключевые слова: генератор импульсов, зарядное устройство, устройство перезаряда, импульс тока, математическое моделирование, переходные процессы.

Генератор мощных импульсов тока, принцип действия которого заключается в разряде предварительно заряженных конденсаторов на низкоомную нагрузку, нашел широкое применение в исследовании физических свойств металлов [1].

Недостатками генератора, препятствующими его широкому применению в промышленности, являются:

- низкий КПД и значительные затраты электроэнергии зарядного устройства в связи с наличием в цепи заряда конденсаторов токоограничивающего сопротивления R_3 ;
- невозможность регулирования амплитуды силового импульса.

Для применения генератора в промышленности, в частности при обработке металлов давлением, разработаны и внедрены элементы, устраняющие в/у недостатки.

С целью снижения мощности, потребляемой из сети 380 В, в схему генератора импульсов введен узел перезаряда UP, состоящий из последовательно соединенных токоограничивающей индуктивности RL Br4 и тиристора Th1, подключенных встречно-параллельно с тиристором Th. В схеме без UP после прохождения силового импульса, когда напряжение на конденсаторах C Br1 становится отрицательным, равным $-(0,85 - 0,95)$ начального напряжения U_z , перезаряд конденсаторов до напряжения U_z происходит за счет зарядного устройства с потреблением мощности из сети. В случае применения устройства перезаряда в момент времени, когда после прохождения силового импульса ток становится равным нулю, на управляющий электрод тиристора Th1 поступает импульс, сформированный в блоке управления тиристором Th1, тиристор открывается и конденсаторы по цепи «тиристор Th1, индуктивность RL Br4, конденсаторы RL Br4» перезаряжаются до положительного значения напряжения $0,8 - 0,9 U_z$. При этом зарядное устройство осуществляет только дозаряд конденсаторов от $0,85$ до $1,0 U_z$. Таким образом, применение устройства перезаряда значительно снижает мощность, потребляемую из сети. Подробное описание работы устройства перезаряда и его параметры изложены в [2].

Переходные процессы импульса тока и напряжения перезаряда с использованием тиристора Th1 представлены на рис. 1. Для дальнейшего снижения мощности зарядного устройства и возможности регулирования величины напряжения заряда (амплитуды импульса) вместо нерегулируемого выпрямителя на диодах в схему введены управляемые тиристорные преобразователи Uni Br, Uni Br1 соединенные последовательно, при

этом один из преобразователей получает питание от обмотки трансформатора Tr, соединенной по схеме «звезда», а другой – по схеме «треугольник».

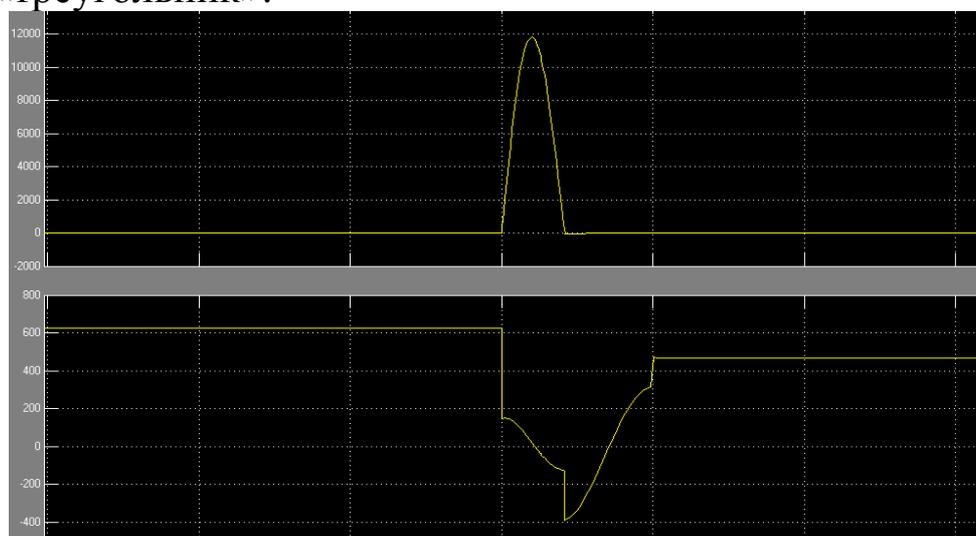


Рисунок 1 – Параметры импульса тока и напряжения на конденсаторах с устройством перезаряда

Такая схема соединений во-первых, повышает выпрямленное напряжение (соответственно величину силового импульса), а во-вторых – снижает инерционность преобразователя (число пульсаций m за период питающего напряжения увеличивается до 12, а длительность пульса снижается до 1,6 мсек). При использовании в/у источника питания генератор способен генерировать импульс с максимальной частотой воспроизведения до 400 Гц. Использование тиристорных преобразователей позволило вывести из схемы зарядного устройства токоограничивающий резистор R_z , что также повысило КПД и снизило мощность, потребляемую из сети переменного тока.

На рис. 2 представлена математическая модель модернизированного генератора с устройством перезаряда, тиристорным управляемом зарядном устройством, а на рис. 3 – осциллограммы переходных процессов при работе модернизированного генератора в режиме скачкообразном изменении задания на напряжение от 0 до 600 В. Мощность, потребляемая модернизированным генератором из сети в статическом режиме при частоте воспроизведения импульсов 100 Гц снизилась в 5 раз (с 20 кВт до 3,5 кВт).

СЕКЦИЯ 3. Силовое оборудование, преобразовательная техника
и микропроцессорные средства управления.

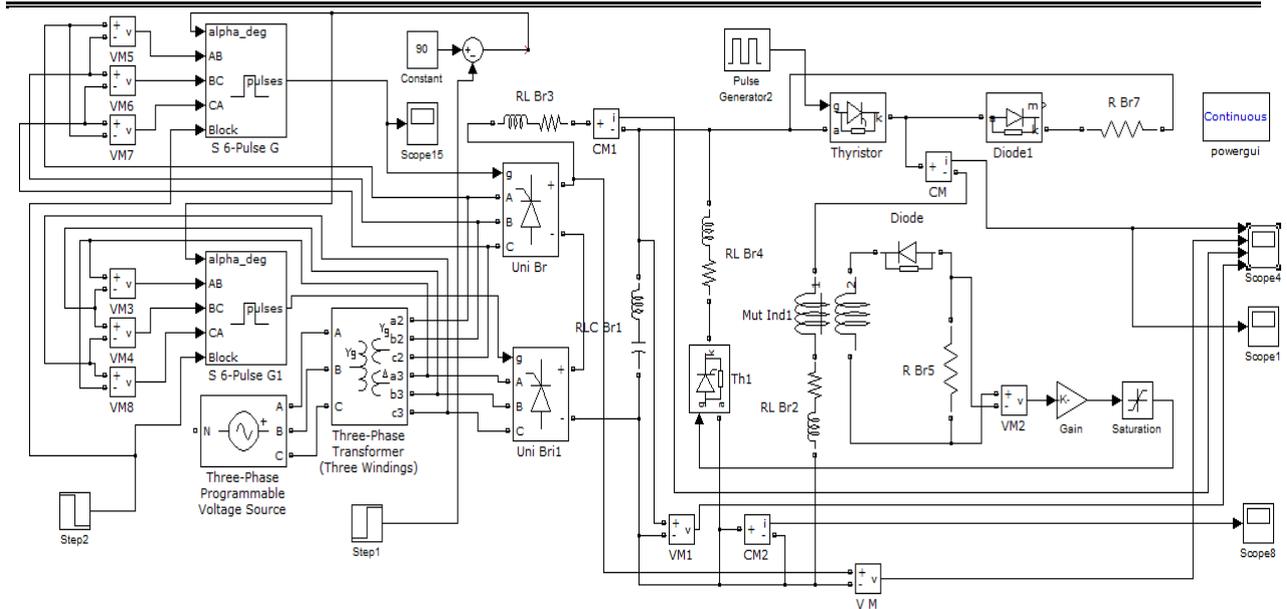


Рисунок 2 – Математическая модель модернизированного генератора

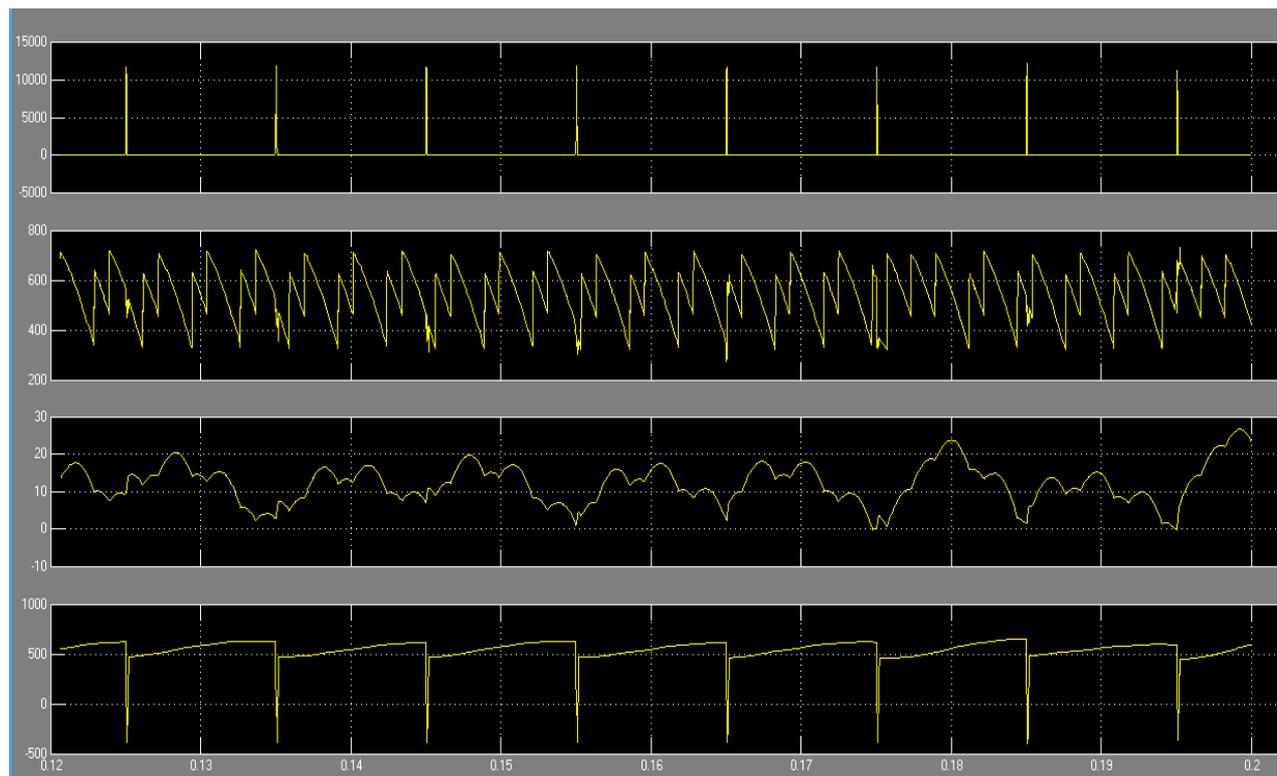


Рисунок 3 – Переходные процессы при скачкообразном изменении задания на напряжение заряда конденсаторов

Библиографический список.

1. Жмакин Ю.Д., Коновалов С.В., Кузнецов В.А., Загуляев Д.В., Громов В.Е. Генератор мощных токовых импульсов // Изв. ВУЗов. Черная металлургия. 2008. № 6. С. 51 – 53.

2. Кузнецов В.А., Громов В.Е., Перетяшко В.Н. Применение генератора мощных импульсов тока при электростимулированном волочении // Промышленная энергетика 1986 № 10. С. 17 – 19.

УДК 62-09.064.5

ВНЕДРЕНИЕ СТАТИЧЕСКОГО ТИРИСТОРНОГО
ПРЕОБРАЗОВАТЕЛЯ В ВЫСОКОВОЛЬТНЫХ СЕТЯХ С РЕЗКО
ПЕРЕМЕННОЙ НАГРУЗКОЙ

В. А. Кузнецов, М. С. Миронов, Н. А. Сигачев

Сибирский государственный индустриальный университет,

АО «ЕВРАЗ ЗСМК»

г. Новокузнецк

Выполнено исследование влияния внедрения СТК в высоковольтных сетях с резко переменной нагрузкой. Выявлены положительные результаты по улучшению показателей качества питающей сети 35 – 220 кВ, а так же снижению бросков реактивной мощности. Выполненные исследования показывают, что внедрение СТК в высоковольтных сетях, положительно сказываются на уменьшении значения реактивной мощности, а так же позволяет обеспечить необходимый уровень фликера.

Ключевые слова: СТК, ЭСПЦ, прокатное производство, реактивная мощность, фликер, высоковольтные сети.

Целью настоящей работы является улучшение качественных характеристики производственного подразделения с резкопеременной нагрузкой после внедрения статических тиристорных компенсаторов реактивной мощности (далее СТК). В статье рассмотрено внедрение СТК в электросталеплавильном цехе (далее ЭСПЦ) производства железнодорожного проката [1].

Дуговые электропечи и электрическая сеть, включенные в единую систему, оказывают взаимное влияние на элементы

Статические тиристорные компенсаторы реактивной мощности являются одними из устройств, обеспечивающих повышение эффективности работы и энергосбережения систем передачи и распределения электрической энергии. СТК разрабатываются в двух основных модификациях: для промышленных установок типа дуговых сталеплавильных печей (ДСП), тиристорных приводов реверсивных прокатных станов и для высоковольтных линий электропередачи. Так же есть специальное исполнение СТК для применения на тяговых подстанциях электрофицированных железных дорог [3].

На рис. 1 приведена принципиальная схема подключения СТК к сети 35 кВ, осуществляющей электроснабжение трансформатора 95 мВА электросталеплавильной печи, а также трансформатора 22 мВА агрегата «Печь – ковш». Установка состоит из фильтрокомпенсирующих цепей, компенсирующих основные гармоники, возникающие в процессе плавки, быстродействующего тиристорного регулятора ТРГ мощностью 110Мвар, а также системы управления и вспомогательных систем.

Использование статического компенсатора реактивной мощности компенсации реактивной мощности с применением мощного быстродействующего тиристорного преобразователя позволяет решить следующие задачи:

- существенное снижение возмущений в питающей сети;
- возможность подключения мощных печей к энергосистемам с низкой мощностью короткого замыкания;
- компенсацию несимметрии токов фаз ДСП.

На рис 2 представлен график изменения напряжения на печной подстанции Электросталеплавильного цеха металлургического предприятия без применения и с применением СТК.

Из приведенного графика следует, что применение СТК позволяет увеличить величину среднего напряжения на трансформаторе электропечи и значительно снижает фликер.

Ниже приведена оценка эффективности использования СТК в электрической сети 35 кВ ЭСПЦ с использованием рекомендаций НПО «Энерготехнология», г. Москва.

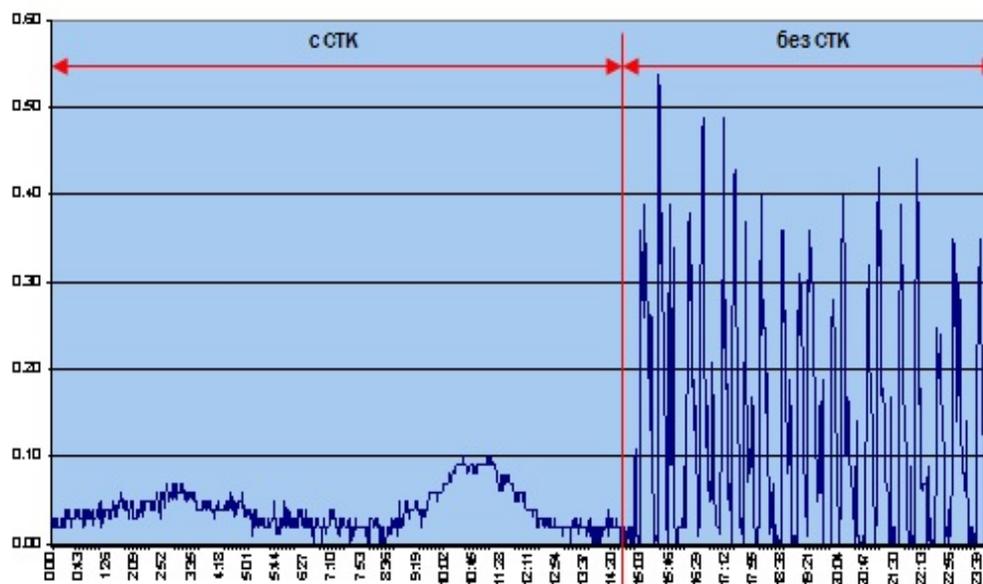


Рисунок 2 - Графики работы сети с применением СТК и без СТК

В целом эффективность внедрения СТК в ЭСПЦ оценивается следующими показателями.

1. Снижение удельного расхода электродов на 6-7%.
2. Увеличение срока работы оборудования, а следовательно и сокращение затрат на ремонт на 20%.
3. Снижение расхода электроэнергии на 5-6%.

Экономический эффект от внедрения превышает 200 млн. рублей при затратах - около 300 млн. рублей.

Библиографический список

1. Кузнецов В.А., Сигачев Н.А., Ермолаева Т.М. «Реконструкция и модернизация оборудования основных цехов производства железнодорожного проката ОАО «ЕВРАЗ ЗСМК»» -Труды 5-й всероссийской научно-практической конференции «Автоматизированный электропривод и промышленная электроника» Под редакцией В.Ю. Островляничика, 2012г.
2. Кузнецова Е.С., Кузнецов В.А., Катунин А.И., Родина Т.Н. О резервах экономии электроэнергии в электросталеплавильных цехах. Известия высших учебных заведений. Черная металлургия. 2001. [№ 6](#). С. 18-20.

3. Кулешов В.Е. Применение статических тиристорных компенсаторов для компенсации реактивной мощности. Изв. ТулГУ. Технические науки. 2011. Выпуск 6. Часть 1

УДК621.314.21

ЭНЕРГОСБЕРЕЖЕНИЕ С ИСПОЛЬЗОВАНИЕМ УСЛОВНО-
ПЕРЕМЕННЫХ И УСЛОВНО-ПОСТОЯННЫХ РАСХОДОВ
ЭЛЕКТРОЭНЕРГИИ

В.А. Кузнецов, С.Ю. Романюк, Е.С. Кузнецова

*Сибирский государственный индустриальный университет
г. Новокузнецк*

Ключевые слова: электроэнергия, энергосбережение, условно-переменные, условно-постоянные, энергозатраты, контроллер, алгоритм.

Рост объемов электропотребления электротехническим комплексом повышает требования к проблеме эффективности эксплуатации оборудования. На основании Федерального закона №261-ФЗ "Об энергосбережении и о повышении энергетической эффективности» от 23.11.2009 г. все предприятия Российской Федерации должны в полной мере заниматься экономией энергоресурсов, оптимизировать производственные процессы и рабочие режимы оборудования и установок, проводить повседневную работу с коллективами, направленную на энергосбережение.

Для решения вышеуказанной проблемы необходимы методики и средства (приборы, установки), позволяющие с достаточной точностью проводить измерения электрических параметров оборудования с целью их дальнейшей систематизации и оптимизации.

В России энергосбережением стали заниматься еще в 30 годы прошлого столетия, тогда же стали создаваться методики, позволяющие оценивать энергозатраты и вырабатывать пути экономии электроэнергии. Основными параметрами в области энергосбережения являлись активная электроэнергия и мощность,

потребляемая электроустановкой, условно-переменные и условно-постоянные расходы электроэнергии.

Условно-переменные расходы - расходы энергии на выполнение основных технологических операций. Условно-постоянные расходы не зависят от изменения объема производства, например, расход энергии на освещение, привод вентиляционных устройств, отопление, кондиционирование воздуха. Кроме того, постоянные расходы могут увеличиться (уменьшиться) в результате какого-либо управленческого решения (например, увеличить или уменьшить расходы на освещение цеха и т. п.).

Расход энергии по переменной части может определяться укрупненно на основе времени работы оборудования или по сводным нормам. Постоянная часть расхода энергии - на основе нормативов освещенности, отопления помещений и т.д.

Основным методом определения вышеуказанных расходов являлся аналитический метод, который устанавливает технически обоснованные нормы для энергоемких агрегатов (печи, компрессоры, насосы). Для этого нужно установить зависимости, показывающие влияние отдельных факторов на величину удельного расхода энергии. Использование этого метода для нормирования расхода энергии всего станочного парка усложняется большим числом единиц установленного оборудования, малой единичной мощностью, многообразием обрабатываемых деталей и технологических операций, а также неравномерностью режимов работы.

В настоящее время наибольшее применение нашли расчетно-статистические методики. Недостатком настоящего способа является сложность и недостаточная точность разделения расходов электроэнергии на условно-постоянные и условно-переменные расходы. В то же время, такое разделение очень важно, так как ответственность за условно-переменные расходы чаще всего должна ложиться на технологический (электротехнологический) персонал, который формирует идеологию производства, а также непосредственно реализует технологические режимы работы технологического оборудования. Ответственность за условно-постоянные расходы должен нести ответственный за электрохозяйство (главный энергетик) предприятия, так как именно он формирует идеологию работы вспомогательного

оборудования (вентиляторы, системы воздухо- и водоснабжения), а также основных электрические вспомогательные производства (ЦСиП, ЭРЦ, цех водоснабжения и др). Безусловно, за увеличение условно-постоянных расходов несет несистемную ответственность и другой персонал производства, например, служба механиков - за неоптимальные сроки и качество ремонтов, аварийность механического оборудования, технологи - за аварийность технологического оборудования, приведшая к простоям и увеличению расходов электроэнергии из-за аварийных ремонтов.

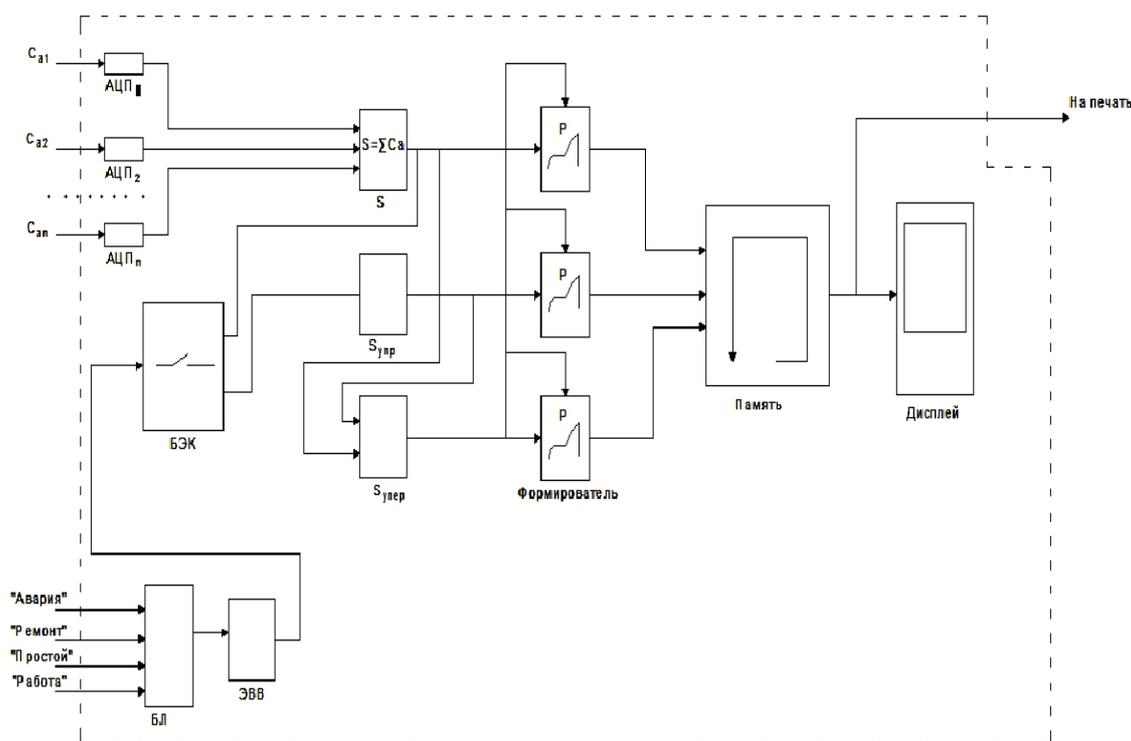


Рисунок 1 – Устройство для расчета затрат электроэнергии

Реализация предложенной методики определения условно-переменных и условно-постоянных расходов осуществляется с применением устройства (например, программируемого контроллера), структурная схема которого представлена на рис. 1. В качестве датчика используется электронный трехфазный счетчик активной энергии S_a с памятью, информация с которого может сниматься либо постоянно, либо дискретно. Счетчик устанавливается в сети 6 (110) кВ на вводимом устройстве, осуществляющем электроснабжение производственного подразделения, на границе раздела электроснабжающей

организации и цеха. На клеммы измерения напряжения счетчика подается напряжение 100 В с трехфазного трансформатора напряжения, а на клеммы измерения тока – сигнал с трансформаторов тока.

Принцип действия прибора заключается в следующем: сигнал, пропорциональный активной мощности с выхода счетчика S_a при необходимости оцифровывается в аналого-цифровом преобразователе АЦП и поступает в блоки обработки данных F (формирователь).

При наличии нескольких вводов (для повышения надежности электроснабжения структурного подразделения) на входы контроллера поступает несколько сигналов от счетчиков каждого из вводов. Сигналы счетчиков суммируются в цифровом сумматоре S.

В приборе реализовано цифровое логическое устройство БЛ, которое фиксирует режимы работы производственного подразделения:

- нормальная работа (НР) (присутствуют условно-переменные и условно-постоянные расходы);
- работа с низкой производительностью (НПР) (присутствуют условно-переменные и условно-постоянные расходы);
- простой производственного подразделения (Пр) (присутствуют только условно-постоянные расходы электроэнергии).

Логическое устройство БЛ определяет также моменты времени перехода с одного режима работы в другой. Информация фиксируется в режиме реального времени. Для снижения ошибок в определении режимов БЛ воздействует на электронные ключи блока электронных ключей БЭК, подсоединяющие сумматор S к сумматору условно-постоянных расходов $S_{упр}$ через устройство выдержки времени ЭВВ. Для определения условно-переменных расходов используется блок Супер. В формирователях происходит определение величин расходов за период времени, который задается пользователем (1 час, 1 смена, 1 сутки, 1 месяц и др.). Информация выводится на дисплей, либо на печать или внешний носитель.

Для определения времени изменения режимов, в устройство записывается алгоритм, определяющий тот или иной режим

работы производственного подразделения, который предварительно разрабатывается техническим персоналом цеха и утверждается главным инженером предприятия.

Для примера приведем алгоритм режимов работы основной линии прокатного цеха, который состоит из нагревательной печи, трех станов, пилы горячей резки, устройства закалки. Для других участков цеха (отделка металла, узлы погрузки выгрузки и т.д.) должны быть составлены алгоритмы, учитывающие специфику данного подразделения, особенности его электроснабжения и т.д.

Алгоритм режимов работы прокатного производства следующий:

1) нормальная работа (НР): оборудование работает в штатном режиме:

- простои не превышают нормируемого времени $T_{\text{прн}}$ (например, 1-3 мин.) одновременно;

- общие простои за определенное, зафиксированное в алгоритме время (например, 10 мин, 1 час, 1 сутки и др.), не превышают 5% рабочего времени;

2) работа с низкой производительностью (НПР):

- единовременный простой превышает нормируемое время (1-3 мин);

- общие простои за определенное, зафиксированное в алгоритме время, превышают 5% рабочего времени;

- участок работает с низкой производительностью из-за недостатка металла, неисправности оборудования и т.д;

3) простои, возникшие в связи со следующими причинами:

- авария на одном из агрегатов, или нескольких агрегатах (например, из-за отключения электроэнергии). Информация в контроллер поступает от сигнала «Авария», сформированного в технологическом контроллере, системе защиты и сигнализации машинного зала и т.д. При отсутствии в цехе такого рода сигналов, контроллер фиксирует сбой в работе, как длительный простой.

- ремонт в цехе или на одном из агрегатов определяется по сигналу технологического контроллера «Ремонт», или сигналам отключения основного оборудования со стороны технологического (электротехнического) персонала при времени простоя более 30 мин (время согласовывается в «Алгоритме»).

- простой будет зафиксирован контроллером сигналом «Простой», если отсутствие прокатки превысит нормируемое время $T_{прн}$, зафиксированное в «Алгоритме».

Сигнал «Работа» формируется и подается в устройство при наличии технологического процесса, и он может быть определен различными путями, например, наличие выдачи заготовки (сигнал от технологического контроллера нагревательной печи); наличие статического момента (статического тока, усилия) главного привода любой из клеток прокатного стана (сигнал от контроллера главного привода или технологического контроллера), наличие на прокатном поле горячего металла перед или после клетки и т.д.

Обработка сигналов контроллером

1. За расчетный период контроллер формирует информацию о режимах работы производства, с указанием типа режима (НР, ННР, Пр) с привязкой по времени, например:

8ч 00мин – 8ч 20 мин - режим работы с низкой производительностью (ННР);

8ч 20мин – 8ч 59мин – нормальный режим (НР);

8ч 59мин – 9ч 00мин – авария.

Цикл – 1 час.

2. За расчетный период производится:

- расчет общего расхода электроэнергии;

- расчет условно-постоянных расходов электроэнергии (в соответствии с вышеуказанным алгоритмом);

- расчет условно-переменных расходов.

3. Расчет общего расхода, а также условно-переменных и условно-постоянных расходов за определенный период времени (цикл), задаваемый пользователем (1 час, 1 смена, 1 сутки, 1 месяц).

Список литературы.

1. Кудрин Б.И., Глейзер И.З., Кузнецова Е.С. Особенности установления норм электропотребления металлургических производств. Промышленная энергетика. 1999. [№ 11](#). С. 24-26.

2. Кузнецова Е.С., Кипервассер В.М., Кузнецов В.А Анализ динамики электропотребления агломерационного производства. Электрика.2003 №5. С. 19-24

3. Кузнецова Е.С., Кузнецов В.А., Катунин А.И., Родина Т.Н. О резервах экономии электроэнергии в электросталеплавильных цехах. Известия высших учебных заведений. Черная металлургия. 2001. [№ 6](#). С. 18-20.

УДК 621.316.1.05

АНАЛИЗ ТАРИФОВ ЭЛЕКТРОЭНЕРГИИ НА ТЕРРИТОРИИ РОССИЙСКОЙ ФЕДЕРАЦИИ

Е.С. Кузнецова, В.А. Кузнецов, Н.В. Балицкая, Е.Н.

Топильская

*Сибирский государственный индустриальный университет
г. Новокузнецк*

В данной статье рассмотрены одноставочные и зонные тарифы оплаты за электроэнергию для субъектов Российской Федерации.

Ключевые слова: одноставочный тариф, зонный тариф, мощность, электрические потери, пиковая зона, полупиковая зона, ночная зона, подстанции.

Тарифами на электрическую энергию называют ценовые ставки на единицу электрической энергии и мощности.

На розничных рынках в регионах, тарифы на электроэнергию устанавливаются региональные энергетические комиссии (РЭК). Энергоснабжающая организация (ЭСО) представляет в РЭК свои предложения по тарифам, исходя из планируемых объемов производства и передачи электроэнергии и потребности в финансовых средствах на эти цели. По результатам анализа представленных материалов РЭК утверждает тарифы в разрезе потребительских групп в трех вариантах:

1). одноставочный тариф, включающий только плату за потребленную электроэнергию;

2). двухставочный тариф, включающий месячную плату за единицу заявленной мощности и плату за единицу потребленной электроэнергии;

3). зонный тариф, дифференцированный по зонам суток – трем (пиковая, полупиковая, ночная) или двум (дневная и ночная).

СЕКЦИЯ 3. Силовое оборудование, преобразовательная техника
и микропроцессорные средства управления.

В таблице приведены диапазоны одноставочных тарифов и зонных тарифов для пиковой, полупиковой и ночной зоны. Одноставочный тариф 0,92 – 5,03 руб/кВт·ч. Зонный: пиковая зона 1,19 – 6,25 руб/кВт·ч; полупиковая зона 0,92 – 4,81 руб/кВт·ч; ночная зона 0,55 – 3,15 руб/кВт·ч.

Таблица 1 – Диапазон тарифов на электроэнергию по 73 субъектам Российской Федерации

Значение, руб/кВт·ч	Одноставочный тариф	Зонный тариф		
		Пиковая зона	Полупиковая зона	Ночная зона
Максимальное	5,03	6,25	4,81	3,15
Минимальное	0,92	1,19	0,92	0,55
Среднее	3,35	4,12	3,33	2,08
Стандартное отклонение	0,64	0,82	0,62	0,61
Вариация, %	19,1	19,9	18,6	29,3

На рисунках 1 – 4 представлены распределения одноставочного тарифов и зонных тарифов для пиковой, полупиковой и ночной зоны, применяемых в российской Федерации.

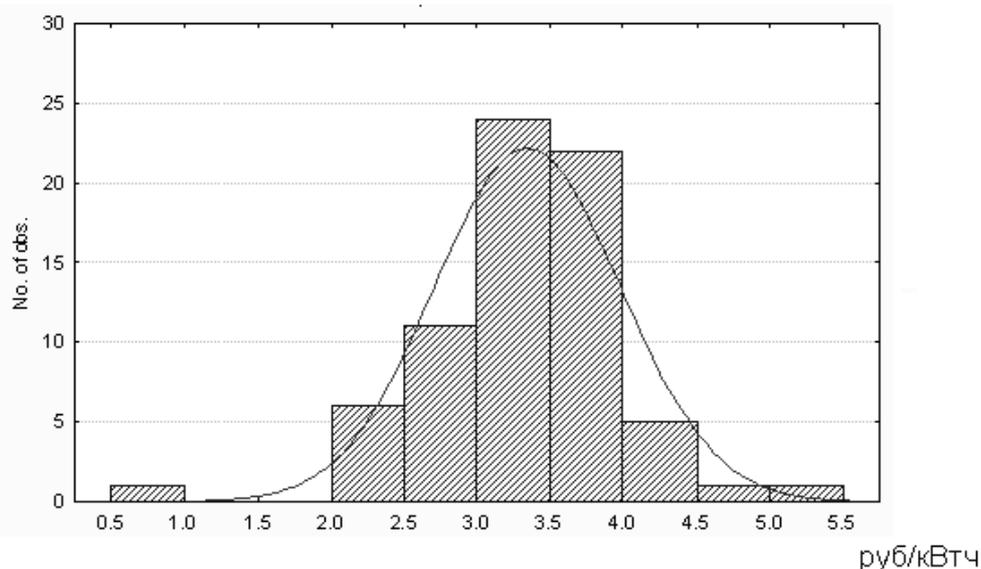


Рисунок 1 Распределение значений одноставочного тарифа

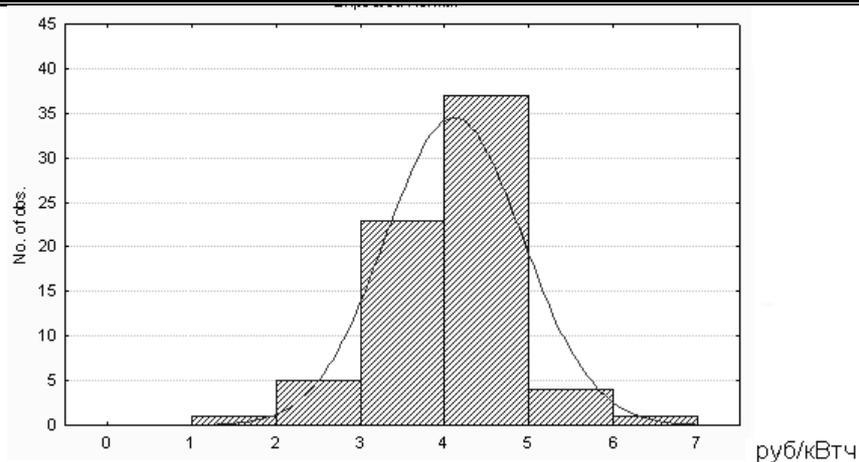


Рисунок 2 - Распределение значений зонного тарифа для пиковой
зоны

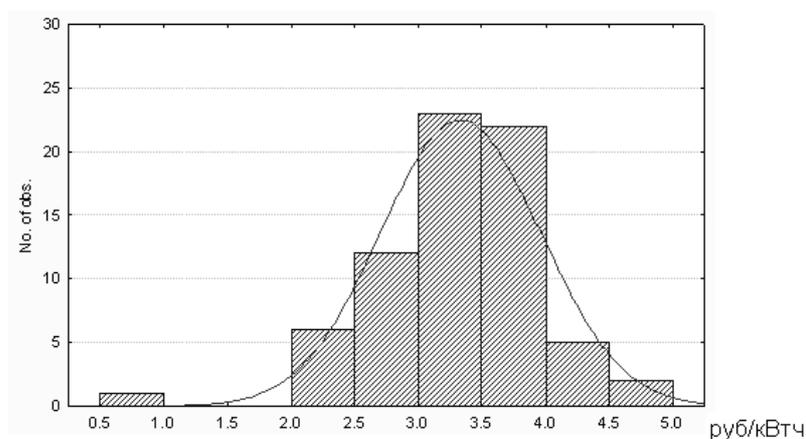


Рисунок 3 - Распределение значений зонного тарифа для
полупиковой зоны

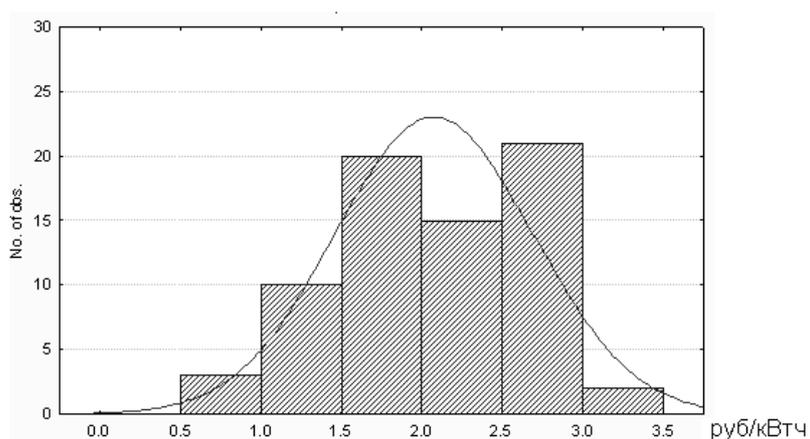


Рисунок 4 - Распределение значений зонного тарифа для ночной
зоны

Практически все они имеют вариацию около 19 %, за исключением тарифа в ночной зоне (29,3%). Распределения тарифов трудно отнести к нормальным распределениям. У них

наблюдается левосторонняя асимметричность, а у тарифа для ночной зоны – двухвершинное распределение.

На рисунках 5 – 7 представлены зависимости зонных тарифов для пиковой, полупиковой и ночной зоны от одноставочного тарифов.

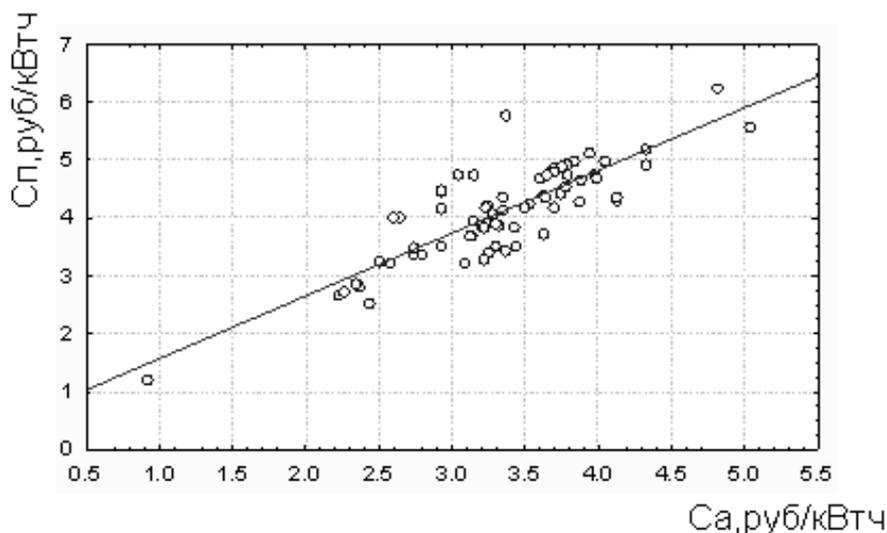


Рисунок 5 – Зависимость зонного тарифа для пиковой зоны от одноставочного тарифа

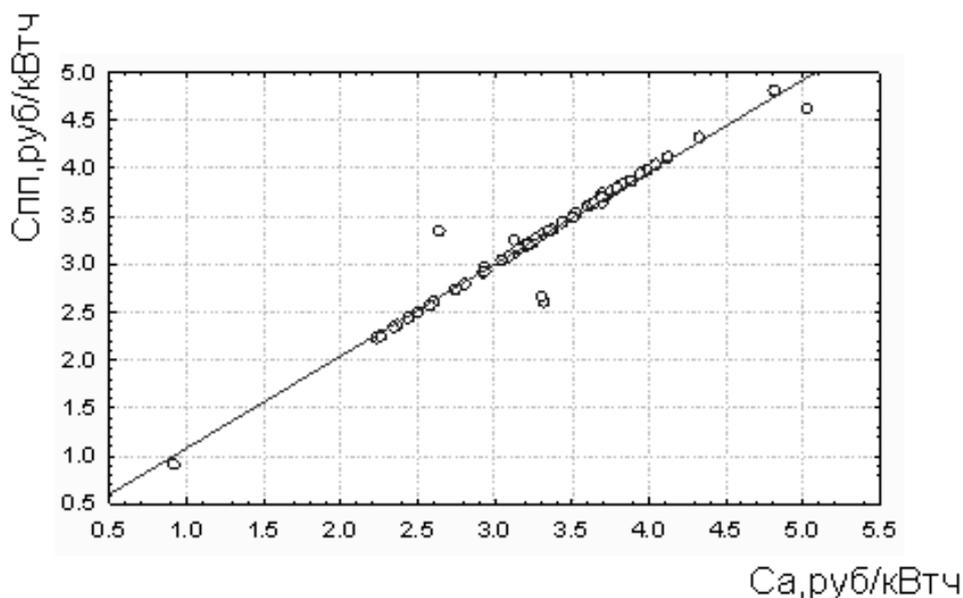


Рисунок 6 – Зависимость зонного тарифа для полупиковой зоны от одноставочного тарифа

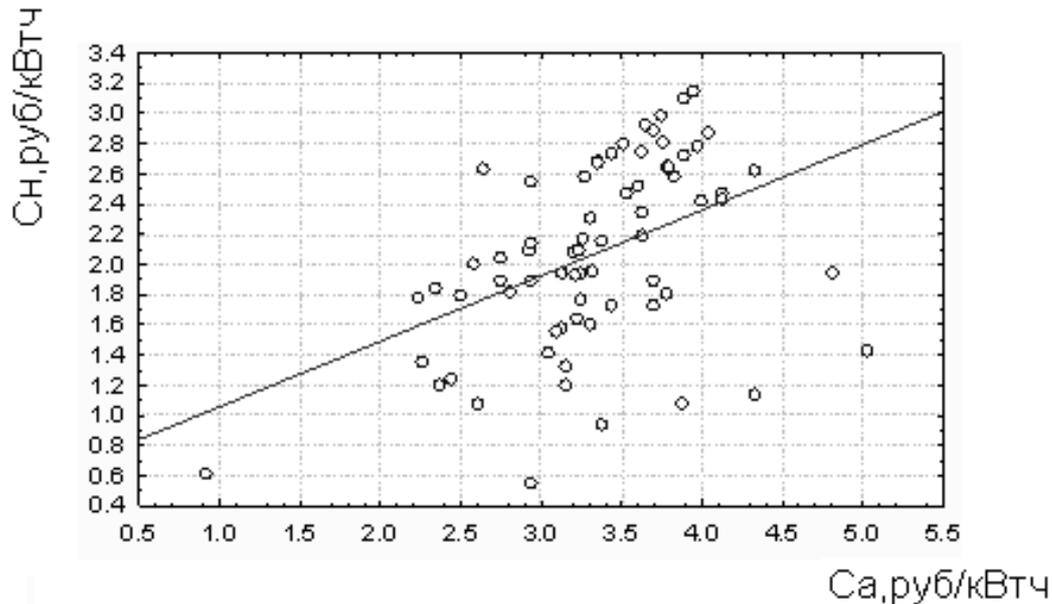


Рисунок 7 – Зависимость зонного тарифа для ночной зоны от
одноставочного тарифа

Тарифы пиковой и полупиковой зоны имеют прямо пропорциональную зависимость от одноставочного тарифа, а для тарифа ночной зоны зависимости от одноставочного тарифа не выявлено.

Ценообразование в энергетике базируется на выделение постоянных и переменных издержек. Первые связаны с содержанием генерирующих мощностей и электрических сетей и обеспечением их постоянной готовности к несению нагрузки. Вторые с производством электроэнергии на станциях и компенсацией технологических потерь электроэнергии при передаче. Чем больше потери электроэнергии, тем выше тарифы оплаты за электроэнергию. Для снижения потерь электроэнергии в электрических сетях необходима реконструкция электрических сетей. Замена устаревшего и незагруженного оборудования, компенсация реактивной мощности, контроль параметров качества электроэнергии. Совершенствования системы учета и мониторинга электроэнергии, внедрения новых информационных технологий в энергосбытовой деятельности и управления режимами сетей – система Smart Grid и Smart Meter.

Список литературы

1. Кузнецова Е.С., Свирская Г.С., Инжелевская О.В. Анализ параметров графиков электрической нагрузки городских сетей. Автоматизированный электропривод и промышленная электроника. тр. V Всерос. научн. – практ. конф., 2012 / под ред. В.Ю. Островляничка, П.Н. Кунина. – Новокузнецк: Изд-во СибГИУ, 2012. – С.245 – 249.

2. Кузнецова Е.С., Свирская Г.С., Дивин Г.В., Карачевцев И.О. Анализ реактивной мощности городских подстанций. Автоматизированный электропривод и промышленная электроника Труды Шестой Всероссийской научно-практической конференции. Под общей редакцией В.Ю. Островляничка. – Новокузнецк: Изд-во СибГИУ, 2014. С. 258-261.

3. Кочуганов И.Г., Кузнецова Е.С. Пути энергосбережения в сфере ЖКХ. Наука и молодежь: проблемы, поиски, решения Труды Всероссийской научной конференции студентов, аспирантов и молодых ученых. Под общей редакцией Л.П. Мышляева. 2011. С. 345-347.

4. Кузнецова Е.С., Свирская Г.С., Инжелевская О.В. Анализ показателей качества электроэнергии городских сетей. Автоматизированный электропривод и промышленная электроника Труды Шестой Всероссийской научно-практической конференции. Под общей редакцией В.Ю. Островляничка. – Новокузнецк: Изд-во СибГИУ, 2014. С. 254-258.

5. Кузнецова Е.С., Балицкая Н.В., Каланчин М.Ю., Серебряков Е.В. Внедрение информационных технологий в сети электроснабжения города. Автоматизированный электропривод и промышленная электроника Труды Шестой Всероссийской научно-практической конференции. Под общей редакцией В.Ю. Островляничка. – Новокузнецк: Изд-во СибГИУ, 2014. С. 262-265.

УДК 621.316.1.05

АНАЛИЗ ПОТЕРЬ ЭЛЕКТРОЭНЕРГИИ ПРИ ПЕРЕДАЧЕ В ЭЛЕКТРИЧЕСКИХ СЕТЯХ

Е.С. Кузнецова, А.В.Воронцов

*Сибирский государственный индустриальный университет
г. Новокузнецк*

В данной статье рассмотрены потери электроэнергии возникающие при ее передаче, определен диапазон отчетных потерь электроэнергии по Российской Федерации.

Ключевые слова: электрические сети, отчетные потери электроэнергии, сетевая компания, технические потери, нагрузочные потери, условно-постоянные потери.

Потери электроэнергии условно разделяют на технологические и коммерческие. Технологические потери возникают в связи с тем, что в процессе передачи электроэнергии определенная ее часть преобразуется в тепловую энергию. Также имеет место расход электроэнергии на обеспечение функционирования оборудования подстанций. Полностью устранить технологические потери невозможно. Их снижение достигается за счет совершенствования технологических процессов и модернизации энергетического оборудования.

Стоимость потерь является одной из составляющих тарифа на передачу электроэнергии по сетям. На рисунке представлена структурная схема отчетных потерь электроэнергию

Для утверждения норматива технологических потерь электроэнергии в электрических сетях и включения его в тариф, сетевая компания принимает величину 13,44% по отношению к отпуску в сеть, в т.ч. технические потери составят 12,75%, потери на плавку гололеда - 0,01 %, потери в соединительных проводах и сборных шинах распределительных устройств подстанций - 0,12 %, потери в электрических счетчиках - 0,4 %, потери электрической энергии в изоляции кабелей - 0,09 % и потери электрической энергии в измерительных трансформаторах тока и напряжения - 0,02 %.

СЕКЦИЯ 3. Силовое оборудование, преобразовательная техника и микропроцессорные средства управления.

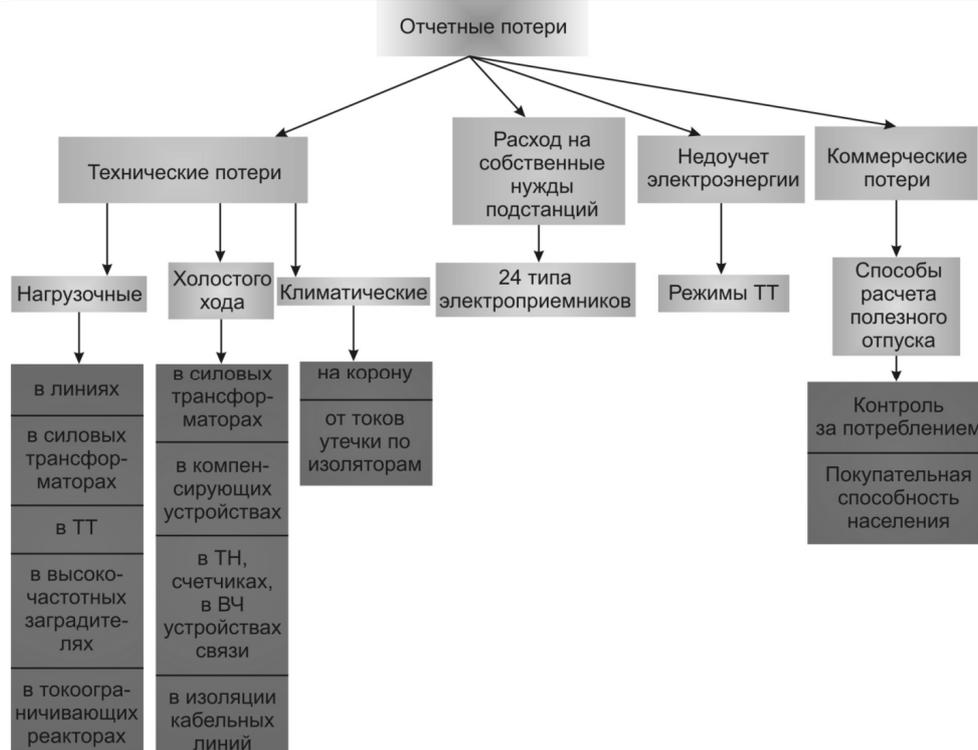


Рисунок 1 - Структура отчетных потерь электроэнергии

Технические потери электроэнергии зависят от многих факторов: от загрузки оборудования, изношенности фонда оборудования, реактивной мощности и т.д. На рисунке 2 показаны технические потери электроэнергии. Из рисунка видно, что самый большой процент потерь электроэнергии, а именно 74% приходится на линии электропередач; 15% на потери, обусловленные погрешностью системы учета электроэнергии; 9% на условно-постоянные потери и всего 2% на нагрузочные.

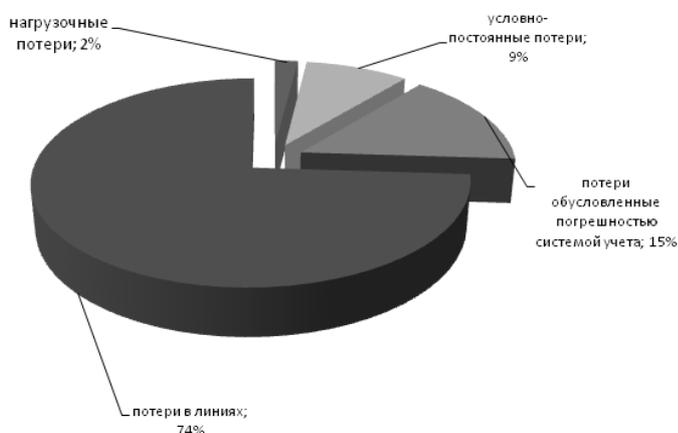


Рисунок 2 – Технические потери электроэнергии в электрических сетях

На рисунке 3 представлено распределение отчетных потерь электроэнергии в электрических сетях Российской Федерации по 339 организациям. Максимальное значение процента потерь электроэнергии от объемов передаваемой электроэнергии - 27,5 %, минимальное – 0,85 % и среднестатистическое 10,69%.

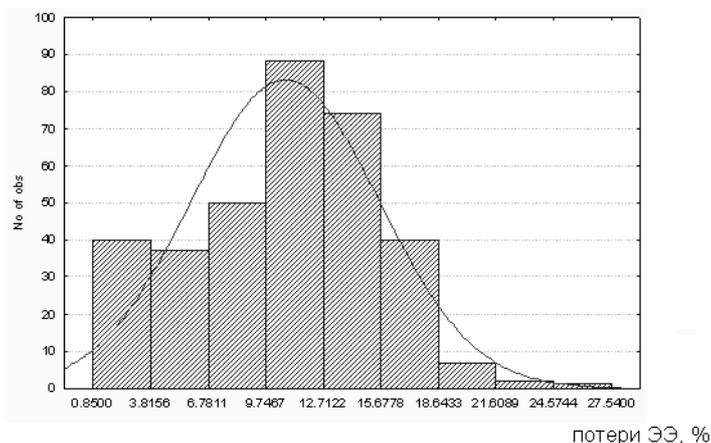


Рисунок 3 - Распределение отчетных потерь электроэнергии в электрических сетях Российской Федерации

Потери электроэнергии в электрических сетях - важнейший показатель эффективности работы энергосбытовой деятельности энергоснабжающих организаций. Повышение его свидетельствует о проблемах, которые требуют безотлагательных решений в развитии, реконструкции и техническом перевооружении электрических сетей, совершенствовании методов и средств их эксплуатации и управления, в повышении точности учета электроэнергии.

Потери электроэнергии на уровне 10 % можно считать максимально допустимыми с точки зрения физики передачи электроэнергии по сетям. Становится все более очевидным, что резкое обострение проблемы снижения потерь электроэнергии в электрических сетях требует активного поиска новых путей ее решения, новых подходов к выбору соответствующих мероприятий, а главное, к организации работы по снижению потерь.

Для снижения потерь электроэнергии в электрических сетях необходима оптимизация электрических сетей. Замена устаревшего и незагруженного оборудования, регулирование коэффициента мощности, улучшение параметров качества электроэнергии. Совершенствования системы учета

электроэнергии, внедрения новых информационных технологий в энергосбытовой деятельности и управления режимами сетей – система Smart Grid и Smart Meter.

Список литературы

1. Кузнецова Е.С., Свирская Г.С., Инжелевская О.В. Анализ параметров графиков электрической нагрузки городских сетей. Автоматизированный электропривод и промышленная электроника. тр. V Всерос. научн. – практ. конф., 2012 / под ред. В.Ю. Островляничка, П.Н. Кунина. – Новокузнецк: Изд-во СибГИУ, 2012. – С.245 – 249.

2. Кузнецова Е.С., Свирская Г.С., Дивин Г.В., Карачевцев И.О. Анализ реактивной мощности городских подстанций. Автоматизированный электропривод и промышленная электроника Труды Шестой Всероссийской научно-практической конференции. Под общей редакцией В.Ю. Островляничка. – Новокузнецк: Изд-во СибГИУ, 2014. С. 258-261.

3. Кочуганов И.Г., Кузнецова Е.С. Пути энергосбережения в сфере ЖКХ. Наука и молодежь: проблемы, поиски, решения Труды Всероссийской научной конференции студентов, аспирантов и молодых ученых. Под общей редакцией Л.П. Мышляева. 2011. С. 345-347.

4. Кузнецова Е.С., Свирская Г.С., Инжелевская О.В. Анализ показателей качества электроэнергии городских сетей. Автоматизированный электропривод и промышленная электроника Труды Шестой Всероссийской научно-практической конференции. Под общей редакцией В.Ю. Островляничка. – Новокузнецк: Изд-во СибГИУ, 2014. С. 254-258.

5. Кузнецова Е.С., Балицкая Н.В., Каланчин М.Ю., Серебряков Е.В. Внедрение информационных технологий в сети электроснабжения города. Автоматизированный электропривод и промышленная электроника Труды Шестой Всероссийской научно-практической конференции. Под общей редакцией В.Ю. Островляничка. – Новокузнецк: Изд-во СибГИУ, 2014. С. 262-265.

СЕКЦИЯ 4

Подготовка и переподготовка инженерных и научных кадров. Моделирование систем автоматизированного электропривода, промышленной электроники и автоматического управления

УДК 621.313

МОДЕЛИРОВАНИЕ ЭЛЕКТРОПРИВОДА МЕХАТРОННОЙ СИСТЕМЫ

В. П. Бабенко, В. К. Битюков, С. В. Марьин

Федеральное государственное бюджетное образовательное учреждение высшего образования «Московский технологический университет» (МИРЭА), г. Москва

Рассмотрены особенности моделирования программой Electronics Workbench (EWB) привода постоянного тока с аналогово-цифровым энкодером в цепи обратной связи.

Ключевые слова: мехатроника, моделирование привода, драйвер электродвигателя, ШИМ-контроллер, энкодер.

В настоящее время сложилась практика двухэтапного проектирования устройств автоматизированного электропривода с развитой системой управления (мехатронные системы). Традиционно на первом этапе выполняется имитационное моделирование с использованием программного продукта Matlab/Simulink, а на втором этапе схмотехническое моделирование реализуется на основе известных пакетов типа OrCAD, PSpice, DesignLab, Workbench. При несомненных достоинствах этих программ по универсальности и точности моделирования, они достаточно дорогие, требуют высокой квалификации проектировщиков, значительного времени на освоение, предъявляют повышенные требования к компьютеру. В ряде случаев, особенно при оценочном моделировании электромеханических систем, оба этапа моделирования можно совместить в одной программе, используя программу–симулятор электронных схем Electronics Workbench (EWB), которая давно и плодотворно используется в педагогической и инженерной практике. Программа отличается удобным и интуитивно понятным интерфейсом, проста в освоении, недорогая (демонстрационные младшие версии распространяются в Internet бесплатно), позволяет моделировать аналоговые, цифровые и смешанные цифро-

СЕКЦИЯ 4. Подготовка и переподготовка инженерных и научных кадров.
Моделирование систем автоматизированного электропривода,
промышленной электроники и автоматического управления.

аналоговые электронные схемы, исследовать электромеханические характеристики устройств, работающих совместно с двигателем постоянного тока. Цикл работ по разработке модели двигателя и ШИМ-драйверов, изложенные в [1...6], обеспечили возможность моделирования комплексных задач, связанных с цифровой системой управления электромеханическим приводом, и внедрить эту актуальную тематику в учебную и научную практику.

Цифровая система управления приводом [1] приведена ниже.

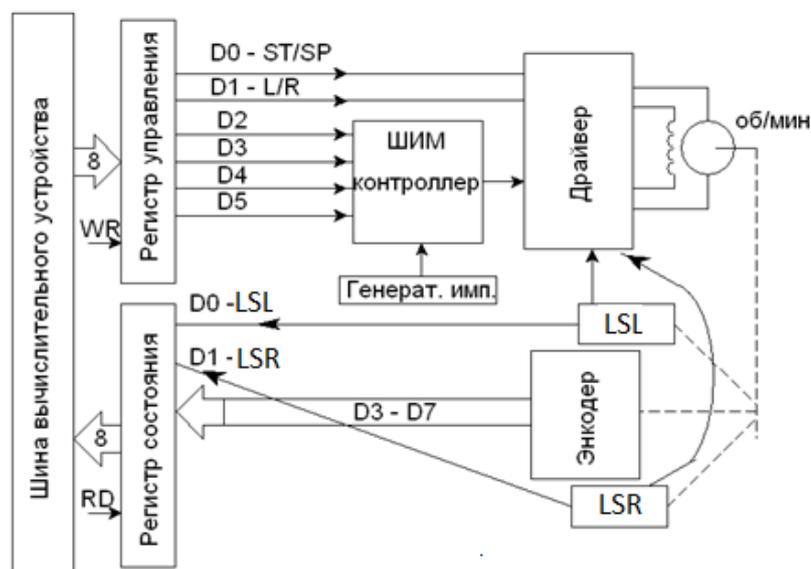


Рисунок 1 - Функциональная схема привода

С приходом системной команды записи WR (Write) вычислительного устройства (ВУ) информация с шины ВУ записывается в регистр управления (РУ). Биты D0 и D1 содержат информацию управления двигателем – Start/Stop и Left/Right. Биты D2-D5, содержащие 4-разрядный код скорости вращения двигателя, поступают в ШИМ-контроллер, где формируется цифровой ШИМ сигнал, частота повторения которого задается генератором импульсов (ГИ), а длительность импульса пропорциональна двоичному коду. Такой контроллер обеспечивает $2^4=16$ градаций скорости вращения. Схемотехника ШИМ-контроллеров для подобных задач на основе счетчиков из библиотеки EWB изложена в [4, 6]. Цифровые сигналы Start/Stop, Left/Right и ШИМ поступают на вход драйвера двигателя и управляют скоростью и направлением вращения двигателя.

СЕКЦИЯ 4. Подготовка и переподготовка инженерных и научных кадров.
Моделирование систем автоматизированного электропривода,
промышленной электроники и автоматического управления.

Схемные решения драйверов двигателя постоянного тока рассмотрены в [1, 3]. Вал двигателя механически связан с устройством контроля положения привода в пространстве (пунктирная линия), в состав которого входит датчик угла поворотов (инкрементный энкодер) и концевые выключатели (Limit Switch) левый и правый LSL и LSR. Информация о положении привода в пространстве фиксируется в регистре состояния (PC). Эта информация считывается ВУ при подаче системной команды чтения RD (READ). Низкий логический уровень концевых выключателей LSL или LSR указывает, что платформа привода вышла за границы рабочего пространства влево или вправо. Сигналы концевых выключателей фиксируются в регистре состояния (PC) для информации вычислительного устройства, а также блокируют драйвер двигателя таким образом, что при $LSL=0$ у привода блокируется перемещение влево, но вправо перемещение остается разрешенным. При $LSR=0$ блокируется перемещение вправо, но влево остается разрешенным.

Аналогово-цифровой вариант инкрементного энкодера приведен на рис. 2.

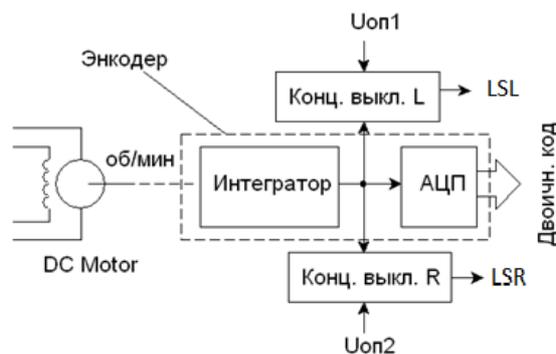


Рисунок 2 - Структурная схема энкодера

Аналоговый сигнал с DC Motor, пропорциональный скорости вращения двигателя, интегрируется в аналоговом интеграторе и оцифровывается в АЦП. В результате на выходе формируется двоичный код пропорциональный числу оборотов двигателя (углу поворота платформы привода). Концевые выключатели L и R представляют собой компаратор (библиотечный элемент EWB), на вход которого подается напряжение с интегратора, которое

СЕКЦИЯ 4. Подготовка и переподготовка инженерных и научных кадров.
Моделирование систем автоматизированного электропривода,
промышленной электроники и автоматического управления.

сравнивается с опорным напряжением $U_{оп1}$ и $U_{оп2}$. С выходов компараторов снимается логический сигнал концевых датчиков. При достижении приводом крайних положений соответствующий концевой датчик устанавливается в 0.

Драйвер (рис. 3) содержит H-мост на транзисторных ключах Q1-Q4, в диагональ которого включен двигатель MG1, и логическую схему управления U1-U3. Сигналы управления в соответствии с функциональной схемой имитируются ключами S1-S5:

- S1 - сигнал Start/Stop; 1/0 – включает и выключает ток в обмотке;
- S2 - сигнал L/R Left/Right; 1/0 – изменяет направление перемещения;
- S3 - сигнал PWM (pulse-width modulation) ШИМ - регулирует скорость вращения, управляя средним значением тока в обмотке путём изменения скважности импульсов;
- S4, S5 - сигнал LSL, LSR - Limit Switch Left/Limit Switch Right концевых выключателей блокируют вращение в том направлении, с которого пришел нулевой сигнал концевой выключателя и не препятствуют вращению в противоположном направлении.

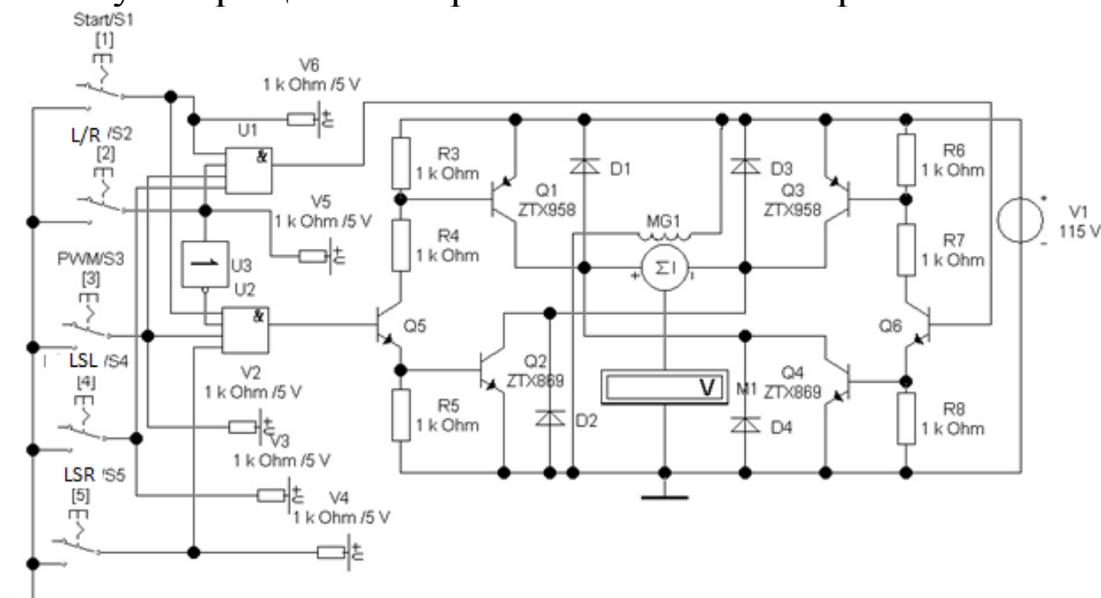


Рисунок 3 - Драйвер двигателя с логикой управления

Используя аналоговый выход в модели двигателя, к которому подключается вольтметр M1, отображающий информацию о

СЕКЦИЯ 4. Подготовка и переподготовка инженерных и научных кадров.
Моделирование систем автоматизированного электропривода,
промышленной электроники и автоматического управления.

скорости вращения двигателя $\omega(t)$ (об/мин.), определяют положение привода в пространстве по числу оборотов $N(t)$ двигателя, интегрируя скорость вращения $\omega(t)$ за время t

$$N(t) = \int \omega(t) \cdot dt + C,$$

где C – константа, зависящая от начальных условий.

На рис. 4 показана схема привода с датчиком положения, основанного на счете числа оборотов двигателя $N(t)$. Драйвер двигателя, электрическая схема которого показана на рис. 3, заменен компонентом Driver (заказной ИС), созданным процедурой создания многоуровневых схем Create Subcircuit. В качестве интегратора использован библиотечный элемент Voltage Integrator из папки Control. Компараторы VR1 и VR2, имитирующие концевые выключатели, включены по схеме реализации допускового контроля. Сигналы компараторов (концевых выключателей) подаются на соответствующие входы ИС Driver.

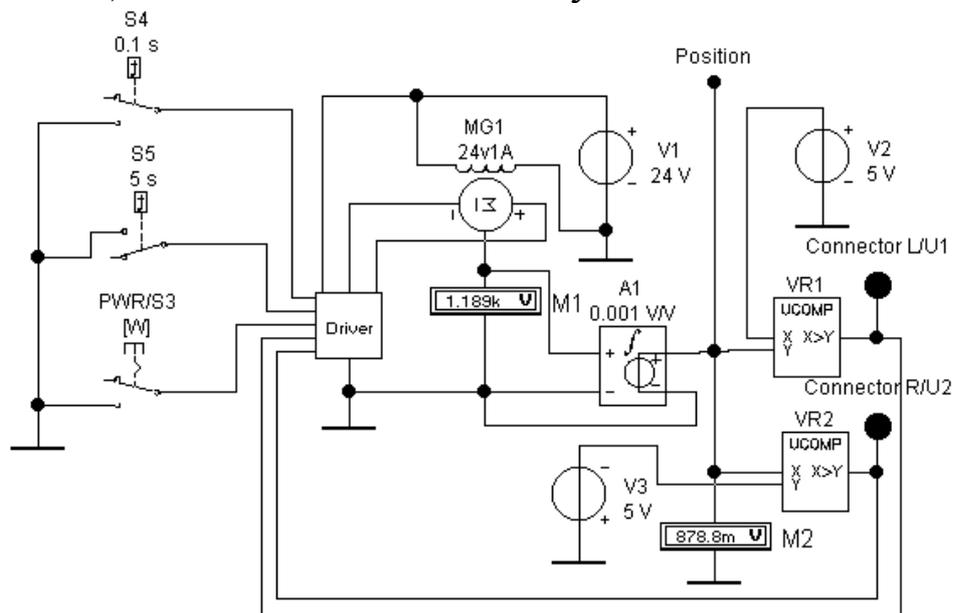


Рисунок 4 - Схема электропривода с ключами временного управления

Пока положение привода в пространстве $N(t)$, представляемое в виде аналогового напряжения, находится в пределах допуска, задаваемого опорными напряжениями источников напряжения $V2$

и V3, на выходе компараторов удерживается логическая единица. При выходе напряжения $N(t)$ за контролируемые пределы ± 5 В, на выходе соответствующего компаратора устанавливается 0. Для моделирования работы схемы по заданному сценарию ключи Start/Stop (S1) и Left/Right (S2) заменяются ключами с временной задержкой S4, S5 (рис. 4).

Временная зависимость напряжений в характерных точках схемы, соответствующая сценарию управления, задаваемым ключами S4, S5, приведена на рис. 5.

Моделирование выполнено при следующих параметрах: для ключа S1 задавалось время Start Off=0,1 с, Start On=20 с, для ключа S2 - время Start Off=5 с, Start On=15 с.

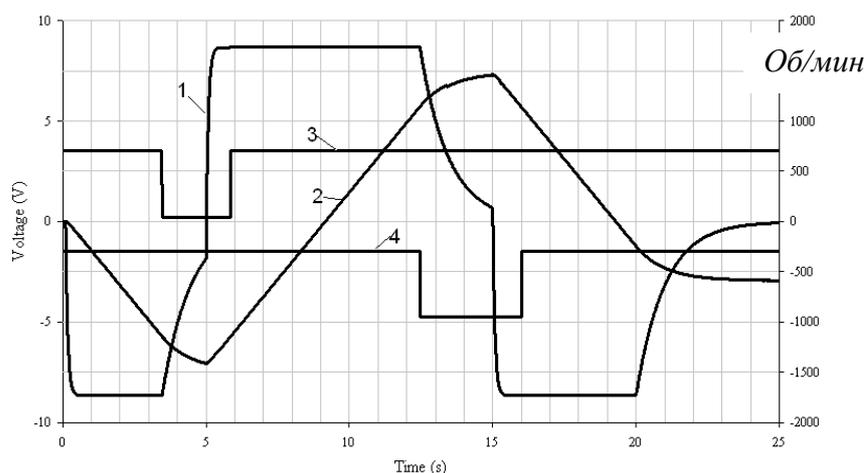


Рисунок 5 - Временные диаграммы работы привода:

- 1 - зависимость скорости вращения $\omega(t)$ (ось Y - справа);
- 2 - сигнал на выходе энкодера $N(t)$ (ось Y - слева);
- 3 - сигнал концевого выключателя L (ось Y - слева);
- 4 - сигнал концевого выключателя R (ось Y - слева, смещение по вертикали -5 В)

С приходом команды Start за время $t=0,3$ с двигатель набирает обороты в минусовую сторону и выходит в установившийся режим (график 1). Счетчик числа оборотов $N(t)$ фиксирует линейно нарастающий участок до момента $t=3,5$ с, когда $N(t)$ достигает порога, срабатывает компаратор Limit Switch R (график 3). Обмотка двигателя обесточивается, ротор вращается по инерции и обороты уменьшаются, но сигнал на выходе энкодера (кривая 2)

СЕКЦИЯ 4. Подготовка и переподготовка инженерных и научных кадров.
Моделирование систем автоматизированного электропривода,
промышленной электроники и автоматического управления.

продолжает расти по нелинейному закону. В момент $t=5$ с ключ $S2$ переключается и изменяет направление вращения. Скорость двигателя (кривая 1) растет в момент $t \approx 5,3$ с скорость вращения достигает установившегося значения. С момента $t=5$ с число оборотов N линейно нарастает до момента $t=12,5$ с, когда сигнал энкодера N не достигает уровня срабатывания компаратора LSL (график 4). В этот момент обмотка двигателя обесточивается, ротор вращается за счет инерции, скорость вращения двигателя уменьшается по экспоненциальному закону. В момент $t=15$ с переключается ключ $S2$ и меняет направление вращения. Двигатель набирает обороты в минусовом направлении и при $t \approx 15,3$ с на стационарный режим. При этом, когда сигнал энкодера N становится меньше установленного порога, сигнал компаратора LSL (график 4) возвращается к исходному высокому уровню.

В момент $t=20$ двигатель выключается. Скорость вращения уменьшается по экспоненциальному закону до нуля.

Рассмотренная методика моделирования мехатронной системы электропривода используется в педагогической и инженерной практике.

Список использованных источников

1. Бабенко В.П., Битюков В.К. Особенности моделирования драйвера двигателя в системе Electronics Work Bench // Учебный эксперимент в образовании. 2015, №4. С. 60-75.
(http://www.mordgpi.ru/upload/iblock/97f/rits-ue-4_2015_1_1_copy.pdf - дата обращения 30.09.2016 г.)
2. Бабенко В.П., Битюков В.К. Особенности разработки модели электродвигателя по его справочным характеристикам в системе EWB // Инновации на основе информационных и коммуникационных технологий. 2015. Т. 1. С. 340-342.
3. Бабенко В.П., Битюков В.К., Симачков Д.С. Схемотехническое моделирование устройства контроля положения привода в пространстве // Электромагнитные волны и электронные системы. 2016. Т. 21. № 4. - С. 11-19.
(<http://www.radiotec.ru/catalog.php?cat=jr5&art=18068> - дата обращения 30.09.2016 г.)

СЕКЦИЯ 4. Подготовка и переподготовка инженерных и научных кадров.
Моделирование систем автоматизированного электропривода,
промышленной электроники и автоматического управления.

4. Бабенко В.П., Битюков В.К. Имитационное моделирование ШИМ-регулятора // Фундаментальные проблемы радиоэлектронного приборостроения. 2015. Т. 15. № 4. С. 150-153. (<http://www.conf.mirea.ru/CD2015/pdf/p4/37.pdf> - дата обращения 30.09.2016 г.)
5. Бабенко В.П., Битюков В.К. Методические особенности разработки модели электродвигателя в системе EWB // Российский технологический журнал. 2015. №2(7). С. 53-66. (<https://www.mirea.ru/upload/medialibrary/3e1/06-babenko.pdf> - дата обращения 30.09.2016 г.)
6. Бабенко В.П., Битюков В.К. Методические особенности компьютерного моделирования ШИМ-контроллеров // Учебный эксперимент в образовании. 2015. №2(74). С. 60-75. (http://www.mordgpi.ru/upload/iblock/66f/ucheks-v-obrazovanii-2_2015.pdf - дата обращения 30.09.2016 г.)

УДК 681.51

ИССЛЕДОВАНИЕ АСУ АД НА БАЗЕ ПЛК TELEMECANIQUE
SR3 B261 BD И ПЧ ALTIVAR 71

А.Ф.Давлетшин, В.Ю.Корнилов

*Казанский Государственный Энергетический Университет,
г.Казань*

Рассматривается система управления асинхронным двигателем на базе преобразователя частоты Altivar 71 при помощи программно-логического контроллера Telemecanique SR3 261 BD. Приводится состав макета, программный пакет, структурная схема.

Ключевые слова: асинхронный двигатель, преобразователь частоты, программно-логический контроллер, автоматизированная система управления.

Макет системы управления включает в свой состав:

1. Программно-логический контроллер Telemecanique SR3 261 BD компании Schneiderelectric

СЕКЦИЯ 4. Подготовка и переподготовка инженерных и научных кадров.
Моделирование систем автоматизированного электропривода,
промышленной электроники и автоматического управления.

2. Преобразователь частоты Altivar 71 от компании Schneiderelectric

3. Асинхронный двигатель AIP71 A2 U3

Данная разработка позволяет исследовать различные схемы построения систем управления частотно-регулируемыми асинхронными электроприводами, в частности, для групповых насосных установок различного назначения.

Микроконтроллер TelemecaniqueSR3 B261BD.

TelemecaniqueSR3 B261BD – программируемый логический микроконтроллер (интеллектуальное реле) ZelioLogic 2 модульного (расширяемого) исполнения SR3, служит для создания небольших систем автоматизации в промышленности и непромышленной сфере.

Применение в промышленности:

- небольшие агрегаты для производства, сборки, отделки и упаковки;
- текстильная промышленность, производство пластмасс, переработка материалов;
- автоматизация сельскохозяйственных машин(системы ирригации, насосные агрегаты, теплицы)

В непромышленной сфере и зданиях:

- автоматизация шлагбаумов, откатных ворот, систем контроля доступа; и освещения
- автоматизация компрессоров и систем кондиционирования воздуха.

Микроконтроллер имеет модульное (расширяемое) исполнение (увеличение общего числа входов/выходов при использовании модулей расширения SR3XT****), а также жидкокристаллический (ЖК) дисплей(экран) с подсветкой на 4 строки по 18 символов.

Altivar 71

Серия преобразователей частоты Altivar 71 предназначена для двигателей мощностью от 0,37 до 500 кВт с тремя типами сетевого питания:

- однофазное 200 – 240 В от 0,37 до 5,5 кВт;
- трехфазное 200 – 240 В от 0,37 до 75 кВт;
- трехфазное 380 – 480 В от 0,75 до 500 кВт.

Преобразователь частоты Altivar 71 имеет встроенные интерфейсы Modbus и CANopen, а также значительные функциональные возможности.

Функциональность преобразователя может быть увеличена с помощью дополнительных карт расширения входов и выходов, коммуникационных карт и интерфейсных карт датчика обратной связи по скорости.

Вся серия ПЧ соответствует международным стандартам МЭК/EN 61800-5-1, МЭК/EN 61800-2, МЭК/EN 61800-3, имеет сертификаты CE, UL, CSA, DNV, C-Tick, NOM 117, ГОСТ и отвечает директивам по защите окружающей среды (RoHS, WEEE и т.д.).

Преобразователь частоты Altivar 71 включается в цепь безопасности производственных установок. Он обладает защитной функцией блокировки ПЧ, исключающей несанкционированный пуск двигателя.

Двигатель АИР71 А2 У3

Электродвигатель трехфазный АИР71А2У3 относится к серии общепромышленных асинхронных электродвигателей переменного тока с короткозамкнутым ротором. Этот электродвигатель имеет две схемы подключения (треугольник/звезда) в зависимости от напряжения токоподающей сети - 220/380 В. Мощность асинхронного электродвигателя АИР 71А2У3 составляет 0,75 кВт, а частота оборотов - 3000 об/мин.

Функциональная схема макета представлена на рисунке 1.

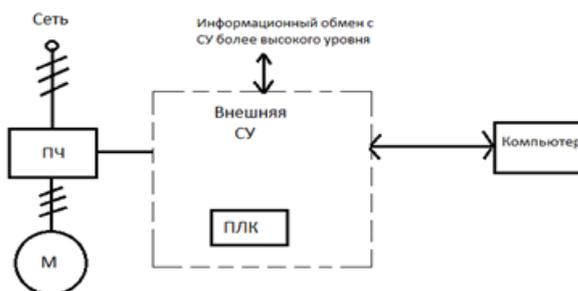


Рисунок 1 – Функциональная схема макета

На рисунке 1 приняты следующие обозначения:

ПЧ – преобразователь частоты

ПЛК – программно-логический контроллер

М – асинхронный двигатель

СУ – система управления

Описание алгоритма функционирования макета:

На компьютере при помощи программы ZelioLogic 2 составляется алгоритм функционирования макета, загружается в ПЛК, далее ПЛК на основе данной программы управляет работой ПЧ, который в свою очередь управляет работой двигателя.

almaz-93@mail.ru, +7-937-579-32-27

УДК 681.51

ЧАСТОТНЫЕ ПРЕОБРАЗОВАТЕЛИ В АВТОМАТИЗИРОВАННЫХ УЧЕБНО-ИССЛЕДОВАТЕЛЬСКИХ КОМПЛЕКСАХ

О.Н. Андрианов, К.А. Золин, И.А. Золин

*ФГБОУ ВО «Сибирский государственный индустриальный
университет», г. Новокузнецк*

Рассматриваются современные частотные преобразователи, их назначение и структура. Рассматриваются отличия частотных преобразователей, созданных производителями промышленной электроники и созданных по авторским схемам.

Ключевые слова: частотные преобразователи, назначение частотных преобразователей, выбор, сравнение.

СЕКЦИЯ 4. Подготовка и переподготовка инженерных и научных кадров.
Моделирование систем автоматизированного электропривода,
промышленной электроники и автоматического управления.

Частотный преобразователь - электронное устройство для изменения частоты электрического тока (напряжения), которое предназначено для изменения частоты электрического тока, что позволяет изменять скорость вращения асинхронных электродвигателей переменного тока. Управление скоростью асинхронных электродвигателей реализуется за счет изменения частоты и величины напряжения, питающего двигатель. КПД таких устройств в большинстве случаев достигает 98%.

Чаще всего частотные преобразователи применяются, чтобы увеличить срок службы технологического оборудования, достичь экономии энергоресурсов, обеспечить оперативное управление и достоверный контроль за работой асинхронного электродвигателя.

Частотные преобразователи за частую состоят из выпрямителя на мощных силовых диодах, инвертора на IGBT транзисторах, шунтированных диодами. Выпрямленное синусоидальное напряжение сети на входе с помощью управляемого широтно-импульсного модулирования в обмотках статора формируются синусоидальные токи с параметрами, позволяющими обеспечить требуемый режим работы электродвигателя. Существуют и другие конструкции частотных преобразователей, которые часто сводятся к аналогичному алгоритму, но описанная выше конструкция наиболее популярна на текущий момент времени.

Для автоматизированных учебно-исследовательских комплексов экономия электроэнергии будет незначительной из-за применения маломощных асинхронных электродвигателей, но возможность качественного и оперативного управления и достоверного контроля за работой асинхронного электродвигателя просто необходима для обучения и проведения исследований.

Сейчас большинство производителей промышленной электроники выпускает частотные преобразователи разных форм-факторов, размеров и обладающих различными характеристиками, поэтому выбор частотных преобразователей очень велик. Отдельное место в этом разнообразии занимают так называемые «векторные» частотные преобразователи, которые позволяют контролировать не только частоту и силу питающего тока, но и его фазу, хотя и стоят дороже.

СЕКЦИЯ 4. Подготовка и переподготовка инженерных и научных кадров.
Моделирование систем автоматизированного электропривода,
промышленной электроники и автоматического управления.

Самые простые дешевые частотные преобразователи стоят порядка 100\$, что по текущему курсу будет около 6700 рублей, а при сборе частотного преобразователя по авторским схемам из интернета цена будет порядка 2000 рублей. Отличительной особенностью авторских схем является то, что все они представляют собой класс «скалярных» частотных преобразователей, но зато их можно дорабатывать и совершенствовать.

Примеры авторских схем с описаниями и пояснениями авторов можно найти в источниках [1-5], некоторые выкладывают даже готовые к скачиванию и изготовлению схемы печатных плат. Также можно найти огромное количество примеров авторских схем с демонстрацией их работы в видео, загруженных на известный видеохостинг YouTube.

На текущем этапе «векторные» частотные преобразователи не дают значительных преимуществ перед «скалярными», поэтому для учебно-исследовательских комплексов рекомендуется применять дешевые «скалярные» частотные преобразователи от крупных производителей, либо еще более интересные и дешевые собранные по авторским схемам. При правильном выборе и настройке «скалярного» частотного преобразователя он покажет себя лучше, чем «векторный» частотный преобразователь.

Список литературы

1. Частотный преобразователь, схемы своими руками [Электронный ресурс] // tokidet. URL: <http://tokidet.ru/elektrooborudovanie/elektrodivigateli/princip-raboty-chastotnogo-preobrazovatelya.html> (Дата обращения: 31.10.2016).
2. Частотный привод 5-200Гц(10-400Гц) своими руками [Электронный ресурс] // СМИ Сайт-ПАЯЛЬНИК. URL: <http://cxem.net/promelectr/promelectr27.php> (Дата обращения: 31.10.2016).
3. Схемы любительских частотных преобразователей [Электронный ресурс] // Электрик Инфо. URL: <http://elektrik.info/main/praktika/545-shemy-lyubitelskih-chastotnyh-preobrazovateley.html> (Дата обращения: 31.10.2016).

СЕКЦИЯ 4. Подготовка и переподготовка инженерных и научных кадров.
Моделирование систем автоматизированного электропривода,
промышленной электроники и автоматического управления.

4. Регулятор скорости вращения асинхронного электродвигателя [Электронный ресурс] // РадиоКОТ. URL: <http://radiokot.ru/circuit/power/converter/14/> (Дата обращения: 31.10.2016).

5. Эффективный источник питания асинхронного двигателя [Электронный ресурс] // Евросамodelки. URL: <http://eurosamodelki.ru/katalog-samodelok/alternativnaja-energetika/effektivnii-istochnik-pitanija-asinhronnogo-dvigatelja> (Дата обращения: 31.10.2016).

ЛАБОРАТОРНЫЙ СТЕНД ПО ИССЛЕДОВАНИЮ ЭЛЕКТРОПРИВОДА ЛИФТА НА ОСНОВЕ ПРОГРАММИРУЕМОГО КОНТРОЛЛЕРА FASTWEL

¹В. А. Кубарев, ¹И. А. Крючкина, ¹Л. А. Федюшина,
²О. Р. Галлямова.,

¹Сибирский государственный индустриальный университет,
²НКИ, г. Новокузнецк

После введения Федеральных государственных образовательных стандартов высшего образования значительное время в учебном процессе должно уделяться выполнению лабораторных и практических работ, для чего необходима сильная лабораторная база.

В Сибирском государственном индустриальном университете на кафедре Автоматизированного электропривода и промышленной электроники на основе контроллера Fastwel CPC10703 и преобразователя Sprint Electric PLX10, модернизирован лабораторный стенд для проведения лабораторных работ по дисциплине «Автоматизированный электропривод типовых производственных механизмов и технологических комплексов» для бакалавров по направлению 13.03.02 «Электроэнергетика и электротехника» для профиля подготовки «Электропривод и автоматика».

Модернизированный лабораторный стенд позволяет изучить основные алгоритмы работы электропривода лифта, кроме того, студенты получают навыки настройки электропривода Sprint Electric PLX10.

СЕКЦИЯ 4. Подготовка и переподготовка инженерных и научных кадров.
Моделирование систем автоматизированного электропривода,
промышленной электроники и автоматического управления.

В качестве программного обеспечения при программировании контроллера применяется программное обеспечение Open Watcom v 1.9, а для конфигурирования преобразователя — поставляемое с ним программное обеспечение PL Pilot.

В состав стенда по исследованию работы электропривода лифта входят:

1. Контроллер Fastwel CPC10703;
2. Двухканальный источник питания (+5, +24 В);
3. ЖК-дисплей WINSTAR WH2004A;
4. Влагозащищенная матричная клавиатура 4x4;
5. Электропривод Sprint Electric PLX10;
6. Блок аналоговых сигналов и индикации (БАСИ);
7. Блок дискретных сигналов (БДС);
8. Макет объекта управления (лифта);
9. Персональный компьютер — рабочее место студента (ПК) с установленной на нём средой PL Pilot для конфигурирования преобразователя PLX10.

Блок-схема лабораторного стенда на основе программируемого контроллера Fastwel CPC10703 и электропривода постоянного тока PLX10 фирмы Sprint Electric представлена на рисунке 1.



Рисунок 1 — Блок-схема стенда на основе программируемого контроллера Fastwel CPC10703

На передней панели стенда расположены:

1. ЖК-дисплей 4 строки по 20 символов.

СЕКЦИЯ 4. Подготовка и переподготовка инженерных и научных кадров.
Моделирование систем автоматизированного электропривода,
промышленной электроники и автоматического управления.

2. Влагозащищенная клавиатура FP-16.
3. Кнопки, имитирующие посты вызова и посты приказа.
4. Переключать режима автоматический / ревизия.
5. Кнопки ручного управления лифтом в режиме ревизии.
6. Цифровые амперметр и вольтметр.
7. ЖК-монитор ПЭВМ..

Внешний вид лабораторного стенда представлен на рисунке 2.



Рисунок 2 — Стенд по исследованию электропривода лифта

Матричная клавиатура с ЖК-дисплеем позволяет студенту выбирать вариант лабораторной работы и отображать на экране ход выполнения технологического процесса, а также редактировать значения технологических параметров, отвечающих за функционирование системы.

Для питания контроллера и органов управления и блокировки стабилизированным напряжением используется двухканальный блок питания с напряжением выходами +5 и +24 В.

СЕКЦИЯ 4. Подготовка и переподготовка инженерных и научных кадров.
 Моделирование систем автоматизированного электропривода,
 промышленной электроники и автоматического управления.

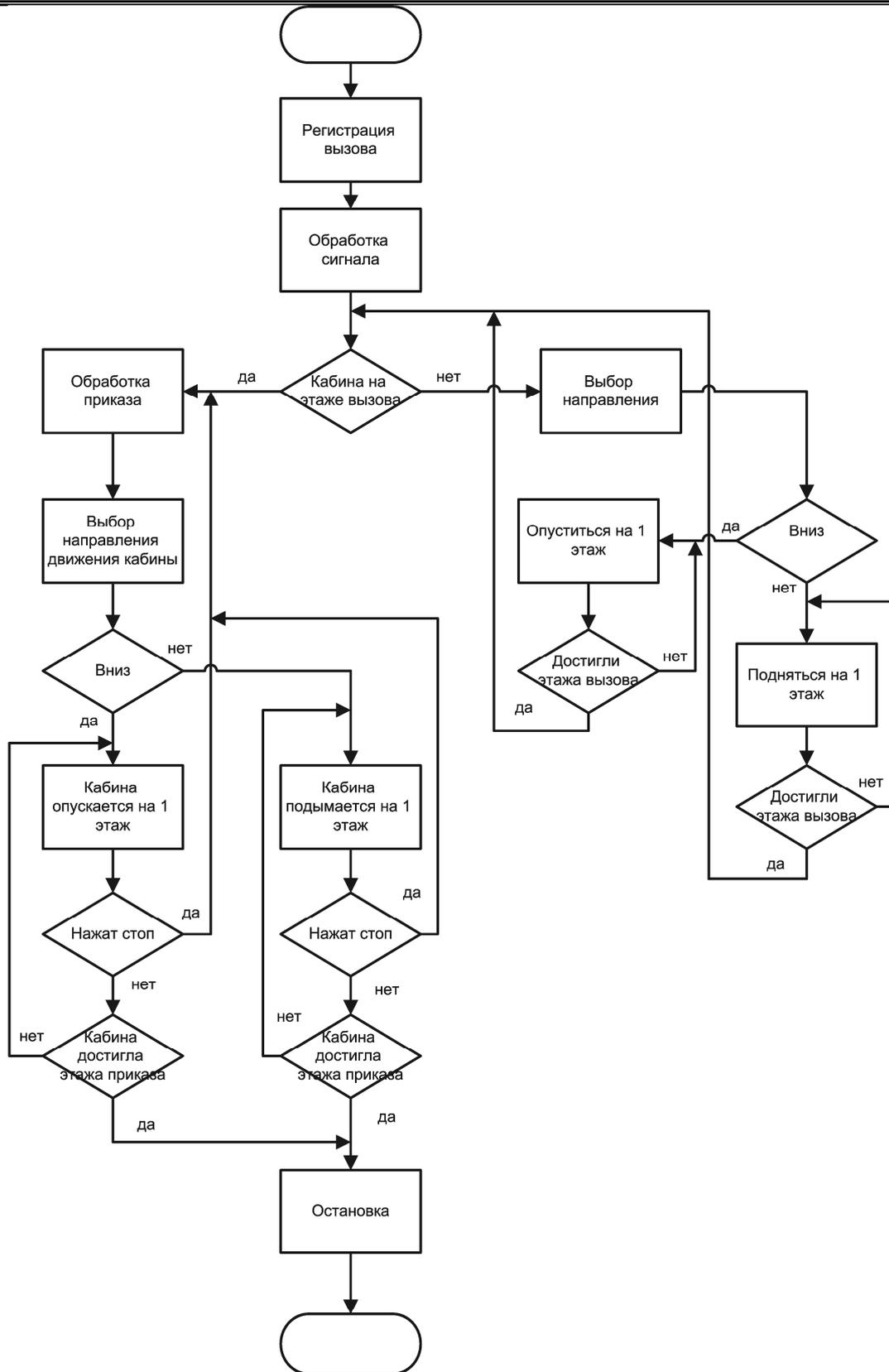


Рисунок 3 — Алгоритм программы стенд по исследованию электропривода лифта

СЕКЦИЯ 4. Подготовка и переподготовка инженерных и научных кадров.
Моделирование систем автоматизированного электропривода,
промышленной электроники и автоматического управления.

В качестве объекта управления используется макет лифта, включающий в себя кабину, двери с соленоидами открывания, тормоз, электропривод с двигателем 2ПН100L мощностью 2,2 кВт.

Аппаратное и программное обеспечение стенда разрабатывалось по модульному принципу с учётом того, чтобы при необходимости иметь возможность в дальнейшем модернизировать стенд как программно, так и аппаратно. При разработке программного обеспечения были применены приемы объектно-ориентированного программирования [1, 2] и принципы построения системы логического управления, изложенные в работах [3, 4, 5] с применением к системе управления лифтом.

Общий алгоритм разработанной программы приведен на рисунке 3.

На базе стенда проводятся лабораторные работы по следующим темам:

1. Лабораторная работа «Изучение работы системы автоматики лифта».
2. Лабораторная работа «Изучение приёмов настройки электропривода лифта»

Необходимо отметить, что стенды на основе контроллеров Fastwel, используются во многих вузах страны и заслужили большое число положительных отзывов.

Литература

1. Ермаков, И. А. Опыт применения алгоритмов взаимодействия при программировании систем технологической автоматики / И. А. Ермаков // В сборнике: Автоматизированный электропривод и промышленная электроника: труды пятой Всероссийской научно-практической конференции, 20-22 ноября 2012 г. — Новокузнецк: СибГИУ, 2012. — с. 133-140

2. Ермаков, И. А. Использование стратегий при программировании систем технологической автоматики / И. А. Ермаков // В сборнике: Автоматизированный электропривод и промышленная электроника: труды четвёртой Всероссийской научно-практической конференции, 12-15 октября 2010 г. — Новокузнецк: СибГИУ, 2010. — с. 171-174

СЕКЦИЯ 4. Подготовка и переподготовка инженерных и научных кадров.
Моделирование систем автоматизированного электропривода,
промышленной электроники и автоматического управления.

3. Представление системы технологической автоматики и защит методами теории графов / Островляничик В.Ю., Кубарев В.А. // Автоматизированный электропривод и промышленная электроника Труды Шестой Всероссийской научно-практической конференции. Под общей редакцией В.Ю. Островляничика. — Новокузнецк, 2014. — с. 63 -74.

4. Принцип построения системы логического управления шахтной подъёмной установкой / В. Ю. Островляничик, В. А. Кубарев Научный вестник НГТУ, 2012 №4 с. 186-190

5. Методика разработки программного обеспечения систем логического управления подъёмными установками / В. Ю. Островляничик, В. А. Кубарев Вестник КузГТУ, 2011 №6 с. 50-54

УДК 681.518.3: 621.3.049.76

СТЕНД ДЛЯ МОДЕЛИРОВАНИЯ ФУНКЦИОНИРОВАНИЯ КОНТАКТНЫХ ДИСКРЕТНЫХ УСТРОЙСТВ АВТОМАТИКИ

И. В. Ломакин, И. С. Саттаров

*Казанский государственный энергетический университет,
г. Казань*

На основе анализа задач решаемых стендом, построены частные алгоритмы работы в различных режимах, выполнено их объединение и получен суммарный алгоритм лабораторного стенда по анализу дискретных устройств.

Ключевые слова: схемотехника, электротехника, конечный автомат, дискретное устройство, логический элемент, элемент памяти, лабораторная установка

Современные комплекты информационно-измерительной техники, систем контроля качества и диагностики эволюционируют как в сторону увеличения точности, так и в сторону автоматизации процессов измерения, контроля и управления.

СЕКЦИЯ 4. Подготовка и переподготовка инженерных и научных кадров.
Моделирование систем автоматизированного электропривода,
промышленной электроники и автоматического управления.

Подготовка специалистов, способных грамотно эксплуатировать сложную технику с дискретным управлением, предполагает развитие у них практических навыков по анализу и синтезу одноктактных дискретных устройств автоматизированных систем контроля и диагностики.

Структурная схема лабораторного стенда должна обеспечивать набор контактной модели дискретного устройства, подачу на вход комбинаций входных сигналов как ручном, так и автоматическом режиме.

В одноктактном режиме необходимо обеспечить последовательную подачу на входы модели различных наборов входных сигналов. При этом на лицевой панели должны отображаться комбинации входных сигналов и значения выходных сигналов. Если все выходные сигналы отсутствуют, то формируется следующая входная комбинация. Если хотя бы один выходной сигнал не равен нулю, формирование входных комбинаций приостанавливается до ручного ввода команды ПУСК.

На основе анализа задач решаемых лабораторной установкой, определены основные функциональные и логические операторы:

- A0- начало работы;
- V1- набор модели дискретного устройства на наборном поле;
- V2- задание базы разрядности анализируемого дискретного устройства;
- V3- подача питания на логическом устройстве;
- A1- установка всех элементов логического устройства в исходное положение;
- A2- контроль исходного состояния;
- A3- индикация состояний входных и выходных элементов;
- A4- контроль состояний выходов;
- A5- останов;
- V4- фиксация состояний входов и выходов обучаемым;
- V5- нажатие кнопки ПУСК;
- A6- формирование тактового импульса;
- A7- контроль окончания цикла (перебора всех 2^n входных наборов n -разрядного дискретного устройства);
- A8- формирование следующего входного набора;
- Aк- конец работы, снятие питания;

СЕКЦИЯ 4. Подготовка и переподготовка инженерных и научных кадров.
Моделирование систем автоматизированного электропривода,
промышленной электроники и автоматического управления.

Кроме функциональных операторов вводятся логические условия.

$$P_1 = \begin{cases} 0 - \text{стенд не в исходном состоянии;} \\ 1 - \text{стенд в исходном;} \end{cases}$$

$$P_2 = \begin{cases} 0 - \text{все выходные сигналы отсутствуют;} \\ 1 - \text{хотя бы один выходной сигнал не равен нулю;} \end{cases}$$

$$P_3 = \begin{cases} 0 - \text{конец цикла не достигнут;} \\ 1 - \text{достигнут конец цикла;} \end{cases}$$

В многотактном режиме входные комбинации формируются вручную. Стенд должна обеспечивать индикацию состояний элементов и проводимостей их цепей. Если состояние устойчивое, то обучаемый изменяет комбинацию входных сигналов, если состояние не устойчивое, то необходимо нажать кнопку ТАКТ, после чего должны измениться состояния элементов памяти. Так продолжается до тех пор, пока не будут исследованы все заданные переходы. Решение на окончание исследований принимает обучающийся.

Дополнительные операторы для многотактного режима.

В7- принятие решения об окончании исследований;

А9- индикация состояний элементов памяти и проводимостей их цепей;

А10- изменение состояний элементов памяти в соответствии с проводимостями их цепей;

В8- ручное изменение состояний входных элементов.

$$P_4 = \begin{cases} 0 - \text{продолжение исследований;} \\ 1 - \text{конец исследований;} \end{cases}$$

$$P_5 = \begin{cases} 0 - \text{состояние устойчивое;} \\ 1 - \text{состояние не устойчивое;} \end{cases}$$

На основе этих операторов построены два частных алгоритма работы установки в режимах анализа одноктактных и многотактных автоматов. В результате их объединения получен суммарный алгоритм, представленный на рисунке 1.

На основе объединенного алгоритма функционирования получена структурная электрическая схема лабораторной установки. Лабораторный стенд должен включать следующие

СЕКЦИЯ 4. Подготовка и переподготовка инженерных и научных кадров.
 Моделирование систем автоматизированного электропривода,
 промышленной электроники и автоматического управления.

функциональные блоки: наборное поле, панель управления, блок индикации, генератор конституентов и блок управляемых элементов памяти.

Исходя из логики работы, предусмотренной алгоритмом функционирования, устанавливаются функциональные связи между блоками. Так наборное поле должно быть связано с блоком элементов памяти. В то же время устройство индикации получает информацию через устройство управления, а блок универсальных элементов памяти связан с панелью управления так же устройство управления.

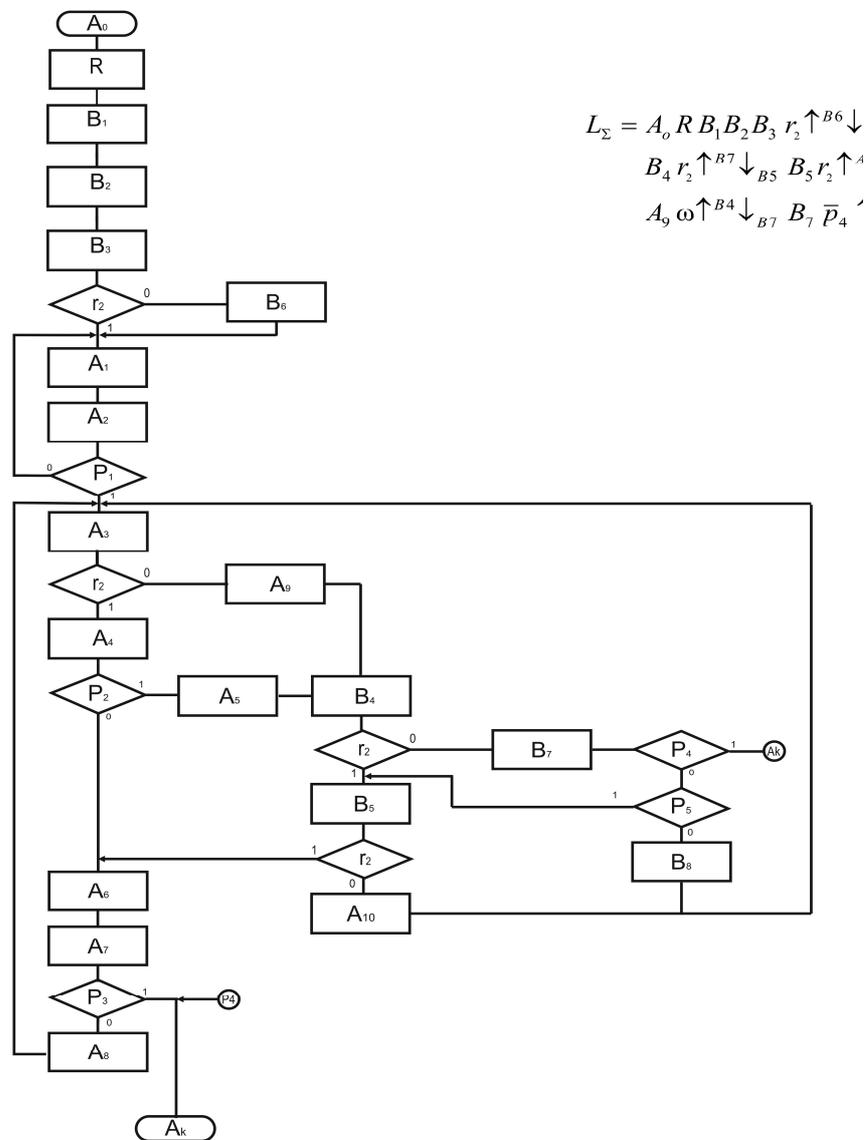


Рисунок 1 - Алгоритм функционирования лабораторной установки

Полученная структурная схема обеспечивает решение задач анализа одноктактных и многотактных дискретных устройств.

Анализ функционирования генератора конstituентов в одноктактном режиме показывает, что его роль может играть обыкновенный двоичный счетчик (линейка DC – триггеров). Этот счетчик должен обеспечивать последовательную генерацию комбинаций входных сигналов, с весами от 0 до 256 при поступлении на вход тактовых импульсов G.

Для работы в многотактном режиме необходимы элементы памяти, которые должны отвечать нескольким требованиям, в зависимости от выбранного вида элемента.

Если вид элемента – элемент памяти, то он должен переходить в состояние, соответствующее значению проводимости цепи реагирующего органа (Y_i) после поступления тактового импульса G. Такую функцию можно реализовать с помощью синхронного двухтактного DC – триггера.

Если выбран вид элемента – входной элемент, то его состояние должно соответствовать значению входного сигнала X_i , задаваемого на панели управления, независимо от значений Y_i и G. Такая функция реализуется асинхронным RS – триггером или DC – триггером при наличии синхросигнала.

Следовательно, блок универсальных элементов памяти представляет собой набор синхронных двухтактных DC – триггеров, имеющих различную коммутацию в разных режимах (рисунок 2). Для обеспечения требуемого режима работы универсальных элементов памяти необходимы коммутаторы входных информационных и тактовых сигналов. Для каждого входа триггера разрабатывается свой коммутатор.

Реализацию лабораторной установки можно выполнить в двух вариантах: полностью на контактных элементах и в гибридном виде.

На контактных элементах целесообразно синтезировать типовой универсальный элемент, представляющий собой релейный DC – триггер с коммутатором. Из шести – восьми этих элементов и будет построена эта установка. Следует учесть, что в этом случае генератор тактовых импульсов также синтезируется на контактных элементах.

СЕКЦИЯ 4. Подготовка и переподготовка инженерных и научных кадров.
 Моделирование систем автоматизированного электропривода,
 промышленной электроники и автоматического управления.

В гибридном варианте коммутационное поле строится на четырехконтактных реле. Управление этими реле можно организовать с помощью микроконтроллера. Микроконтроллер будет выполнять функции генератора тактовых импульсов, генератора конstituентов и блока управляемых элементов памяти. Выбор режима формирования управляющих сигналов организуется программно на основе анализа входных сигналов с панели управления.

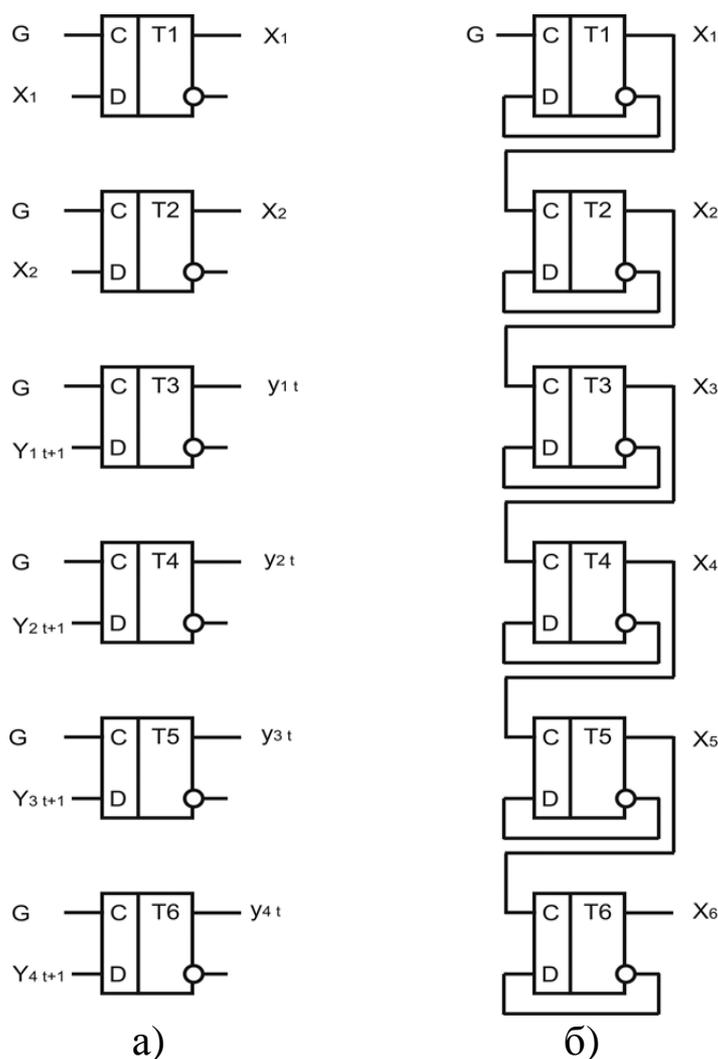


Рисунок 2 – Элементы памяти в многотактном (а) и однотоактном (б) режимах

Выводы

Анализ функционирования силовых элементов автоматизированных систем энергоснабжения и сельского хозяйства показывает необходимость практической подготовки

специалистов и бакалавров в области анализа и синтеза релейных устройств.

Литература

1. Ломакин И.В. Программное обеспечение и технология программирования микроконтроллеров. Лабораторный практикум / И.В. Ломакин. – Казань: Казан. гос. энерг. ун-т, 2009. – 92 с.

2. Муханин, Л. П. Схемотехника измерительных устройств [Электронный ресурс] / Л. П. Муханин. - Москва : Лань, 2009. - 288 с. : ил. - Режим доступа: <http://lanbook.ru/>

3. Чижма С.Н. Электроника и микросхемотехника [Электронный ресурс]: учеб. пособие. — М.: ФГБОУ «Учебно-методический центр по образованию на железнодорожном транспорте», 2012. — 359 с. - Режим доступа: <http://lanbook.ru/>

4. Справочник по электротехнике и электрооборудованию (5-е изд., испр.)/Серия "Справочники". - Ростов н/Д: Феникс, 2004. - 480 с., ил./

УДК 621.833

РАЗРАБОТКА И ИССЛЕДОВАНИЕ МАКЕТА СТАНЦИИ ПОЛИВА НА ЭКСПЕРИМЕНТАЛЬНОМ СТЕНДЕ «DANFOSS»

Р.Т. Сайфиева, Д.А. Гаврилин, Т.Х. Мухаметгалеев
*Казанский Государственный энергетический Университет, г.
Казань*

В данной статье рассматривается разработка и исследование макета станции полива. Описывается состав макета, составлен алгоритм функционирования система полива в различных режимах работы.

Ключевые слова: Насосная установка, режим работы, автоматизация, алгоритм, система полива, датчики.

Насосная установка состоит из (рисунок 1):

1. Резервуар для воды. В данный резервуар вода поступает из водопровода. Контроль уровня воды осуществляется датчиками

СЕКЦИЯ 4. Подготовка и переподготовка инженерных и научных кадров.
Моделирование систем автоматизированного электропривода,
промышленной электроники и автоматического управления.

(датчик нижнего уровня, датчик верхнего уровня, датчик аварийного уровня).

2. Насосная установка. Состоит из трех насосов Grundfos CH2-30 A-W-A-CVBB (2 насоса рабочие, 1 резервный). Четыре преобразователя частоты (ПЧ) Danfoss AQUA Drive FC-202 (3 преобразователя подключены к каждому из насосов, а 1 преобразователь общий).

3. Датчики для анализа состояния окружающей среды и полива: датчик дождя (Д1): сигнал подается на управляющее устройство при выпадении осадков; датчик ветра (В1): сигнал подается на управляющее устройство при увеличении скорости ветра. Датчик влажности грунта (ВГ1): сигнал подается на устройство управления при достижении необходимой влажности газона. Датчик температуры: подает сигнал о температуре окружающей среды на управляющее устройство, для того чтобы выбрать режим полива.

Описание работы системы полива

На пульте управления (ПУ: A_0) нажать кнопку для подачи напряжения на блоки и элементы системы с распределительного щита (РЩ). В устройстве управления (УУ) по умолчанию формируется команда на запуск режима №1, производительность которого максимальна и равна $5\text{ м}^3/\text{ч}$. Затем производится проверка датчиков: дождя (Д1), ветра (В1), влажности грунта (ВГ1); если есть сигнал с датчиков, то в УУ формируется команда на завершение работы до снятия сигнала, если сигналы с датчиков отсутствуют, то в УУ формируется, а затем через блок коммутации (БК) подается команда на открытие задвижек в блоке задвижек (БЗ). После чего в УУ формируется и через БК подается команда «Включить преобразователь частоты №1 (ПЧ1)». Далее ПЧ1 запускает двигатель №1 (М1(Н1)), разгоняет его до номинальной скорости и переводит его на работу от сети, после чего ПЧ1 подает сигнал в УУ о готовности М1(Н1) и в УУ формируется и через БК подается команду «Выключить ПЧ1».

Далее в УУ формируется и через БК подается команда «Включить ПЧ2». Затем ПЧ2 запускает М2(Н2), разгоняет его до номинальной скорости и переводит двигатель на работу от сети,

СЕКЦИЯ 4. Подготовка и переподготовка инженерных и научных кадров.

Моделирование систем автоматизированного электропривода, промышленной электроники и автоматического управления.

после чего ПЧ2 подает сигнал в УУ о готовности М2 (Н2) и в УУ формируется и через БК подается команда «Выключить ПЧ2».

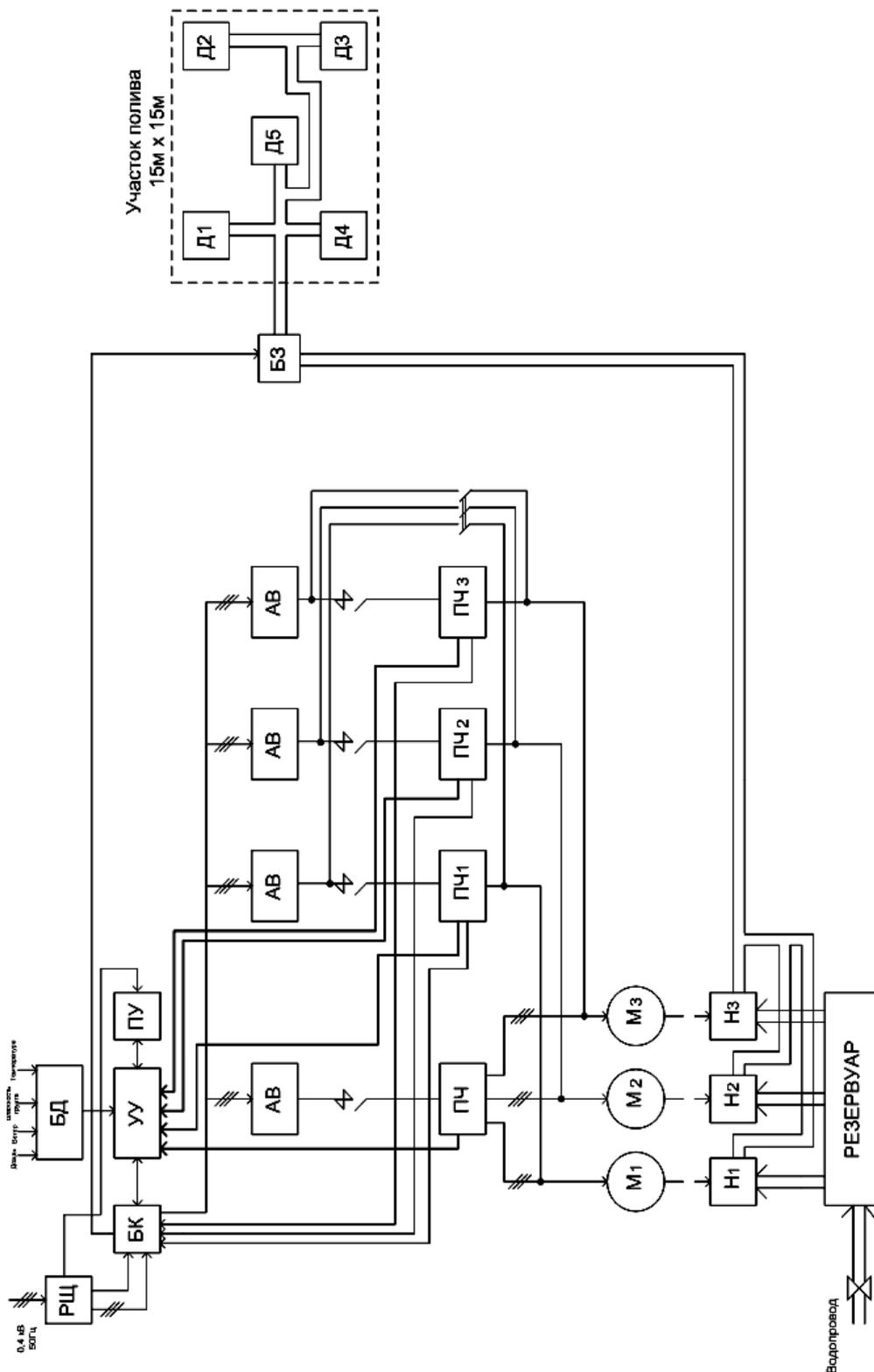


Рисунок 1 - Структурно – гидравлическая схема станции полива

СЕКЦИЯ 4. Подготовка и переподготовка инженерных и научных кадров.
Моделирование систем автоматизированного электропривода,
промышленной электроники и автоматического управления.

Если сработал датчик влажности грунта, УУ формирует и подает через БК команду на завершение цикла и переход системы в режим ожидания. После снятия сигнала с датчика влажности грунта, датчик температуры анализирует температуру окружающего воздуха и подает данные в УУ. После чего, в УУ формируется и подается через БК команда на включение одного из режимов (№2 или 3, №4 или 5, №6 или 7, в зависимости от наработки насосного агрегата).

Забор воды насосами производится из резервуара, контроль которого осуществляется датчиками верхнего, нижнего и аварийного уровней.

После 12 часовой работы системы, в УУ формируется и подается через БК команда на выключение всей системы.

На основании словесного описания работы СП был составлен алгоритм функционирования (рисунок 2)

Режим 1

- 1) Начало цикла
- 2) Проверка датчиков: Если 1, то перейти к 13, в противном случае перейти к 3.
 - 2.1) Если сработал Д1 и/или В1 и/или ВГ1 при включении установки перейти к 13, если сработал датчик во время полива перейти к 11.
- 3) Подать команду «вкл. ПЧ1»
- 4) Подать команду «вкл. насос 1»
- 5) Подать команду «перевод насоса 1 в сеть»
- 6) Снять команду «вкл. ПЧ1»
- 7) Подать команду «вкл. ПЧ2»
- 8) Подать команду «вкл. насос 2»
- 9) Подать команду «перевод насоса 2 в сеть»
- 10) Снять команду «вкл. ПЧ2»
- 11) Снять команду «вкл. насос 1»
- 12) Снять команду «вкл. насос 2»
- 13) Конец цикла
- 14) Перейти к режиму (2-7)
- 15) Конец работы

СЕКЦИЯ 4. Подготовка и переподготовка инженерных и научных кадров.
 Моделирование систем автоматизированного электропривода,
 промышленной электроники и автоматического управления.

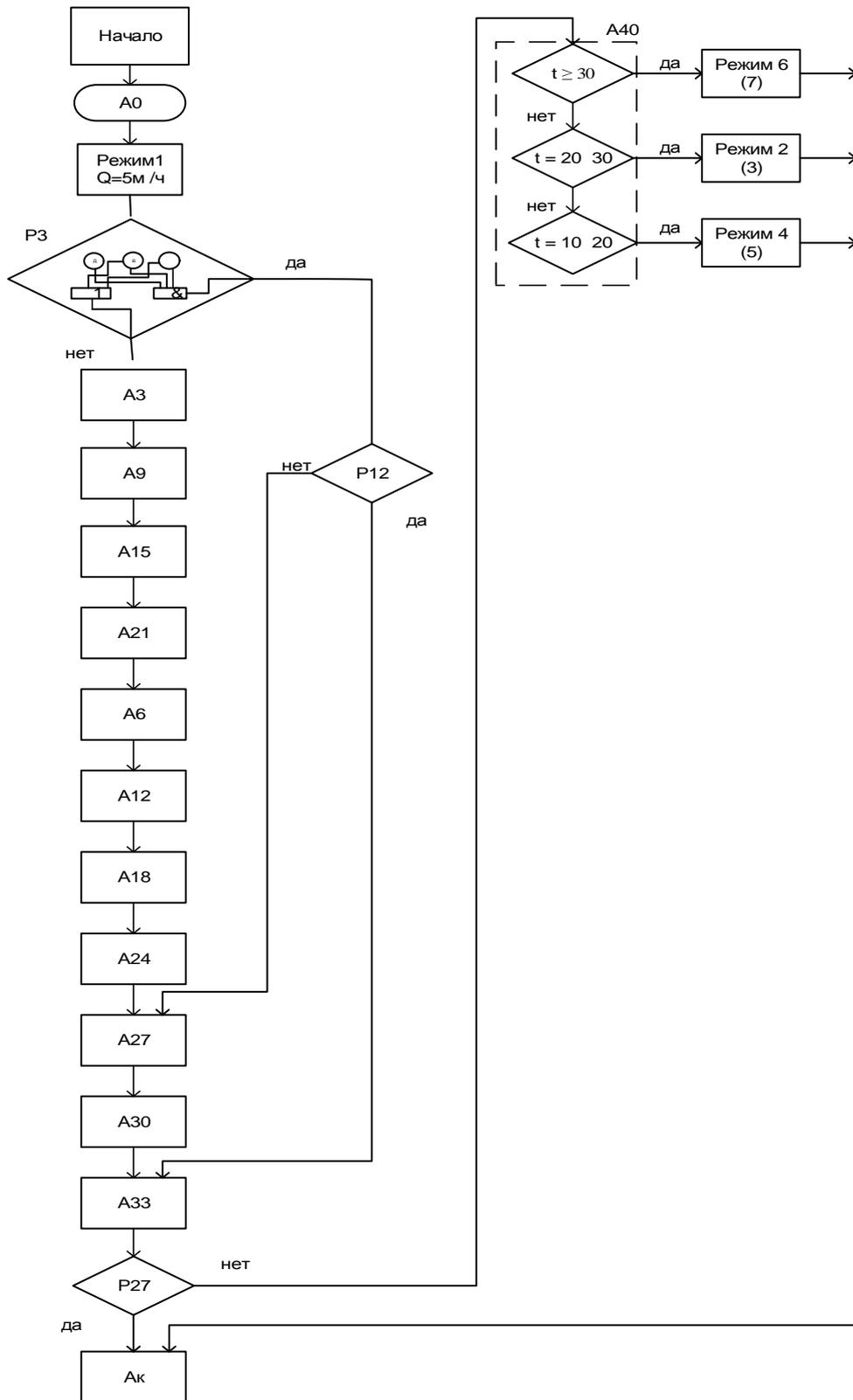


Рисунок 2 – Алгоритм функционирования СП

СЕКЦИЯ 4. Подготовка и переподготовка инженерных и научных кадров.
 Моделирование систем автоматизированного электропривода,
 промышленной электроники и автоматического управления.

Выбор режимов 2 – 7 осуществляется по температуре окружающей среды

Логические операторы (рисунок 2)

$\left. \begin{matrix} \bar{P}_3 = 1, \text{ если есть сигнал хотя бы с одного из датчиков Д1, В1, ВГ1} \\ \bar{P}_3 = 0, \text{ в противном случае, если не сработал ни один из датчиков} \end{matrix} \right\}$

$\left. \begin{matrix} \bar{P}_{12} = 1, \text{ если датчики Д1, В1, ВГ1 сработали до начала полива} \\ \bar{P}_{12} = 0, \text{ если датчики сработали во время полива} \end{matrix} \right\}$

$\left. \begin{matrix} \bar{P}_{27} = 1, \text{ если требуется закончить работу} \\ \bar{P}_{27} = 0, \text{ в противном случае} \end{matrix} \right\}$

Функциональные операторы (рисунок 2)

A₀- Подать питание

A₁- Начало цикла

A₃- Подать команду «вкл. ПЧ1»

A₆- Подать команду «вкл. ПЧ2»

A₉- Подать команду «вкл. М1(Н1)»

A₁₂- Подать команду «вкл. М2(Н2)»

A₁₅- Подать команду «перевод М1(Н1) в сеть»

A₁₈- Подать команду «перевод М2(Н2) в сеть»

A₂₁- Снять команду «вкл. ПЧ1»

A₂₄- Снять команду «вкл. ПЧ2»

A₂₇- Снять команду «вкл. М1(Н1)»

A₃₀- Снять команду «вкл. М2(Н2)»

A₃₃- Конец цикла работы

A₄₀- Выбор режима по датчику температуры

A_к- Конец работы

Логическая схема алгоритма

A₀ A₁ p₃ ↑³ ↓₃ p₁₂ ↑¹² ↑¹² A₃ A₉ A₁₅ A₂₁ A₆ A₁₂ A₁₈ A₂₄ ↓₁₂ A₂₇ A₃₀ ↓₁₂
 A₃₃ p₂₇ ↑²⁷ ↓₂₇ A₄₀ A_к

**ПРЕДЛОЖЕНИЕ ПО ДОПОЛНЕНИЮ ПАКЕТОВ
ПРИКЛАДНЫХ ПРОГРАММ «1С: ТОИР» И «TRIM-PMS» ДЛЯ
УПРАВЛЕНИЯ РЕМОНТАМИ И ОБСЛУЖИВАНИЕМ
ЭЛЕКТРОЭНЕРГЕТИЧЕСКОГО ОБОРУДОВАНИЯ
ПРЕДПРИЯТИЙ**

А.В. Темников

*Федеральное государственное бюджетное образовательное
учреждение высшего образования
«Сибирский государственный индустриальный университет*

Разработка пакетов программ в области автоматизации задач по управлению ремонтами и обслуживанием оборудования в настоящее время является актуальной задачей, для чего следует создавать коллектив программистов или использовать готовые пакеты программ с сопровождением в данном направлении, например, «1С: ТОИР Управление ремонтами и обслуживанием оборудования» (г. Москва) [1] или ППП «TRIM-PMS» (г. С. Петербург) [2]. Первый пакет создан фирмой «Ремонт-Эксперт», работающей в составе группы «Деснол Софт Проджект», второй – компанией «АйТиЭм».

Оба пакета разработаны на платформе «1С», что позволяет интегрировать их с другими пакетами, которые используются на предприятии. Основное оборудование – механическое, но при соответствующей проработке нормативной и справочной базе пакеты применимы к любому оборудованию, например, к электроэнергетическому. Это показано на примере внедрения пакета «1С: ТОИР» на предприятии «Башкирская электросетевая компания» (БЭСК) [3]. Техническое обслуживание и ремонт оборудования определено на предприятии как бизнес-процесс второй очереди единой системы автоматизации EPR. Пакеты работают с промышленной СУБД «MS SQL Server» и реализуют стратегию управления EAM (Enterprise Asset Management), которая заключается в систематической и скоординированной деятельности предприятия, нацеленной на оптимизацию управления физическими активами и режимами их работы, рисками и расходами на протяжении всего жизненного цикла для

СЕКЦИЯ 4. Подготовка и переподготовка инженерных и научных кадров.
Моделирование систем автоматизированного электропривода,
промышленной электроники и автоматического управления.

достижения и выполнения стратегических планов. Данный бизнес-процесс связан со значительными затратами материальных и трудовых ресурсов, что серьезно влияет на финансовые результаты бизнеса в целом. Группа компаний «БЭСК» занимает лидирующее положение на рынке передачи электроэнергии на территории Башкортостана и владеет магистральными и распределительными электрическими сетями общей протяженностью более 87 тыс. км, 592 подстанциями разной мощности и напряжения, 22000 трансформаторными пунктами. В компании работает 7500 человек.

К бизнес-процессам пакета «1С: ТОИР» относят: учет оборудования и нормативов; учет показателей эксплуатации; планирование ремонтов; управление материально-техническим обеспечением ремонтов; управление персоналом; управление нарядами и работами; управление документацией; анализ эффективности и формирование отчетности. Все это, кроме управления персоналом, нарядами и работами, есть в нашем пакете «Учет, планирование ремонта, аварийность электроэнергетического оборудования» [4]. Однако надо отметить, что пакет «1С: ТОИР» в отличие от пакета [4] выполнен на современной основе и без особых усилий может быть интегрирован в автоматизированную систему управления предприятием. Разработчики пакета «1С: ТОИР» считают допустимым расширение возможностей пакета за счет дополнительных программ, поэтому мы предлагаем дополнить пакет программами расчета экономических, вероятностных и оперативных показателей ремонта «СМОНАК» [5].

Для адаптивного управления ремонтом электрооборудования крупного предприятия (электроремонта) нами предложена организационно-техническая система под условным названием «ПАРАМЕТР», которая может быть отнесена к автоматизированным системам управления с функциональной структурой в виде двухконтурной адаптивной системы массового обслуживания (СМО) с накопителем требований [5]. Программа «СМОНАК» является частью системы «ПАРАМЕТР» и базируется на следующих теоретических положениях.

Функционал эффективности программного управления определяется выражением [1]:

$$\Phi = \Phi \{ R_9; G_i^{cMO}; W_i^{cMO}; T_c; RC_i; q_9; F(t) \}, \quad (1)$$

где RC_i – ограничения в i – тых материальных ресурсах; θ_9 – набор функций управления структурой объекта и стратегий эксплуатации и ремонта; $F(t)$ – закон выбора моментов адаптации во времени; R_9 – агрегативная модель электроремонта; G_i^{cMO} и W_i^{cMO} – наборы i -тых экономических, вероятностных и оперативных показателей электроремонта; T_c – критерий экономичности построения структуры техноценоза [6].

Управление будет оптимальным, если в идеале добиться оптимизации критериев:

$$\begin{aligned} T_c &\rightarrow \min, \text{ если } A^{(n)} \rightarrow \text{опт}, \text{ где } A^{(n)} - \text{структура парка}; \\ j^{(6)}(t) &\rightarrow \text{опт}, \quad j(t) \rightarrow \text{опт}, \text{ если } w_{y9}^{(1)}(t) \rightarrow \min; \\ 3 &\rightarrow \min, \text{ если } w_{y9}^{(1)}(t) \rightarrow \min \text{ и } A^{(6)}(t), A(t) \rightarrow \text{опт}, \end{aligned}$$

где $A^{(6)}(t), A(t)$ – структура внешнего и внутреннего контура адаптации электроремонта как СМО; $j^{(6)}(t), j(t)$ – стратегии эксплуатации и ремонта электрооборудования; 3 – приведенные затраты по варианту размещения электроремонта, определенные выбранной экономико-математической моделью; $w_{y9}^{(1)}(t)$ – параметр эквивалентного ремонтного потока электромашин в ремонт вида ℓ .

В пакете реализован вариант программного управления системой электроремонта, когда целевая функция содержит два критерия, один из которых определяет стоимость электроремонта как СМО в течение часа G_1^{cMO} , а другой – стоимость обслуживания единицы оборудования в СМО G_2^{cMO} . Тогда оптимальной стратегией управления θ_9 на внутреннем контуре СМО с накопителем требований и групповыми заявками на ремонт может служить минимум критериев G_1^{cMO} и G_2^{cMO} .

$$\begin{aligned} G_1^{cMO} &= n_{pk} \cdot C_{pk}^{(1)} + (n - n_{pk}) \cdot C_{нк}^{(1)} + m_c \cdot C_o^{(1)} + N_{om} \cdot C_{om}^{(1)} + \\ &+ E_n \cdot (S_k^{(1)} \cdot n + S_n^{(1)} \cdot m) / T_2, \end{aligned} \quad (2)$$

СЕКЦИЯ 4. Подготовка и переподготовка инженерных и научных кадров.
 Моделирование систем автоматизированного электропривода,
 промышленной электроники и автоматического управления.

где n_{pk} – среднее число ремонтников, занятых обслуживанием, человек; $C_{pk}^{(1)}$ и $C_{nk}^{(1)}$ – средние затраты соответственно при работе или простое канала обслуживания, за который принимается один ремонтник, руб./человеко. час; n и m – соответственно количество всех ремонтников и мест в накопителе; m_c – среднее число требований в накопителе, ед.; $C_o^{(1)}$ – средние затраты при ожидании обслуживания требования **I**- того потока в накопителе (складе) или очереди, руб./ч. ячейку); $C_{от}^{(1)}$ – средние потери на одно требование **I**- того потока, получившее отказ в обслуживании, руб./отказ; $N_{от}$ – среднее число требований, получивших отказ в обслуживании в течение часа, отказ; E_n – нормативный коэффициент эффективности капитальных вложений; T_r – годовой фонд рабочего времени, ч.; $S_k^{(1)}$ – капитальные вложения на канал обслуживания **I**- того потока, руб./канал; $S_n^{(1)}$ – капитальные вложения на одно место накопителя, руб./канал.

$$G_2^{cmo} = \frac{G_1^{cmo}}{\Pi}, \quad (3)$$

где Π – производительность системы обслуживания, ед./ч.

Если в текущий расчётный момент времени адаптации стоимостные показатели неизменны, а параметр входящего “**I**” ремонтного потока $\omega^{(1)}(t)$ известен в количественном и качественном отношении, то минимизация критериев G_1^{cmo} и G_2^{cmo} может быть достигнута изменением интенсивности обслуживания единицы потока μ , формированием групповых (серийных) потоков электрооборудования $\lambda_{гр}$, изменением количества ремонтников и мест накопителя.

В стационарном режиме принятая модель СМО описывается через стационарные вероятности состояний P_i :

$$- \lambda_{гр} \cdot P_0 + \mu \cdot P_1 = 0,$$

η

СЕКЦИЯ 4. Подготовка и переподготовка инженерных и научных кадров.
 Моделирование систем автоматизированного электропривода,
 промышленной электроники и автоматического управления.

$$- (k \cdot \mu + \lambda_{гр}) \cdot P_k + (k + 1) \cdot \mu \cdot P_{k+1} + \lambda_{гр} \sum_{i=1}^{k-i} P_{k-i} \cdot a_i = 0$$

при $1 \leq k < n$, (4)

$$- (n \cdot \mu + \lambda_{гр}) \cdot P_k + n \cdot \mu \cdot P_{k+1} + \lambda_{гр} \sum_{i=1}^{\eta} P_{k-i} \cdot a_i = 0$$

при $n \leq k < n + m$,

где $\eta = \min(\xi, k)$ – наименьшее из двух чисел ξ и k ; P_0 – вероятность того, что все каналы обслуживания свободны; P_1 – вероятность того, что все каналы обслуживания заняты; a_i – распределение вероятностей групповых потоков; $i = 1, 2, \dots, k, \dots, j, \dots, \xi$.

Для решения уравнений (4) требуется оценка $\lambda_{гр}$, μ , a_i :

$$I_{cp} = \frac{I}{\sum_{i=1} a_i \cdot i}, \quad (5)$$

$$m = \frac{1}{T}, \quad (6) \quad a_i = \frac{a}{\sum_{i=1} a_i}, \quad (7)$$

$$a_i = \frac{(I \cdot t)^i}{i} \cdot e^{-I}, \quad (8)$$

$$\lambda = \omega(t) \cdot N, \quad (9)$$

Где

λ – интенсивность потока электромашин в СМО;

T – время обслуживания единицы потока;

a_i , a_i – ненормированная и нормированная смещённая оценка вероятности поступления партии из i требований в единицу времени в СМО.

Результаты решения уравнений (4) по P_i , P_0 , P_1 используются для оценок вероятностных состояний СМО с целью определения $W_i^{СМО}$, а также для оценок m_c , $N_{от}$, $n_{рк}$, Π с целью определения $G_1^{СМО}$ и $G_2^{СМО}$:

$$m_c = \sum_{j=1}^m j \cdot P_n + j, \quad (10)$$

$$n_{рк} = \sum_{i=1}^n i \cdot P_i + n \cdot \sum_{i=n+1}^{m+n} P_i, \quad (11)$$

СЕКЦИЯ 4. Подготовка и переподготовка инженерных и научных кадров.
 Моделирование систем автоматизированного электропривода,
 промышленной электроники и автоматического управления.

$$N_{от} = \lambda_{гр} \cdot \sum_{i=\theta}^{n+m} P_i \cdot \sum_{j=n+m-i+1}^{\xi} a_j, \quad (12) \quad \Pi = \mu \left(\sum_{i=1}^n i \cdot P_i + \sum_{i=n+1}^{n+m} P_i \right), \quad (12)$$

где $i = 1, 2, \dots, k, \dots, j, \dots, \xi$;

$\theta = \max(n + m - \xi + 1, 0)$ – наибольшее из чисел $n + m - \xi + 1, 0$.

Если $\lambda_{гр}$ и μ остаются неизменными в течение расчётного времени адаптации, то, варьируя текущие значения n и m от единицы до заданного пользователем максимума, минимизируем $G1_{смо}$ и $G2_{смо}$. Программа «СМОНАК» предполагает ремонтные потоки простейшими и работает с параметрами потоков согласно формуле 9. При несоразмерно большом количестве потоков для обработки появляется смысл их эквивалентирования с использованием единой расчетной единицы – условной электромашин (УЭ), что продемонстрировано в работе автора [7] и отражено при оптимизации программного управления выше.

Программа прошла обкатку при анализе эффективности работы электроремонтного цеха Кузнецкого металлургического комбината (КМК) в 1989 году. Исходные данные получены из статистики КМК за 1965 – 1990 годы и проекта высокомеханизированного склада для КМК (1986 г.) и составили после эквивалентирования ремонтных потоков потоками условных электромашин: $\lambda_{гр} = 2,112^{1/ч}$; $\mu = 0,036^{1/ч}$; $a_1 : a_1 = 0,720$; $a_2 = 0,224$; $a_3 = 0,046$; $a_4 = 0,007$; $a_5 = 0,001$; $C_{пк} = 2,5^{руб/чел \cdot ч}$; $C_{рк} = 7,5^{руб/чел \cdot ч}$; $C_o = 0,7^{руб/ч \cdot ячейку}$; $C_{от} = 312,77^{руб/отказ}$; $S_k = 7815,38^{руб/канал}$; $S_n = 38,09^{руб/ячейку}$. При двухсменной работе электроремонтного цеха $T_r = 4070$ ч. Коэффициент E_n принят равным 0,15. Результаты расчётов (таблица 1) показывают, что в 1989 году на КМК существовала возможность повышения производительности труда ремонтников и уменьшения стоимости обслуживания при условиях:

- организации групповых потоков электромашин одинаковых или близких по трудозатратам типоразмеров;
- увеличения ёмкости склада-накопителя перед первой фазой обслуживания электромашин – «разборкой и мойкой» – до 50 условных ячеек.

СЕКЦИЯ 4. Подготовка и переподготовка инженерных и научных кадров.
Моделирование систем автоматизированного электропривода,
промышленной электроники и автоматического управления.

Пакеты «1С:ТОИР» и «TRIM-PMS» оперируют только с детерминированными бизнес-процессами и могут не реагировать на случайные изменения в них, поэтому, на наш взгляд, введение в них вероятностной программы «СМОНАК» было бы полезно для эффективного анализа деятельности ремонтной службы.

Таблица 1 – Сравнительная таблица результатов анализа

Показатели электроремонтного цеха	Действительные за 1989 г.	Расчётные
$n_{рк}$, человек	198	157
m , ячеек накопителя	38	50
Π , ед/ч	1,553	1,885
$N_{от}$, ед.	Нет данных	0,0129
m_c , ед.	Нет данных	10,399
Число одновременно обслуживаемых электродвигателей, ед.	2,08	8,06
$G_1^{смo}$, руб/ч	343,489	302,951
$G_2^{смo}$, руб/ч	112,58	71,28

Список литературы

1. ППП «1С: ТОИР Управление ремонтами и обслуживанием оборудования» [Электронный ресурс] – Режим доступа: [<http://remontexpert.ru/about/257.htm>; 17.11.2014].

2. ППП «TRIM-PMS» [Электронный ресурс] – Режим доступа: [www.itm.spb.ru; 30.10.2014].

3. Журнал «Управляй предприятием», №8(68), 2016 г. [Электронный ресурс] – Режим доступа: [<http://www.upr.ru>; 29.10.2016].

4. Проектная документация. Интегрированная информационная система управления рудника Шерегеш. АРМ главного энергетика. Пакет прикладных программ «ППП-1»: «Учет, планирование ремонта, аварийность электроэнергетического оборудования» (руководство

СЕКЦИЯ 4. Подготовка и переподготовка инженерных и научных кадров.
Моделирование систем автоматизированного электропривода,
промышленной электроники и автоматического управления.

пользователя). – ЛАЭП 04.30.94.000. АВ. – Новокузнецк, 1994. – 47 с., ил.

5. Темников А.В. // Изв. Вуз. Черная металлургия. 2002. №8. С. 38-41.

6. Фуфаев В.В. Оптимизация структуры техноценозов – В кн.: Электрификация металлургических предприятий Сибири. Вып. 6. – Томск: изд. ТГУ, 1989. С 151-159.

7. Темников А.В. Эквивалентирование ремонтных потоков электромашин для анализа и синтеза показателей электроремонта предприятий – В кн.: Проблемы развития автоматизированного электропривода промышленных установок: материалы Всероссийской научно-практической конференции -Новокузнецк: СибГИУ, 2002. С. 187-190.

УДК 378.147

АВТОМАТИЗИРОВАННАЯ ОБУЧАЮЩАЯ СИСТЕМА ДЛЯ
МАГИСТРАНТОВ, ИЗУЧАЮЩИХ ДИСЦИПЛИНУ
«АВТОМАТИЗИРОВАННЫЙ ТЯГОВЫЙ ЭЛЕКТРОПРИВОД»

А.А.Штанг, М.В. Ярославцев, Ю.А. Прокушев, А.В. Мятеж
*Федеральное государственное бюджетное образовательное
учреждение высшего образования Новосибирский
государственный технический университет, г. Новосибирск*

Предложена электронная автоматизированная обучающая система для магистрантов, позволяющая повысить наглядность и доступность подачи материала. Планируется применение обучающей системы параллельно с традиционными формами обучения.

Ключевые слова: компьютерная образовательная система, дистанционное образование, инженерное образование, интерактивная образовательная среда.

В большинстве курсов магистерских программ российских технических ВУЗов передача студентам теоретических и базовых практических сведений осуществляется с использованием

СЕКЦИЯ 4. Подготовка и переподготовка инженерных и научных кадров.
Моделирование систем автоматизированного электропривода,
промышленной электроники и автоматического управления.

традиционных способов обучения: лекций, книг и демонстрационных материалов. Однако, по мере развития информационных технологий, все большую актуальность приобретает вопрос их эффективного применения в образовательном процессе. Наилучшим методом является дополнение традиционных форм взаимодействия с учащимися современными обучающими системами.

Так, в последние 15 лет для обучения работников ряда отраслей и при обучении студентов различным дисциплинам широко применяются компьютерные образовательные системы (computer-based training, СВТ), позволяющие представить информацию в более наглядном и структурированном виде, обеспечить интерактивное взаимодействие с обучающимся и индивидуальный темп освоения материала. В качестве примеров можно указать СВТ, созданные ведущими производителями авиатехники для подготовки пилотов, систему Seagull для экипажей морских судов, а также универсальные платформы для разработки обучающих курсов iSpring и eAuthor, применяемые как в специальном, так и в высшем образовании. Функционал таких систем должен предусматривать, помимо демонстрации различных обучающих материалов, вовлечение обучающегося путем интерактивного взаимодействия с системой, регулярный контроль его знаний, а также обратную связь для преподавателя.

Авторами реализуется проект электронной образовательной системы с разделением подачи теоретического материала на два блока: дистанционный, реализуемый в рамках проектируемой обучающей системы, и реализуемый традиционными средствами. Организация материала в обучающей системе подчиняется следующим основным принципам: деление материала на большое количество единиц минимального объема, простых и удобных для запоминания (отдельные определения, формулы, выводы представляются на отдельных слайдах); активное использование визуальных материалов - как иллюстраций, так и интерактивных элементов, требующих от обучающегося изменения параметров системы и наглядно отображающих их влияние на её состояние; постоянный контроль с помощью связанных с демонстрируемым материалом вопросов, что позволяет удерживать внимание на

СЕКЦИЯ 4. Подготовка и переподготовка инженерных и научных кадров.
Моделирование систем автоматизированного электропривода,
промышленной электроники и автоматического управления.

демонстрируемом материале и контролировать правильность его восприятия; обратная связь по итогам прохождения дистанционного блока; регулярная модернизация обучающих материалов с учетом как современных достижений науки и техники, так и изменения уровня студентов.

Поскольку возможности существующих платформ для разработки обучающих систем существенно ограничивают набор доступных средств интерактивного взаимодействия обучающегося с системой, возникает необходимость разработки специализированной платформы, позволяющей программировать поведение демонстрируемых объектов. Например, такая система позволит реализовать математическую модель тягового электропривода с возможностями интерактивного изменения её параметров и замедленной демонстрации переходных процессов.

Работа выполнена при поддержке Благотворительного фонда Владимира Потанина, договор ГПК-54/16.

ОГЛАВЛЕНИЕ

Введение	3
Секция 1 Теоретические аспекты и методология построения современного электропривода.....	5
Имитационная модель процесса рекуперативного торможения состава метрополитена с рекуператором энергии <i>В.Н. Аносов, В.М. Кавешников</i>	<i>6</i>
Модель волновых процессов в системах длинный вал и канат подъёмных установок глубоких шахт <i>М. Ю. Борщинский</i>	<i>8</i>
Нейросетевой предиктор для объекта с переменным запаздыванием <i>М.В. Бураков</i>	<i>15</i>
Обзор вентильного электропривода <i>А.С. Иванов, И.Ю. Каланчин</i>	<i>20</i>
Прямое управление моментом в асинхронном электроприводе ШГНУ <i>С.А.Кассем, Н.К Андреев, Р.Т. Ахметгаряев.....</i>	<i>26</i>
Рекуперирующий асинхронный электропривод с обратимым преобразователем синусоидального тока и управляемым коэффициентом мощности <i>П.Н. Кунинин А.И. Рыбаков</i>	<i>32</i>
Синтез асинхронного многодвигательного электропривода с выравниванием токов электродвигателей <i>П.Н. Кунинин, А.И. Рыбаков</i>	<i>39</i>
Проектирование и моделирование работы электропривода шахтной подъемной установки в средах разработки MATLAB и MEXBIOS <i>Ю. Д. Лопарев, Д. Е. Модзелевский</i>	<i>46</i>

Разработка динамической модели электромагнитного ударного узла с упругими связями <i>Л. А. Нейман, Н. И. Щуров</i>	53
Исследование механических характеристик электропривода переменного тока на основе машины двойного питания в асинхронном режиме <i>В. Ю. Островлянчик, И. Ю. Поползин</i>	55
Исследование механических характеристик машины двойного питания в синхронном режиме <i>В. Ю. Островлянчик, И. Ю. Поползин, Д. А. Маршев</i>	66
Математическая модель машины двойного питания в подвижной самоориентирующейся системе координат <i>В. Ю. Островлянчик, И. Ю. Поползин</i>	79
Разработка структуры регулятора тока возбуждения в электроприводе шахтной подъемной установки с реверсом возбуждения <i>Л. А. Федюшина, Д. Е. Модзелевский</i>	88
Увеличение производительности прокатного стана путем оптимизации синхронного привода ACS 6000 <i>В. А. Кузнецов, А. С. Чураков, Д.А. Маршев</i>	94
Высокоскоростной синхронный реактивный двигатель с гармоническим ротором <i>А.Ф. Шевченко, Л.Г. Шевченко</i>	100
Энергоэффективная силовая установка для автономных транспортных средств <i>Н.И. Щуров</i>	107

Секция 2 Информационные и управляющие системы технологическими процессами и системы автоматизации технологических процессов и производственных комплексов109

Автоматизация контроля давления масла двигателей внутреннего сгорания <i>С. А. Белова, И. В. Ломакин</i>	110
Моделирование гидроагрегата малой ГЭС с напорным трубопроводом в аварийных режимах работы, связанных с механическими поломками <i>Ш.Р. Гуламов</i>	115
Модуль интерфейса связи абсолютных датчиков углового положения <i>А. В. Дужая</i>	122
Системы проточного пробоотбора на базе автоматизированного электропривода и контроль параметров нефти проточным ЯМР-анализатором <i>Р.С. Кашаев, Н.Т. Киен</i>	126
Управление электроснабжением электроприводов нефтедобывающих, нагнетательных скважин и установок обезвоживания нефти по данным ЯМР <i>Р. С. Кашаев, Б. Э. Кубанго</i>	137
Контроль параметров сырой нефти по данным ЯМР-анализа и управление процессом отделения воды от нефти и её очисткой <i>Р.С.Кашаев, Ч.В.Тунг</i>	148
Модернизация ремонтной базы разреза «Красногорский» <i>В. А. Корнеев, И. А. Злыгостев, Е. В. Корнеева</i>	157
Синтез комбинированной оптимальной системы управления для асинхронных электроприводов экскаваторов <i>Н.С. Курочкин</i>	162

Оценивание подобия систем управления <i>Г. В. Макаров, К. А. Ивушкин, В. Ф. Евтушенко, Л. П. Мышляев</i>	169
Выявление параметров диагностирования тягового электропривода троллейбуса <i>Б. В. Малозёмов, Е. Г. Порсев</i>	176
О новом подходе к диагностированию транспортных средств <i>Б.В. Малозёмов</i>	178
Модель объекта с распределенными параметрами <i>Л. П. Мышляев, И. А. Леонтьев, М. В. Раскин, А. С. Саламатин</i>	180
Применение электромагнитного привода в глубоких скважинах для повышения эффективности вибросейсмического метода <i>Б. Ф. Симонов, В. Ю. Нейман, А. С. Шабанов</i>	182
Подходы к разработке электромеханического узла медицинского экзоскелета коленного сустава <i>М.Н. Николенко, Д.А. Котин</i>	187
Способы управления асинхронным электроприводом шахтных подъемных установок <i>В. Ю. Островлянчик, И. Ю. Поползин</i>	192
Обобщенный алгоритм управления электроприводом шахтной подъемной установки с машиной двойного питания <i>В. Ю. Островлянчик, И. Ю. Поползин</i>	201
Микроконтроллерное управление электроприводом в составе контрольно-проверочной аппаратуры <i>Н. М. Соколова, В. Ф. Шишлаков</i>	213

Автоматизация расчёта самозапуска двухскоростных асинхронных машин на основе применения языка программирования JavaScript <i>А. А. Шевченко, З. С. Темлякова, В. В. Гречкин</i>	219
Повышение энергоэффективности систем управления автономных электроэнергетических объектов <i>В. Ф. Шишлаков, А. В. Шишлаков, Н.В. Решетникова, Е.Ю. Ватаева</i>	221
Повышение мощности тягового электропривода маневровых локомотивов путем установки накопителей электрической энергии <i>А.А. Штанг, М.В. Ярославцев</i>	228
Расчет энергоемкости буферного накопителя гибридного тягового привода по экспериментальным записям цикла движения транспортного средства <i>М.В. Ярославцев, В.Н. Аносов</i>	230
Секция 3 Силовое оборудование, преобразовательная техника и микропроцессорные системы управления	233
Энергоэффективный двенадцатипульсный выпрямитель <i>М.Е. Вильбергер, Д.Д. Никифоров</i>	234
Видовое распределение кабелей городских подстанций <i>Ю.С. Горина, Е.С. Кузнецова</i>	236
Видовое распределение трансформаторов городских подстанций <i>А. В. Дроздова, Е.С. Кузнецова</i>	240
Рекуперация обратной эдс в электрических схемах широтно-импульсного регулирования <i>О.Н. Андрианов, И.А. Золин, К.А. Золин</i>	243

Модернизированный генератор мощных импульсов тока <i>В. А. Кузнецов, В. Е. Громов, А. С. Гагарин, Е. С. Кузнецова</i>	245
Внедрение статического тиристорного преобразователя в высоковольтных сетях с резко переменной нагрузкой <i>В. А. Кузнецов, М. С. Миронов, Н. А. Сигаев</i>	249
Энергосбережение с использованием условно-переменных и условно-постоянных расходов электроэнергии <i>В.А. Кузнецов, С.Ю. Романюк, Е.С. Кузнецова</i>	253
Анализ тарифов электроэнергии на территории Российской Федерации <i>Е.С. Кузнецова, В.А. Кузнецов, Н.В. Балицкая, Е.Н. Топильская</i>	259
Анализ потерь электроэнергии при передаче в электрических сетях <i>Е.С. Кузнецова, А.В.Воронцов</i>	265
Секция 4 Подготовка и переподготовка инженерных и научных кадров. Моделирование систем автоматизированного электропривода, промышленной электроники и автоматического управления	269
Моделирование электропривода мехатронной системы <i>В. П. Бабенко, В. К. Битюков, С. В. Марьин</i>	270
Исследование АСУ АД на базе ПЛК Telemecanique SR3 B261 BD и ПЧ Altivar 71 <i>А.Ф.Давлетшин, В.Ю.Корнилов</i>	277
Частотные преобразователи в автоматизированных учебно- исследовательских комплексах <i>О.Н. Андрианов, К.А. Золин, И.А. Золин</i>	280

Лабораторный стенд по исследованию электропривода лифта на основе программируемого контроллера Fastwel <i>В. А. Кубарев, И. А. Крючкина, Л. А. Федюшина, О. Р. Галлямова</i>	283
Стенд для моделирования функционирования контактных дискретных устройств автоматики <i>И. В. Ломакин, И. С. Саттаров</i>	288
Разработка и исследование макета станции полива на экспериментальном стенде «Danfoss» <i>Р.Т. Сайфиева, Д.А. Гаврилин, Т.Х. Мухаметгалеев</i>	294
Предложение по дополнению пакетов прикладных программ «1С: ТОиР» и «TRIM-PMS» для управления ремонтами и обслуживанием электроэнергетического оборудования предприятий <i>А.В. Темников</i>	300
Автоматизированная обучающая система для магистрантов, изучающих дисциплину «Автоматизированный тяговый электропривод» <i>А.А.Штанг, М.В. Ярославцев, Ю.А. Прокушев, А.В. Мятеж</i>	307
Оглавление	310

АВТОМАТИЗИРОВАННЫЙ ЭЛЕКТРОПРИВОД И ПРОМЫШЛЕННАЯ ЭЛЕКТРОНИКА

***ТРУДЫ СЕДЬМОЙ ВСЕРОССИЙСКОЙ
НАУЧНО-ПРАКТИЧЕСКОЙ КОНФЕРЕНЦИИ***

23-24 НОЯБРЯ 2016 г.

Под. общ. ред.: д.т.н., проф. Островляничка В.Ю.

Техническая редакция: Кубарев В.А., Поползин И. Ю.

Компьютерная верстка:
Поползин И. Ю.

Подписано в печать 13.12.2016

Формат 60x84 1/16

Бумага писчая Печать цифровая

Тираж 50 экз.

Усл. печ. л. 18,42 Уч.-изд. л. 19,67

Заказ №

Сибирский государственный индустриальный университет
654007, г. Новокузнецк, ул. Кирова, 42
Издательский центр СибГИУ