



Шабуров Павел Олегович

**ИНТЕЛЛЕКТУАЛЬНЫЙ ЭЛЕКТРОПРИВОД
НА ОСНОВЕ ВЕНТИЛЬНОГО ДВИГАТЕЛЯ
ДЛЯ ЗАПОРНОЙ АРМАТУРЫ**

Специальность 05.09.03 — «Электротехнические комплексы и системы»

АВТОРЕФЕРАТ

диссертации на соискание ученой степени
кандидата технических наук



Работа выполнена на кафедре электромеханики и электромеханических систем Южно-Уральского государственного университета.

Научный руководитель – доктор технических наук, профессор
Воронин Сергей Григорьевич.

Официальные оппоненты: доктор технических наук, профессор
Цытович Леонид Игнатьевич;

кандидат технических наук, доцент
Федяев Василий Леонидович.

Ведущее предприятие – ФГУП «ПО «МАЯК», г. Озерск.

Защита состоится 25 февраля 2010 г., в 10 часов, в ауд. 1001 на заседании диссертационного совета Д212.298.05 при Южно-Уральском государственном университете (ЮУрГУ) по адресу: 454080, г. Челябинск, пр. им. В.И. Ленина, 76.

С диссертацией можно ознакомиться в библиотеке ЮУрГУ, с авторефератом – на официальном сайте ЮУрГУ www.susu.ac.ru.

Автореферат разослан «__» января 2010 г.

Отзывы на автореферат в двух экземплярах, заверенных печатью учреждения, просим направлять по адресу: 454080, г. Челябинск, пр. им. В.И. Ленина, 76, гл. корпус, Ученый совет ЮУрГУ, тел./факс: (351) 267-91-72,

Ученый секретарь
диссертационного совета
доктор технических наук, профессор

Ю.С. Усынин

0625140

ОБЩАЯ ХАРАКТЕРИСТИКА РАБОТЫ

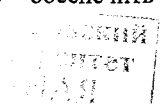
Актуальность работы обусловлена необходимостью создания высоконадежных исполнительных устройств для систем автоматического управления, органически вписывающихся в общий автоматизированный комплекс, обладающих возможностью самодиагностики и способных реализовать свои функции без вмешательства человека.

Необходимость в таких устройствах возникает в аэрокосмической технике, ядерной и нефтегазовой промышленности. В частности, в технологических процессах нефтегазовой, химической и ядерной промышленности широкое применение находят различные виды запорной арматуры, управляющей потоками жидкости или газа, и автоматизация технологического процесса осуществляется через автоматизацию управления этой арматурой. Отсюда возникает необходимость создания надежного автоматизированного электропривода для управления запорной арматурой (ЭЗА), обладающего всеми перечисленными выше функциями.

Как отечественные, так и зарубежные конструкции ЭЗА не удовлетворяют требованиям современного производства, особенно тогда, когда отказ ЭЗА как исполнительного элемента системы управления (СУ) может привести к остановке производства или другим опасным последствиям. В частности, не всегда обеспечивается контроль и регулирование усилий на закрывание и открывание задвижки, практически нигде не введены или слабо выражены функции самодиагностики и не предусмотрено обеспечение работоспособности при внезапных единичных отказах.

Для устранения существующих недостатков необходимо создавать СУ ЭЗА другого поколения, управляемые непосредственно от цифрового устройства верхнего уровня, обменивающиеся с ними в непрерывном режиме цифровыми данными, реализующие сложные законы управления закрытием и открытием, с контролем основных выходных и промежуточных координат и параметров, реализующие на этой основе функции самодиагностики и включение в случае необходимости резервных регуляторов или переход на вспомогательные алгоритмы (циклограммы работы). Другими словами, речь идет о создании нового поколения систем управления, которые принято называть интеллектуальными.

В настоящее время в ЭЗА находят применение не только асинхронные двигатели (АД), но и вентильные двигатели (ВД) с возбуждением от постоянных магнитов. Теория электропривода (ЭП) с ВД в настоящее время разработана достаточно полно для штатных режимов работы привода при отсутствии отказов. Имеется ряд работ, посвященных поведению привода при отказах отдельных элементов (Лозенко В.К., Воронин С.Г., Сандалов В.М., Вигриянов П.Г.). Однако, практически нигде не отражены вопросы исследования методов ликвидации последствий отказов, например, путем изменения алгоритмов работы привода или введение избыточности в отдельные каналы управления. Между тем, такими мерами можно обеспечить



работоспособность привода при единичных отказах элементов без ухудшения его выходных характеристик.

Поэтому задача ликвидации последствий отказов очень актуальна для высоконадежных и ответственных производств и имеет большое научное и практическое значение.

Работа выполнена при государственной поддержке в рамках гособоронзаказа для ФГУП «ПО «Маяк» (х/т 2008245, х/т 2009095), при поддержке правительства Челябинской области (шифр гранта 004.07.06-08.БХ) и при поддержке Фонда содействия развитию малых форм предприятий в научно-технической сфере в рамках программы «УМНИК» (номер госконтракта 6654 р/8842).

Цель работы – разработка принципов построения и теории высоконадежных интеллектуальных ЭПЗА, обладающих функциями самодиагностики и сохраняющих работоспособность при единичных отказах.

Методы исследований. В работе использовались методы теории надежности, теории графов, теории матриц, теории электромеханического преобразования энергии, цифрового моделирования на ЭВМ.

Научные положения и результаты, выносимые на защиту

– математические модели для расчета надежности ЭПЗА на основе теории графов;

– методика оценки надежности системы с резервированием;

– принцип и алгоритмы самодиагностики датчика положения ротора (ДПР) при выходе из строя одного канала;

– алгоритмы управления, обеспечивающие сохранение работоспособности привода при единичных отказах электронной аппаратуры и электромеханического преобразователя.

Обоснованность и достоверность научных положений, выводов и рекомендаций подтверждается корректным использованием методов описания статических и динамических процессов в математических и компьютерных моделях при общепринятых допущениях, результатами внедрения и эксплуатации ЭПЗА, экспериментальными исследованиями и машинными (ЭВМ) экспериментами.

Значение работы. Научное значение работы заключается в том, что:

1. Получена методика определения неисправности при выходе из строя одного канала любого трехканального ДПР без резервирования и с учетом резервирования, при использовании двух ДПР.

2. Предложены общие соотношения для формирования фазных токов при отказе одной из фаз, обеспечивающие постоянство электромагнитного момента.

3. Предложен метод расчёта надёжности системы в условиях распространения внешних импульсных возмущений по системе, учитывающей структурные особенности системы и характер связей между её элементами.

Практическое значение работы

1. Реализованы алгоритмы управления ЭПЗА, повышающие надежность оборудования при единичных отказах в резервируемых частях ЭП и сохраняющие высокое качество процессов управления.

2. Создана система управления ЭПЗА, обеспечивающая работоспособность при отказе силового или информационного элемента.

3. Разработан комплекс программного обеспечения, включающий математические модели, программы расчета параметров моделей и алгоритмов управления, позволяющий в значительной степени формализовать процесс проектирования.

4. Созданы опытные образцы интеллектуального ЭПЗА нового поколения, обеспечивающие наряду с заданными регулировочными свойствами сохранение работоспособности при единичных отказах.

Реализация результатов работы:

На основе предложенных схем, алгоритмов и программного обеспечения создан электропривод запорной арматуры ИП-1, который проходит сейчас стадию испытаний в ФГУП «ПО «Маяк», г. Озерск.

Результаты работы внедрены в неполноповоротном электроприводе шаровых кранов, выпускаемом ОАО «Кыштымский радиозавод», г. Кыштым.

ЭПЗА используется в электроприводе двери лифта, разрабатываемого НПО «Автоматика», г. Екатеринбург.

Материалы диссертационной работы применяются в лекционных курсах «Электропривод летательных аппаратов», «Микропроцессорные средства и системы» и «Микропроцессорная техника» для студентов специальностей 140601 «Электромеханика» и 140609 «Электрооборудование летательных аппаратов».

Апробация работы. Основные положения работы рассматривались и обсуждались:

– на XXV Всероссийской школе по проблемам науки и технологий, посвящённой 60-ю великой Победы, г. Миасс 2005;

– на IV-й научно-технической конференции «Молодежь в науке» РФЯЦ-ВНИИЭФ, г. Саров 2005;

– на Всероссийской выставке научно-техническое творчество молодёжи «Путь к обществу, основанному на знаниях» ВВЦ, г. Москва 2006;

– на II-й Всероссийской научно-технической конференции «Проблемы электротехники, электроэнергетики и электротехнологии», г. Тольятти ТГУ, 2007;

– на XXVII Всероссийской школе по проблемам науки и технологий, посвящённой 150-летию К.Э. Циолковского, 100-летию С.П. Королева и 60-летию Государственного ракетного центра «КБ им. Академика В.П. Макеева», г. Миасс 2007;

– на III международной научно-технической конференции «Электромеханические и электромагнитные преобразователи энергии и управляемые электромеханические системы», г. Екатеринбург 2007;

– на научно-технических конференциях ЮУрГУ в 2006–2009 гг.

Публикации. По теме диссертации опубликовано 7 работ, в том числе в журналах, рекомендованных ВАК, 1 статья. Получен 1 патент РФ на полезную модель. На алгоритмы, используемые в системе управления, получено свидетельство о регистрации программы.

Структура и объем работы. Диссертация состоит из введения, шести глав, заключения и содержит 158 страниц машинописного текста, 58 рисунков, 13 таблиц, список используемой литературы из 123 наименований и 6 приложений.

ОСНОВНОЕ СОДЕРЖАНИЕ РАБОТЫ

Во введении обоснована актуальность темы диссертационной работы, сформулирована цель, научная новизна результатов исследования, представлены сведения о её апробации и основных публикациях по теме, приведены положения, выносимые на защиту.

Первая глава посвящена анализу состояния вопроса и основным задачам, которые возникают в современном производстве при управлении ЭПЗА. Проведено сравнение ЭПЗА по нескольким критериям, из которого заключаем что основой для проектирования и синтеза всей системы является применяемый электромеханический преобразователь (ЭМП).

Основные типы ЭМП: асинхронный двигатель, двигатель постоянного тока, синхронная машина и вентильный двигатель (ВД). Наиболее перспективным является применение ВД в ЭПЗА, в связи с целым рядом преимуществ этой электрической машины по сравнению другими.

Произведено сравнение ЭПЗА различных фирм изготовителей по требованиям, предъявляемым к системе управления:

1. Поворот на заданный угол в заданном направлении с заданной скоростью или ускорением. Поворот до положения «закрыто» или «открыто».
2. Удержание выходного вала в заданном угловом положении.
3. Гарантированное открытие или закрытие механизма (с необходимым моментом).
4. Диагностика основных параметров привода и событий во время работы, уменьшающая вероятность возникновения нештатных ситуаций в процессе производства.
5. Обмен информацией с цифровыми управляющими устройствами или с системой верхнего уровня. Осуществление управления и контроля от них же или с некоторого пульта управления.
6. Наличие активных обратных связей для решения задач регулирования давления, температуры, уровня и других параметров (при наличии соответствующих периферийных датчиков) по заданному алгоритму.
7. Возможность сохранения работоспособности ЭПЗА при единичных отказах.

Выяснено, что во многих приводах отсутствуют или слабо выражены функции самодиагностики, а вопросами сохранения работоспособности ЭПЗА

при возникновении единичных отказов занимаются единицы крупных концернов по производству ЭПЗА.

Вторая глава посвящена созданию на основе уравнений в форме Коши, описывающих электромеханическое преобразование энергии в вентильном приводе, математической модели, учитывающей возможные внезапные отказы основных элементов.

За основу взяты разработанные ранее модели ВД в работах Овчинникова И.Е., Бута Д.А., Балагурова В.А., Воронина С.Г. и дополненные возможностью моделирования аварийных режимов, возникающих при работе привода.

При этом в качестве исходной принята схема подключения секций обмотки статора к полупроводниковому коммутатору, показанная на рис. 1. Коммутация секций обмотки статора осуществляется с помощью замыкания и размыкания силовых ключей К1-К6, которые условно показаны на рис. 1 в виде разомкнутых контактов.

На межкоммутационном интервале (МКИ) могут быть открыты два или три ключа. К источнику постоянного тока оказываются подключенными две или три секции обмотки якоря.

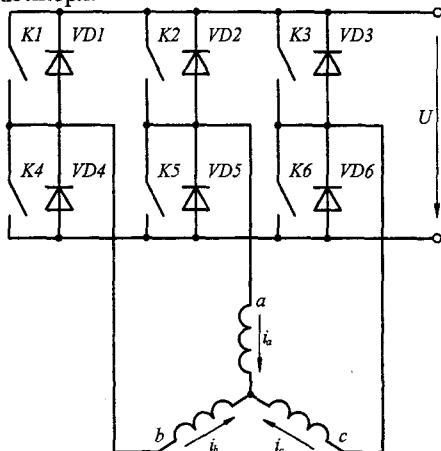


Рис. 1. Схема ВД с полупроводниковым коммутатором

Уравнения токов всех трех фаз ВД приведены в относительных единицах и учитывают возможные неисправности в электромеханическом преобразователе

$$\begin{cases} \frac{di_{a^*}}{dt} = \frac{[(K_2 k_b - K_5 k_b + K_4 k_c - K_1 k_c)u - (k_a k_c + k_b k_c + k_a k_b)i_{a^*} - k_a(k_b + k_c)e_{a^*} + k_c k_b e_{b^*} + k_b k_c e_{c^*}]}{T_s(k_a k_b + k_b k_c + k_c k_a)}, \\ \frac{di_{b^*}}{dt} = \frac{[(K_1 k_c - K_4 k_c + K_6 k_a - K_3 k_a)u - (k_a k_c + k_b k_c + k_a k_b)i_{b^*} + k_c k_a e_{a^*} - k_b(k_a + k_c)e_{b^*} + k_a k_c e_{c^*}]}{T_s(k_a k_b + k_b k_c + k_c k_a)}, \\ \frac{di_{c^*}}{dt} = \frac{[(K_3 k_a - K_6 k_a + K_5 k_b - K_2 k_b)u - (k_a k_c + k_b k_c + k_a k_b)i_{c^*} + k_b k_a e_{a^*} + k_a k_b e_{b^*} - k_c(k_a + k_b)e_{c^*}]}{T_s(k_a k_b + k_b k_c + k_c k_a)}, \end{cases} \quad (1)$$

где $K_1, K_2, K_3, K_4, K_5, K_6$ – коммутационные коэффициенты учитывающие замыкание (=1) и размыкание (=0) ключей; $i_{c_a}, i_{b_a}, i_{c_a}$ – токи фаз двигателя; $e_{a^*}, e_{b^*}, e_{c^*}$ – ЭДС фазы; k_a, k_b, k_c – коэффициенты учитывающие количество вышедших из строя витков фазы и принимает значения от 0 до 1; u, T_s – напряжение питания и электромагнитная постоянная времени.

Для численного моделирования на ЭВМ модель дополняется уравнениями механики привода.

После создания математической модели трехфазного ВД, оценивается влияние внезапного отказа элемента на рабочие свойства ЭПЗА. При этом рассматриваются следующие неисправности:

- Межвитковое или полное замыкание фазы.
- Обрыв фазы
- Выход из строя ДПР
- Обрыв ключа
- Замыкание ключа

Моделирование показало, что при некоторых неисправностях продолжать работу нельзя, а при некоторых можно, но привод выполнять все функции не сможет.

Третья глава посвящена расчету надежности ЭПЗА и исследование его на структурную стойкость для определения наиболее слабых мест.

Из анализа электрической схемы платы управления ЭПЗА можно составить такую модель надежности для нерезервируемого привода (рис. 2).

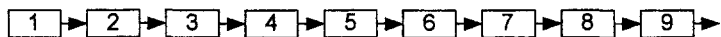


Рис. 2. Блок-схема модели надежности нерезервируемого ЭПЗА

Блок-схема модели надежности ЭПЗА (рис. 2) представлена как последовательное соединение основных узлов: 1 – трехфазный диодный мост; 2 – стабилизаторы постоянного напряжения и DC/DC преобразователи; 3 – преобразование значения тока ВД в аналоговый сигнал; 4 – передача данных; 5 – микроконтроллер; 6 – силовая часть; 7 – датчик тока; 8 – обмотка ВД; 9 – датчики положения ротора.

Анализ принципиальной и структурной схемы прибора показывает, что прибор является не резервируемой аппаратурой, при этом подразумевается, что все элементы в схеме включены последовательно. Вероятность безотказной работы такой системы в течение заданного времени определяется по формуле:

$$P(t) = \prod_{i=1}^n p_i(t), \quad (2)$$

где $p_i(t)$ – вероятность безотказной работы i -го узла.

Вероятность безотказной работы (ВБР) i -го узла $p_i(t) = e^{-\lambda_i t}$, где λ_i – интенсивность отказов узла.

Вероятность безотказной работы всего привода за $t = 10^5$ часов будет $P = 0,79495$.

Но для высоконадежных приводов значения ВБР должны находиться в пределах от 0,96 до 0,98.

Поэтому проведено дальнейшее исследование для выявления наиболее слабонадежных элементов с точки зрения динамики распространения отказа.

Исследуемый интеллектуальный электропривод может быть представлен следующим оргграфом (рис. 3). Здесь приняты следующие обозначения: 1 – система верхнего уровня; 2 – интерфейс RS-485; 3 – гальваническая развязка; 4 – источники питания; 5 – микроконтроллер; 6 – датчик положения ротора; 7 – усилитель тока; 8 – драйвер; 9 – сигнал ошибки драйвера; 10 – датчик температуры обмотки; 11 – полупроводниковые ключи; 12 – сигнал ошибки ключей; 13 – датчик тока; 14 – обмотка; 15 – ротор; 16 – нагрузка; 17 – гальваническая развязка; 18 – интерфейс RS-485; 19 – система верхнего уровня.

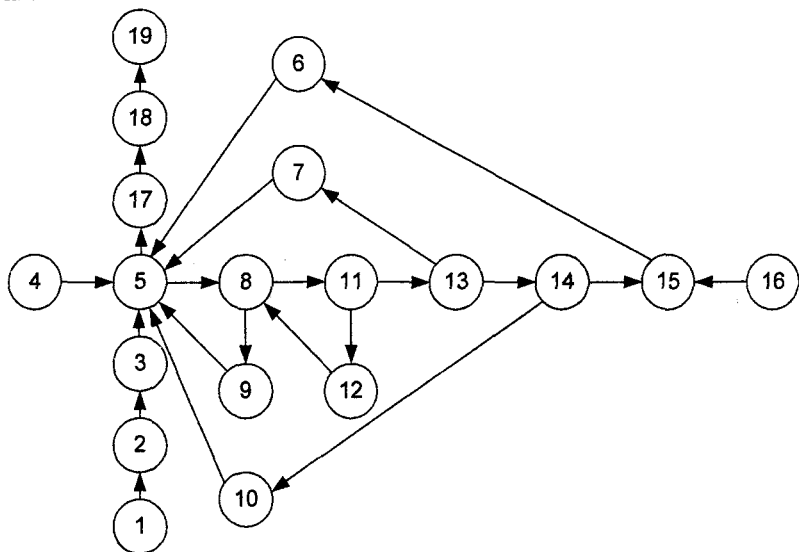


Рис. 3. Граф исследуемой системы

Процедура распространения импульсного воздействия записана в скалярном виде

$$imp_i(t+1) = \sum_{j=1}^n A_{j,i} \cdot \varepsilon_{j,i} \cdot imp_j(t), \quad i = \overline{1, n}; \quad (3)$$

$$w_i(t+1) = w_i(t) \cdot [imp_i(t) + 1], \quad i = \overline{1, n}. \quad (4)$$

Технология моделирования процесса изменения надёжности системы под влиянием внешнего импульсного воздействия сводится к следующему:

а) задаются начальные значения весов вершин v_i орграфа $G=(V,E)$ (начальные значения показателей надёжности элементов системы)

$$w(0) = (w_1(0), w_2(0), \dots, w_n(0));$$

б) задаётся автономное импульсное воздействие

$$imp(0) = (imp_1(0), imp_2(0), \dots, imp_n(0)) ;$$

в) производится расчёт импульсного воздействия на систему и изменения весов вершин графа в следующий дискретный момент времени $t=1$;

г) далее процесс повторяется с в) для моментов времени $t=2, t=3$ и т.д.

В результате моделирования и после проведенного анализа структуры графа показано, что наименее надежными узлами являются силовые элементы привода: драйвер 8, ключи 11, обмотка двигателя 14, и также датчики положения ротора 6.

Поэтому необходимо для этих узлов применить резервирование так, чтобы конструкция привода поменялась минимально.

В информационную цепь ВД ставится дополнительно один трехканальный ДПР. Но тогда возникает проблема какое из двух значений ДПР принимать за действительное. Для этой цели автором был разработан специальный алгоритм.

Для резервирования силовой части наиболее приемлемый способ при минимальном изменении конструкции двигателя и с целью экономии силовых элементов, является использование трехфазного вентильного двигателя с независимым питанием каждой обмотки.

Это дает, во-первых большие возможности по управлению и во-вторых повышает надежность всего изделия, так как при внезапном отказе любого силового элемента полностью удаляется из работы отказавшая фаза и продолжается работа на двух оставшихся.

На рис. 4 показана блок-схема модели надежности ЭПЗА с резервированием, с теми же обозначениями, что и на рис. 2.

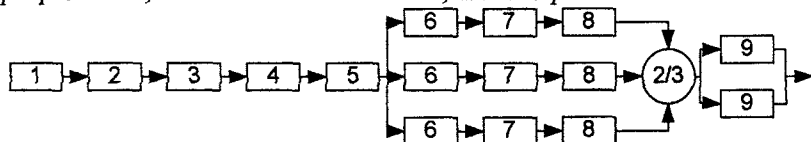


Рис. 4. Блок-схема модели надежности резервируемого ЭПЗА

И итоговая расчетная ВБР резервируемого ЭПЗА за время $t=10^5$ часов будет:

$$P_{рез}(t) = 0,97625.$$

Четвертая глава посвящена вопросу диагностирования состояния ДПР при внезапном единичном отказе одного канала и также особенностям работы алгоритма коммутации при двух трехканальных ДПР.

Первоначально рассмотрен случай, когда в ВД используется один ДПР, состоящий из трех дискретных датчиков Холла.

По изменению сигналов трех каналов ДПР можно составить матрицу состояния датчика

$$|X(j)| = \begin{vmatrix} 1 & 1 & 1 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 1 & 1 & 1 & 0 \\ 1 & 0 & 0 & 0 & 1 & 1 \end{vmatrix} \quad (5)$$

Где номер строки соответствует номеру канала, а номер столбца $j=1...6$ показывает текущий МКИ.

Затем состояние трехканального ДПР было описано вектором-строкой. Для этого введено понятие бинарного значения каждого столбца матрицы, которое определяется выражением

$$X(j) = (2^0 \ 2^1 \ 2^2) \cdot X(j) \quad (6)$$

В результате матрицу состояния датчика можно представить в виде вектора-строки

$$X(j) = (1 \ 2 \ 4) \begin{vmatrix} 1 & 1 & 1 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 1 & 1 & 1 & 0 \\ 1 & 0 & 0 & 0 & 1 & 1 \end{vmatrix} = (5 \ 1 \ 3 \ 2 \ 6 \ 4) \quad (7)$$

Представление вектора состояния одним числом дает весьма ощутимый эффект:

1. Управление ключами ПК может осуществляться не путем логической обработки сигналов, а непосредственно по значению числа.
2. Очень просто определяется направление вращения двигателя
3. Наконец, самое важное, существенно упрощается диагностика состояния ДПР. Определение сводится к проверке численных значений вектора.

Сформулированы необходимые признаки, по анализу которых можно определить работоспособный датчик или нет:

- 1 – Главным доказательством, что один канал датчика неисправен, является наличие на одном из шести МКИ *запрещенного* состояния – 7 или 0;
- 2 – Если при принятом нами направлении вращения предполагаемое состояние ДПР $X(j)_+$ не будет совпадать с новым истинным состоянием ДПР $X(j+1)$, то можно будет заключить о неисправности канала датчика, если совпадает, то можно утверждать, что датчик исправен.

Задачи, которые необходимо решить при выходе из строя одного канала датчика:

1. Необходимо определить, что произошел выход из строя одного канала датчика.
2. Определить номер этого канала.

Получена формула, по которой легко можно определить МКИ с неисправным каналом

$$X_{SN}(j) = \Delta X(j) \cdot S = \begin{cases} 0, & \Rightarrow \text{канал работает в нормальном режиме} \\ 1, & \Rightarrow 1 \text{ канал вышел из строя} \\ 2, & \Rightarrow 2 \text{ канал вышел из строя} \\ 4, & \Rightarrow 3 \text{ канал вышел из строя} \end{cases} \quad (8)$$

где $\Delta X(j) = |X(j)^{норм} - X(j)|$ разность состояний исправного и неисправного датчика; $S = \text{diag}(s(j))$, $s(j)$ учитывает правильность смены

значений датчика для каждого МКИ. Для его определения необходимо произвести логическое сравнение текущего состояния ДПР с предполагаемым состоянием ДПР

$$s(j) = \begin{cases} 1, & X(j)^{неисп} \neq X(j)_{\pm} \\ 0, & X(j)^{неисп} = X(j)_{\pm} \end{cases} \quad (9)$$

Состояния ДПР отличные от нуля означают, что датчик вышел из строя и сразу определяется номер канала.

Электропривод с неисправным каналом ДПР осуществлять все свои функции не в состоянии, поэтому резервируем его путем установки второго ДПР. Тут есть два варианта: дублирование или установка со сдвигом в 30 градусов, для получения 12-титактной коммутации.

Показано, что при дублировании на одном из МКИ у правильно работающего ДПР выявляется неисправность. Обнаружение такой неисправности системой управления приводит к ложному формированию управления коммутацией. В дальнейшем данное ложное срабатывание устранится.

Для уменьшения пульсаций электромагнитного момента двигателя можно воспользоваться 12-титактной коммутацией. Для этого второй трехканальный ДПР сдвигается относительно первого ДПР в пространстве на угол 30 градусов.

В работе показано, что в этом случае при выходе из строя любого канала датчика за счет использования двух 3-хканальных датчиков будет осуществляться нормальная шеститактная коммутация по работоспособному датчику.

Неработоспособным будет принят тот комплект, у которого на одном из 12 МКИ появляется *запрещенная комбинация* 7 или 0.

В пятой главе рассматривается возможность сохранения работоспособности ЭПЗА при внезапном единичном отказе в силовом канале.

Эти отказы можно свести к стандартным: для ЭМП – обрыв фазной обмотки; для ПК – обрыв или короткое замыкание (пробой) одного из силовых ключей. Эти отказы можно объединить одним выражением: отказ силовой цепи ЭПЗА. Для того чтобы сохранить работоспособность необходимо изменить схему двигателя так, чтобы отказ в одной силовой цепи не влиял на работу других силовых цепей.

Это можно добиться, только используя конструкцию ВД с гальванически развязанным питанием всех фаз (рис. 5.) и минимальное изменение конструкции возможно только при сохранении ВД трехфазным.

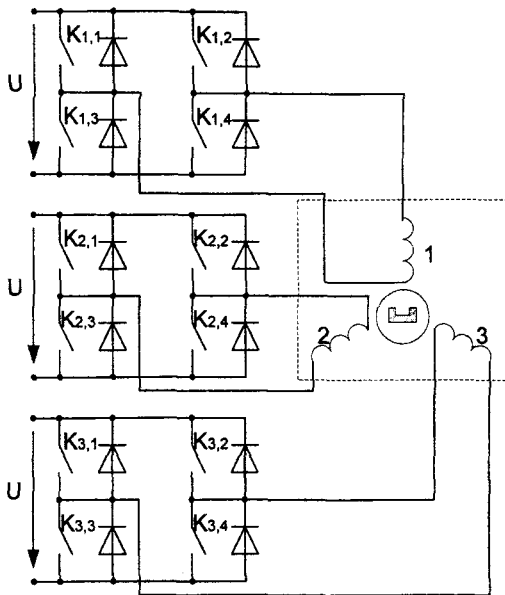


Рис. 5. Трехфазный ВД с отдельным питанием каждой фазы

Был получен закон изменения относительного тока в оставшихся двух фазах при обрыве одной из трех фаз из условия постоянства электромагнитного момента привода. В качестве базового значения взято амплитудные значения тока фазы исправного двигателя.

$$i_1(\varphi) = \frac{3 \sin(\varphi)}{2 \left[\sin^2(\varphi) + \sin^2\left(\varphi + \frac{2\pi}{3}\right) \right]},$$

$$i_2(\varphi) = \frac{3 \sin\left(\varphi + \frac{2\pi}{3}\right)}{2 \left[\sin^2(\varphi) + \sin^2\left(\varphi + \frac{2\pi}{3}\right) \right]},$$
(10)

где φ – текущее значение угла поворота ротора в электрических координатах.

Также с помощью метода неопределенных множителей Лагранжа доказана оптимальность полученного решения, критерием которой является минимум электрических потерь для двух фаз обмоток.

Для формирования тока в фазе по полученным выражениям необходимо иметь внешний датчик угла с высокой разрешающей способностью.

В нашем случае с дискретным ДПР необходимо производить усреднение значений формируемого тока для угловых интервалах равных одному разряду датчика угла.

Получены уравнения для расчета относительных значений токов для каждого МКИ.

$$I_1^{cp12}(j) = \int_{(j-1)\frac{\pi}{6}}^{\frac{\pi}{6}} i_1(\varphi) d\varphi, \quad I_2^{cp12}(j) = \int_{(j-1)\frac{\pi}{6}}^{\frac{\pi}{6}} i_2(\varphi) d\varphi, \quad (11)$$

где $I_1^{cp12}(j)$, $I_2^{cp12}(j)$ – постоянная усредненная величина тока для j -го МКИ; $j = 1, 2, \dots, 12$ – номер МКИ.

На описанный способ резервирования ВД подана заявка на изобретение.

В шестой главе рассматривается конструкция ЭПЗА, приводятся принципиальные электрические схемы, описаны алгоритмы управления приводом.

Конструктивно привод выполнен в виде единого блока, включающего плату управления и ВД, и имеет два стандартных выхода вала на противоположные стороны, являющихся продолжением вала двигателя. Один выход предназначен для связи с заслонкой, второй для присоединения рукоятки ручного вращения. С внешней аппаратурой привод соединяется электрическим разъемом, в котором объединены силовой и информационный каналы.

Вентильный двигатель представляет собой многополюсный трехфазный синхронный двигатель обращенной конструкции с зубчатым статором и возбуждением от постоянных магнитов на роторе. Число зубцов статора и полюсов ротора отличается на один. Наружный ротор двигателя выполнен в виде стакана, на внутренней поверхности которого закреплены редкоземельные магниты. Внутри ротора расположен статор с трехфазной обмоткой. Использование магнитов с высокой удельной энергией и специальной конструкции статора позволяет получить заданный момент привода при относительно небольших габаритах и потребляемой мощности.

Описана принципиальная электрическая схемы платы управления, в которой выбран микроконтроллер ATMega16 фирмы *Atmel*, позволяющей изменять как алгоритмы работы СУ, так и весь комплекс настроек и параметров, обеспечивая, таким образом, настройку ЭПЗА под конкретный технологический процесс.

Микроконтроллер ATMega16 обрабатывает информацию с датчиков и проводит самодиагностику по ряду параметров:

1. Регистрация и обработка значения силового напряжения питания.
2. Регистрация и обработка значения информационного напряжения питания.
3. Регистрация и обработка сигнала поступающего с датчика температуры, установленного в статорной обмотке ВД.
4. Контроль нормального функционирования драйвера управления ключами инвертора.
5. Получения сигналов с 3-канального ДПР, проверка исправного состояния каналов ДПР.

6. Информация о токах двигателя позволяет судить о многих видах неисправностей и возможных дефектов, возникающих в работе ЭПЗА.

6.1. По величине каждого тока фазы ВД можно судить о исправности или о неисправности схемы преобразования тока.

6.2. Если резко меняются величины токов в фазах двигателя, то производится отключение инвертора от сети.

6.3. Если во время перемещения вала происходит его заклинивание, то действия СУ аналогичны пункту 6.2.

6.4. Регистрация срыва задвижки.

6.5. Можно судить об изменении параметров механической части запорной арматуры.

6.6. Можно судить о вялотекущем изменении параметров либо электронной части, либо ВД.

6.7. Фиксирование неисправности типа обрыв фазы, ключа, контакта.

Система управления ЭПЗА реализует два основных режима работы:

1) Режим определения начальных координат или ориентация задвижки в пространстве между двумя положениями закрыто и открыто.

Необходимо установить ЭПЗА на задвижку, подать команду на вращение выходного вала в сторону закрытия. Как только двигатель доходит до полностью закрытого положения, которое определяется по увеличенному моменту сопротивления движению, то происходит дожатие за заданное время с заданным моментом и потом двигатель продолжает движение в сторону открытия рис. 6.

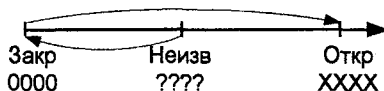


Рис. 6. Определение начальных координат

Как только ВД доходит до полностью открытого положения, которое также фиксируется по увеличенному моменту сопротивления движению, то через заданное время отключается ВД от питания. Такое состояние считается полностью открытым, и текущее положение запорной арматуры совпадает с конечным положением, а нулевое положение идентично полностью закрытому состоянию задвижки.

При помощи ДПР подсчитываются импульсы или количество шагов (изменений) ДПР из положения закрыто в положение открыто и величина пути сохраняется в памяти СУ. В дальнейшем это дает возможность посредством привода перемещать шток запорной арматуры в указанных пределах. Указанный принцип определения начальных координат привода запатентован.

2) Управление положением привода.

В этом режиме на СУ возложены следующие функции:

- перевод выходного вала в любое заданное оператором положение;
- гарантированное закрытие задвижки (с дожатием) или просто перевод в полностью закрытое состояние;

- полное открытие без дожатия, так как возможно заклинивание, путем недохода до полностью открытого положения нескольких импульсов с ДПР;
- удержание выходного вала в заданном угловом положении.

Структурная схема ЭПЗА на основе ВД была составлена в соответствии с теорией этих двигателей и с учетом их особенностей, как динамической системы, а также с учетом процесса, обусловленного фиксированной информацией с ДПР.

Учтены такие особенности вентильной электрической машины как:

1. Момент двигателя может быть описан зависимостью $M = k\Phi \cdot i \cdot F_1(\varphi)$, где $k\Phi$ – коэффициент характеризующий магнитный поток ротора; $F_1(\varphi)$ – некоторая периодическая функция, учитывающая дискретный характер переключения секций, который приводит к пульсациям электромагнитного момента в зависимости от положения ротора внутри МКИ.

2. Наличие переменного реактивного момента, который возникает в связи с тем, что на ферромагнитное тело, находящееся в магнитном поле действуют электромагнитные силы, стремящиеся повернуть тело в положение, соответствующее наименьшему магнитному сопротивлению магнитной цепи.

3. Наличие ДПР с двумя типами квантования: квантование по уровню и квантование по времени.

Квантование по уровню связано с дискретным характером получения импульсов с ДПР;

Квантование по времени проявляется из-за дискретного характера информации об угле поворота выходного вала и заключается в том, что импульсы с ДПР приходят не синхронно, а с каким-то переменным периодом, зависящим от частоты вращения двигателя.

Вопросы синтеза регулятора решались на математической модели. Взятые пропорциональные регуляторы тока и положения. Вопросы синтеза сводились к нахождению на модели и уточнению экспериментальным путем коэффициентов регуляторов, с помощью которых достигаются необходимые динамические свойства системы.

Экспериментальные исследования проводились путем снятия статических и динамических характеристик ВД и ЭПЗА. Это зависимости электромагнитного и реактивного момента от угла поворота ротора в электрических градусах и зависимость пускового момента ЭПЗА от скважности сигналов управления ключами инвертора. Также снималась характеристика переходного процесса при отработке угла задания.

Определялись опытным путем возможности сохранения работоспособности ЭПЗА при единичных отказах: неисправность канала ДПР и выход из строя (обрыв) фазы.

Результаты экспериментальных исследований и результаты эксплуатации опытных образцов привода на предприятии ФГУП «ПО «МАЯК» г. Озерск, подтвердили правильность выбранных технических решений и мероприятий, обеспечивающих живучесть ЭПЗА и необходимое качество регулирования технологических процессов

ЗАКЛЮЧЕНИЕ

В диссертационной работе разработаны принципы построения и теоретические положения, использованные при создании интеллектуального электропривода запорной аппаратуры, отлично сочетающегося с цифровыми управляющими устройствами верхнего уровня и обеспечивающего хорошие регуляционные свойства и сохраняющего работоспособность при единичных отказах элементов привода.

При этом решены следующие научно-практические задачи:

1. Разработаны математические модели ВД, позволяющие исследовать рабочие характеристики привода при отказах отдельных элементов двигателя и схемы управления

2. Созданы математические модели для исследования надежности электропривода с учетом динамики распространения отказа, позволяющие по общей принципиальной схеме с учетом алгоритмов функционирования найти наиболее слабые, с точки зрения надежности, элементы.

3. Впервые предложен принцип диагностики ДПР для ВД по его собственным сигналам, теоретически обоснованы особенности конструкции и предложен алгоритм обработки информации с двух ДПР, что позволило обеспечить сохранение достоверной информации о положении ротора при отказе одного из каналов датчиков.

4. Впервые получен способ организации питания обмоток трехфазного ВД и уравнения для формирования фазных токов, обеспечивающие сохранение и постоянство момента двигателя в процессе вращения ротора при обрыве одной из фазных обмоток или при отказе электронного элемента силового канала коммутации обмотки.

5. Составлена динамическая модель системы управления приводом с учетом особенностей и нелинейностей, обусловленных применением ВД с дискретным ДПР, учитывающая дискретный характер получения информации о регулируемой координате по времени и по уровню и позволяющая методом математического моделирования осуществить уточнение параметров регулятора выходных координат.

6. Разработана и практически реализована электрическая схема ЭПЗА, которая проходит эксплуатационные испытания в ФГУП «ПО «МАЯК» г. Озерск. Результаты лабораторных и технологических испытаний привода подтвердили правильность принятых технических решений, изложенных в диссертации. Созданные образцы ЭПЗА и методики резервирования используются в учебном процессе кафедры «Электромеханика и электромеханические системы» ЮУрГУ, прежде всего при выполнении УИРС и НИРС, в курсовом и дипломном проектировании.

Научные публикации по теме диссертации.

В журналах, рекомендованных ВАК

1. Векторное управление вентильного электропривода / П.О. Шабуров, С.Г. Воронин, Д.В. Коробатов, В.В. Запунный // Вестник ЮУрГУ. Серия «Энергетика». – 2004. – Вып. 5. – № 4(33). – С. 62–68.

Другие научные публикации

2. Электропривод запорной арматуры / П.О. Шабуров, С.Г. Воронин, Д.В. Коробатов, В.В. Запунный // Наука и технологии: труды XXV Российской школы и XXXV Уральского семинара, посвященных 60-летию Победы. – М.: Изд-во РАН, 2005 – С. 400–407.

3. Шабуров, П.О. Тестирование электроприводом запорной арматуры по развиваемому моменту / П.О. Шабуров, С.Г. Воронин // Труды II Всероссийской научно-технической конференции «Проблемы электротехники, электроэнергетики и электротехнологии». – Тольятти: ТГУ, 2007 – С. 345–348.

4. Шабуров, П.О. Электропривод запорной арматуры с самодиагностикой / П.О. Шабуров, С.Г. Воронин, Д.В. Коробатов // Электромеханические и электромагнитные преобразователи энергии и управляемые электромеханические системы. – Екатеринбург: УМЦ УПИ, 2007 – С. 150-153.

5. Шабуров, П.О. Математическая модель вентильного двигателя как основа для диагностики состояния электропривода / Шабуров П.О. // Научный поиск: материалы первой научной конференции аспирантов и докторантов. Технические науки. – Челябинск: ЮУрГУ, 2009. – С. 265–268.

6. Шабуров, П.О. Свидетельство ОФАП об отраслевой регистрации разработки «Программа управления микроконтроллером интеллектуального электропривода регулирующей арматуры» / П.О. Шабуров; № 10352 от 08.04.2008.

Патенты РФ

7. Пат. 81399 Российская Федерация, МПК⁷ Н 02 Р 6/08, Интеллектуальный мехатронный модуль управления электроприводом запорной арматурой / С.Г. Воронин, П.О. Шабуров, Д.В. Коробатов, А.Н. Кононов, Н.А. Кононов, И.С. Антонов. – № 2008138680/22; заявл. 29.09.2008; опублик. 13.03.2009, Бюл. № 7.

Издательский центр Южно-Уральского государственного университета

Подписано в печать 24.12.2009. Формат 60×84 1/16. Печать трафаретная.
Усл. печ. л. 0,93. Уч.-изд. л. 1. Тираж 80 экз. Заказ 576/560.

Отпечатано в типографии Издательского центра ЮУрГУ.
454080, г. Челябинск, пр. им. В.И. Ленина, 76.