На правах рукописи

Щукин Константин Юрьевич

СИНТЕЗ МИКРОПРОЦЕССОРНОЙ СИСТЕМЫ УПРАВЛЕНИЯ ШАГОВЫМ ЭЛЕКТРОМАГНИТНЫМ ПРИВОДОМ С ИСПОЛЬЗОВАНИЕМ МАТЕМАТИЧЕСКОГО МОДЕЛИРОВАНИЯ

Специальность 05.09.03

«Электротехнические комплексы и системы»

Автореферат диссертации на соискание ученой степени

кандидата технических наук

Москва – 2011г.

Работа выполнена в Федеральном государственном унитарном предприятии «Всероссийский научно-исследовательский институт электромеханики с заводом имени А. Г. Иосифьяна»» (ФГУП «НПП ВНИИЭМ»)

Научный руководитель:

Доктор технических наук Макриденко Леонид Алексеевич

Официальные оппоненты:

Доктор технических наук, профессор Онищенко Георгий Борисович,

Доктор технических наук, профессор Козаченко Владимир Филиппович

Ведущая организация:

ОАО ОКБ «Гидропресс» Московская обл., г. Подольск, ул. Орджоникидзе, 21

Защита состоится 23 декабря 2011 года в 14-00 на заседании диссертационного совета Д 403.005.01 при ФГУП «НПП ВНИИЭМ» по адресу: Москва, Хоромный тупик, д.4.

С диссертацией можно ознакомиться в библиотеке ФГУП «НПП ВНИИЭМ».

Автореферат разослан 21 ноября 2011 года.

Ученый секретарь диссертационного совета, к.в.н., доцент

Пинчук А.В.

ОБЩАЯ ХАРАКТЕРИСТИКА РАБОТЫ

В настоящее время приоритетным направлением в развитии энергетики является атомная энергетика. Разработана программа развития атомной энергетики России, основным направлением которой являются АЭС с водоводяными энергетическими реакторами мощностью 1000MBT типа BBЭP-1000. Многолетняя практика сооружения и эксплуатации энергоблоков с реакторами BBЭP-1000 подтверждает их надежность и безопасность, что дает основание полагать, что энергоблоки данного типа будут сооружаться и эксплуатироваться и в ближайшие десятилетия.

В качестве основного способа регулирования мощности водо-водяного энергетического реактора используется перемещение поглощающих стержней в активной зоне. Группа поглощающих стержней объединяется в кластер, или орган регулирования (ОР). Каждый ОР перемещается при помощи электропривода.

В настоящее время одним из основных типов электропривода ОР системы защиты (СУЗ) реактора BB3P-1000 является управления И шаговый (ШЭM), спроектированный электромагнитный привод разработчиком реакторной установки – ОКБ «Гидропресс». Разработчиком и изготовителем комплекса электрооборудования (КЭ) СУЗ, который включает в себя в т.ч. систему управления приводами, является ФГУП «НПП ВНИИЭМ».

Важными направлениями развития атомной энергетики России являются модернизация и продление ресурса действующих энергоблоков, а также увеличение срока службы новых реакторных установок до 60 лет. Поставляемый в настоящее время привод СУЗ ШЭМ-З имеет назначенный срок службы 30 лет. Указанный срок службы обеспечивается при управлении приводом токами стабилизированной формы от КЭ СУЗ с аналоговой аппаратурой управления приводами.

Современные тенденции развития КЭ СУЗ связаны с расширением применения микропроцессорного управления в аппаратуре, в т.ч. в аппаратуре управления приводами ОР СУЗ реакторов ВВЭР. Это открывает новые возможности по увеличению срока службы и надежности системы СУЗ. В частности, в микропроцессорной системе управления может быть реализован алгоритм, снижающий ток, и, как следствие, динамические воздействия при срабатывании электромагнитов привода и тем самым повышающий срок службы и надежность его работы. Имеющийся в настоящее время научно-методический аппарат не позволяет провести разработку и оценку эффективности такого алгоритма. Необходимо усовершенствовать математическую модель контура управления током электромагнита. Усовершенствованная модель контура управления должна учитывать влияние вихревых токов магнитной системы и динамики перемещения привода на ток электромагнита.

<u>Актуальность темы работы</u> обусловлена тем, что в ней проводятся научные и практические исследования по моделированию, проектированию и изготовлению микропроцессорной системы управления ШЭМ с повышенным

сроком службы и надежностью, которые имеют важное значение для энергетики и экономики нашей страны.

В тематике ФГУП «НПП ВНИИЭМ» в настоящее время существует ряд разработок КЭ СУЗ, в которых применяется аппаратура с микропроцессорным управлением приводами ОР СУЗ, что подтверждает практическую востребованность данной работы.

В данной работе рассматривается комплекс научно-технических решений, связанных с синтезом микропроцессорной системы управления приводом типа ШЭМ.

<u>Объект</u> исследования – микропроцессорная система управления шаговым электромагнитным приводом ОР СУЗ реактора ВВЭР.

<u>Предметом</u> исследования являются процессы, протекающие в контуре управления током электромагнита привода ОР СУЗ реактора ВВЭР.

Целью работы является обеспечение современных требований по СУЗ при помощи службы и надежности увеличению срока анализа ШЭМ электромагнитных процессов В элементах привода И синтеза микропроцессорной системы управления.

<u>Научная задача</u> заключается в синтезе микропроцессорной системы управления шаговым электромагнитным приводом ОР СУЗ, которая включает решение следующих <u>частных задач</u>:

• разработку математических моделей элементов привода и его системы управления, включая анализ электромагнитных процессов, протекающих в ШЭМ;

• синтез алгоритмов управления приводом, обеспечивающих снижение динамических нагрузок, действующих в приводе при срабатывании электромагнита, и введение дополнительного контроля работы привода;

• выбор схемотехнических и программных решений при разработке цифровой аппаратуры управления ШЭМ, позволяющих повысить срок службы и надежность КЭ СУЗ;

• анализ результатов испытаний и эксплуатации разработанной аппаратуры управления приводом ОР с ШЭМ в составе КЭ СУЗ на АЭС с реактором ВВЭР-1000.

Научная новизна работы состоит в том, что:

• разработана математическая модель замкнутого контура цифрового управления электромагнитом привода ШЭМ, учитывающая влияние вихревых токов магнитной системы и динамики перемещения привода на ток электромагнита;

• на основе анализа полученной модели предложен и реализован новый алгоритм управления, снижающий динамические воздействия при работе привода;

• синтезированы новые схемотехнические и программные решения в аппаратуре управления шаговым электромагнитным приводом, позволяющие увеличить срок службы и надежность привода СУЗ.

Практическая значимость работы состоит в следующем:

• представлен комплекс научно-технических решений, положенных в основу разработки цифровой аппаратуры управления шаговым электромагнитным приводом ОР СУЗ реактора ВВЭР-1000, успешно эксплуатирующейся на ряде действующих АЭС;

• результаты исследований процессов, протекающих в электромагните привода ШЭМ, могут представлять интерес для разработчиков устройств с управляемыми электромагнитами;

• универсальность моделирования и предложенного алгоритма управления, приведенных в этой работе, позволяют использовать их при разработке перспективных систем управления.

Внедрение результатов.

Разработанная микропроцессорная система управления приводом ШЭМ-3 прошла функциональные и квалификационные испытания и внедрена на 2-м энергоблоке Ростовской АЭС в составе комплекса электрооборудования СУЗ, а также осуществлена поставка оборудования для ряда строящихся АЭС, в т.ч. для нового проекта АЭС-2006.

<u>Основные положения, полученные лично автором и выносимые на</u> защиту:

• математическая модель контура управления током тянущего электромагнита ШЭМ, учитывающая влияние вихревых токов в защитной оболочке привода и динамики перемещения плунжера (якоря) на ток электромагнита;

• алгоритм управления током электромагнита, полученный на основе анализа и синтеза результатов исследования модели, позволяющий снизить динамические воздействия при срабатывании электромагнитов ШЭМ;

• структурные и программные решения, реализованные в микропроцессорной аппаратуре управления приводом ОР с ШЭМ для реактора ВВЭР-1000 с увеличенным сроком службы и надежности СУЗ.

<u>Апробация результатов.</u>

Основные результаты работы докладывались и обсуждались на заседаниях секции НТС ФГУП «НПП ВНИИЭМ» «Электрооборудование и системы управления для АЭС».

Автор участвовал в VI Международной (XVII Всероссийской) конференции по автоматизированному электроприводу (АЭП), проходившей с 28 по 30 сентября 2010 года в Тульском Государственном Университете. Доклад автора опубликован в [4].

Публикации по работе:

По теме диссертации в изданиях, включенных в перечень ВАК, опубликовано 4 статьи.

<u>Структура и объем работы.</u> Работа состоит из введения, четырех глав, заключения, приложений и списка использованной литературы. Работа содержит 155 листов, 57 рисунков, 12 таблиц.

ОСНОВНОЕ СОДЕРЖАНИЕ РАБОТЫ

Во введении обосновывается актуальность работы и дается ее общая характеристика.

<u>В славе 1</u> проводится анализ разработок в исследуемой области и определяется направление исследования для решения задачи повышения срока службы и надежности системы СУЗ.

Определены следующие направления исследований и разработок для их анализа:

– приводы органов регулирования системы управления и защиты водоводяных энергетических реакторов. Требования к приводам ОР СУЗ, основные типы приводов их особенности;

– силовые преобразователи для управления приводами ОР СУЗ водо-водяных энергетических реакторов. Требования к системам управления приводами ОР СУЗ, схемы силовых преобразователей.

 исследования и разработки в области алгоритмов и систем управления силовыми преобразователями шаговых электромагнитных приводов.

Далее приведены требования к приводам ОР СУЗ.

Приводы ОР СУЗ ядерных реакторов должны удовлетворять специфическим требованиям эксплуатации, а также конструкционно-технологическим и экономическим требованиям.

Рассмотрена динамика развития приводов ОР СУЗ водо-водяных энергетических реакторов, различные конструкции приводов ОР СУЗ и их основные особенности.

Рассмотрен ряд зарубежных и отечественных приводов, в частности, привод фирмы Westinghouse, линейный шаговый привод ЛШП и шаговые электромагнитные приводы типа ШЭМ.

Приводится описание конструкции шагового электромагнитного привода типа ШЭМ-3 и поясняется принцип его работы, а также приводятся основные технические характеристики.

В состав привода входят:

- чехол;

- блок электромагнитов;

- блок перемещения;

- штанга;

- датчик положения шаговый (ДПШ).

Блок электромагнитов состоит из трех электромагнитов. Он предназначен для создания тяговых усилий, обеспечивающих перемещение подвижных элементов блока перемещения, которые, в свою очередь, перемещают штангу, сцепленную с ОР. По назначению электромагниты подразделяются на тянущий (TM), запирающий (3M) и фиксирующий (ФМ).

Блок перемещения устанавливается внутрь чехла. Взаимодействуя с блоком электромагнитов, он осуществляет перемещение штанги с ОР путем последовательного срабатывания пар полюсов, управляющих защелками по циклограмме токов, задаваемой системой управления.

Штанга предназначена для осуществления связи ОР с подвижными элементами блока перемещения.

Кинематическая схема привода в режиме удержания приведена на рис. 1.



Рис.1. Кинематическая схема привода ШЭМ-3 в режиме удержания.

Режим перемещения привода обеспечивается подачей импульсов тока определенной последовательности на катушки электромагнитов привода, в результате чего связанная с подвижным полюсом подвижная защелка перемещает штангу, а фиксирующая защелка удерживает ee между перемещениями.

В существующей системе управления электромагниты привода при срабатывании питаются стабилизированным током. По мере уменьшения зазора между полюсами электромагнита, возрастает тянущее усилие, и, как следствие, ускорение подвижного полюса. При достижении полюсом механического упора происходит удар, который демпфируется пружинным блоком. Величина динамических воздействий, возникающих при срабатывании электромагнитов, влияет на срок службы и надежность работы привода.

Далее приводятся технические требования, предъявляемые к аппаратуре управления приводом ШЭМ-3.

Аппаратура управления приводом ШЭМ-3 должна обеспечивать:

– перемещение OP вверх или вниз с рабочей скоростью путем формирования токов электромагнитов привода в соответствии с заданными циклограммами;

– остановку и удержание ОР в любом положении по высоте активной зоны путем подачи на фиксирующий электромагнит привода выпрямленного тока (режим удержания).

Далее рассмотрена динамика развития силовых преобразователей для управления приводами ОР СУЗ водо-водяных энергетических реакторов.

В частности, рассмотрены схемы ряда силовых преобразователей, как отечественных, так и зарубежных.

Существующая схема питания привода ШЭМ разработки НПП ВНИИЭМ в упрощенном виде приведена на рис.2.

Питание тянущего, запирающего и фиксирующего электромагнитов привода токами заданной формы производится от трех тиристорных преобразователей, входящих в состав блока управления БУ.

Дальнейшее развитие аппаратуры управления приводами ШЭМ в значительной степени может быть обеспечено с применением микропроцессорной элементной базы.

Далее рассмотрены существующие исследования и разработки в области алгоритмов и систем управления силовыми преобразователями шаговых электромагнитных приводов.



Рис. 2. Упрощенная схема питания привода ШЭМ.

В частности, рассмотрена существующая расчетная модель привода для режима отработки одного шага. В модели учтена сила тяги электромагнита $(F_{\mathcal{PM}})$, сила тяжести (G), сила трения (F_C) , силы упругости и вязкого трения демпфирующей пружины.

В этой модели привода ШЭМ не учитывается ряд явлений, влияющих на работу системы управления. В частности, не учитывается влияние вихревых токов в защитной оболочке привода, приводящее к относительно большим пульсациям выходного тока преобразователя (порядка 5A). Также не учитывается влияние динамики перемещения плунжера (якоря) электромагнита на его ток.

Рассмотрен существующий алгоритм определения факта перемещения привода, который может быть применен для дополнительного резервирования датчика положения привода, а также для получения дополнительной диагностической информации о приводе.

В основу этого алгоритма положено явление повышения напряжения на электромагните в процессе перемещения.

Ток и напряжение на магните связаны соотношением:

$$u = \frac{d\psi}{dt} + iR, \qquad (1)$$

где *и*-напряжение, *i*-ток магнита, *R*-омическое сопротивление магнита, ψ -потокосцепление.

Поскольку $\psi = L \cdot i$, где L -индуктивность электромагнита, то

$$u = L\frac{di}{dt} + i\frac{dL}{dt} + iR \tag{2}$$

В процессе перемещения полюсов магнита меняется его индуктивность. Как следствие, при поддержании постоянного тока формула (2) принимает вид: $u = i \frac{dL}{dt} + iR$; т.е. для поддержания тока система управления должна компенсировать ЭДС движения, вызванную изменением индуктивности в процессе перемещения. Рассмотрен существующий улучшенный способ управления шаговым электромагнитным приводом. Суть способа заключается в определении факта совершения перемещения по наличию «провала» в токе электромагнита при его срабатывании. Время возникновения «провала» позволяет судить о расцеплении штанги с ОР или о повышенном трении в механизме привода. Полученная информация используется для корректировки параметров алгоритма, что позволяет снизить динамические воздействия при его работе.

Существующие алгоритмы управления и диагностики позволяют повысить качество управления приводом. Однако они обладают своими недостатками, или не адаптированы для рассматриваемого объекта управления - привода ШЭМ.

На основе проведенного анализа разработок в исследуемой области сделаны следующие <u>выводы</u>:

• наиболее современным и перспективным приводом органов регулирования СУЗ реакторов ВВЭР на данном этапе развития является шаговый электромагнитный привод ШЭМ-3. Для него актуальна задача снижения динамических воздействий, возникающих при срабатывании электромагнитов привода. Снижение динамических воздействий в приводе позволяет увеличить срок службы и надежность его работы;

• для снижения динамических воздействий, возникающих при срабатывании электромагнитов привода, существуют как конструктивные решения механической части привода, так и электронные способы управления током электромагнитов;

• для синтеза микропроцессорной системы управления шаговым электромагнитным приводом можно использовать математические модели привода и системы управления. Это позволит разработать алгоритмы управления и диагностики привода, повышающие срок службы и надежность его работы. В существующих моделях привода ШЭМ-3 не учтен ряд эффектов, влияющих на работу системы управления, а именно:

- не учитывается влияние вихревых токов в защитной оболочке привода на ток электромагнита;

- не учитывается влияние динамики перемещения плунжера (якоря) электромагнита на его ток.

Исходя из вышеперечисленного, выбрано направление исследования:

построение математических моделей привода ШЭМ и цифровой системы управления и применение полученных результатов для синтеза микропроцессорной системы управления, обеспечивающей снижение динамических воздействий и дополнительный контроль при работе привода.

Для решения поставленной задачи проведены следующие исследования и разработки:

- разработка математических моделей элементов привода и его системы управления, включая анализ электромагнитных процессов, протекающих в ШЭМ;

- синтез алгоритмов управления приводом, обеспечивающих снижение динамических нагрузок, действующих в приводе при срабатывании

электромагнита, и введение дополнительного контроля работы привода;

- выбор схемотехнических и программных решений при разработке цифровой аппаратуры управления ШЭМ, позволяющих повысить срок службы и надежность КЭ СУЗ;

- анализ результатов испытаний и эксплуатации разработанной аппаратуры управления приводом ОР с ШЭМ в составе КЭ СУЗ на АЭС с реактором ВВЭР-1000.

<u>В главе 2</u> исследованы основные процессы, протекающие при перемещении шагового привода, как в самом приводе, так и в панели силового управления. Целью исследования является построение моделей привода ШЭМ и системы управления, а также разработка алгоритма управления с использованием построенных моделей.

В работе рассматривается модель контура управления током тянущего электромагнита (рис.3), поскольку при его срабатывании наблюдаются наибольшие динамические воздействия.

Существующий блок управления по управляющим сигналам «больше», «меньше» и «разрешение» задает циклограмму тока электромагнита. Заданный ток сравнивается с действительным, после чего разностный сигнал поступает на регулятор. Далее по сигналу регулятора осуществляется импульсно-фазовое управление выпрямителем. Результирующее напряжение, снимаемое с трех тиристоров, подается на блок, моделирующий работу электромагнита привода, построение модели которого является отдельной задачей. На рисунках 3, 7-10 обозначения функциональных блоков соответствуют принятым в пакете MATLAB.

Блоки «TM» и «Controller» являются подсистемами.

Подсистема «ТМ» моделирует работу тянущего электромагнита привода. На нее подается напряжение с тиристорного выпрямителя. С выхода подсистемы снимаются сигналы напряжения, тока, скорости и положения подвижного полюса и силы электромагнита.

Подсистема «Controller» реализует алгоритмы работы разрабатываемой системы управления. На нее подаются синхросигналы фаз, сигнал задания тока и сигнал обратной связи по току.



Рис. 3. Модель контура управления тянущим электромагнитом. Далее проведено построение указанных подсистем.

На начальном этапе электромагнит упрощенно заменен активно-индуктивной нагрузкой. Осуществлен приближенный расчет величин R и L для величины зазора d=26мм.

Далее проведено сравнение реакции построенной модели электромагнита на входное напряжение с реально измеренным током электромагнита.

Анализируя результаты моделирования, сделаны следующие выводы:

 индуктивность реального электромагнита существенно больше расчетной.
Это объясняется неточностью приближенного расчета, который не учитывает прохождение части магнитного потока по воздуху;

– пульсации тока в реальном электромагните существенно больше, чем пульсации в реакции построенной модели.

Для дальнейшего уточнения модели проведен расчет магнитных потоков в тянущем и запирающем электромагнитах привода при помощи программы конечно-элементного анализа. Для тянущего магнита определялись такие его характеристики в зависимости от величины тока и зазора, как сила F, индуктивность L, потокосцепление ψ , а также величины магнитных потоков через различные сечения участков магнитопровода.



Рис.4. Распределение магнитной индукции по различным участкам магнитопровода тянущего электромагнита при d=26мм, I=14A.

Распределение магнитной индукции по различным участкам магнитопровода ТМ показано на рис. 4, а зависимость его тянущего усилия F от тока I и зазора d1 приведена на рис.5. На основе анализа результатов расчетов сделан вывод о том, что несмотря на насыщение участков магнитопровода, тянущее усилие электромагнита при токе 14 А значительно (в 1,8 раза) возрастает с уменьшением зазора с 26 до 6 мм.

Расчет запирающего электромагнита также необходим для определения его тянущего усилия, которое добавляется к усилию тянущего магнита.



Рис.5. Зависимость усилия тянущего электромагнита F от тока I и зазора d1

Для учета влияния вихревых токов в защитной оболочке привода и рассеяния магнитного потока в катушке электромагнита в расчетную схему магнитной цепи (см. рис. 6) добавлен поток рассеяния в катушке Φ 3, который не проходит по полюсам магнита и, следовательно, не создает силы. Также поток рассеяния не проходит сквозь защитную оболочку привода, в которой возникают вихревые токи. На рис.6 обозначения $R_{перем}$, $R_{расс}$, $R_{общ}$ соответствуют магнитному сопротивлению переменного зазора, магнитному сопротивлению рассеяния в катушке и общему магнитному сопротивлению участков магнитопровода.

Такое приближение сделано на основе анализа распределения потоков в магнитной системе ТМ. По результатам расчетов поток, проходящий сквозь защитную оболочку, но не проходящий по магнитным полюсам, составляет не более 7% от потока, проходящего по полюсам (поток Ф2 на рис.6)



Рис.6. Расчетная схема магнитной цепи с учетом короткозамкнутых витков.

При рассеянии только в самой катушке все конструкционные короткозамкнутые витки, через которые проходит один и тот же поток-Ф2, можно заменить одним эквивалентным витком. Этот виток характеризуется

одним значимым параметром - активным сопротивлением R2. Произведена оценка значения активного сопротивления короткозамкнутых витков на примере трубы из стали 08X18H10T.

Записав для приведенной на рис. 6 расчетной схемы систему уравнений для потоков Ф1, Ф2, Ф3, получена подсистема индуктивности, приведенная на рис.7.



Рис.7. Подсистема индуктивности с учетом короткозамкнутых витков.

Получена передаточная функция неподвижного электромагнита с учетом вихревых токов, рассчитанная в окрестности рабочей точки (I1=14A, d=26мм):

$$\frac{I_1}{U_1} = 0, 4 \cdot \frac{0,011s+1}{2,13 \cdot 10^{-4}s^2 + 0,2s+1} = 0, 4 \cdot \frac{0,011s+1}{(0,19s+1) \cdot (0,00113s+1)}$$
(3)

Проведено сравнение полученной передаточной функции с передаточной функцией без учета вихревых токов.

У АФЧХ обеих передаточных функций совпадают низкочастотные части (до единиц Гц), а высокочастотные части идут параллельно (отличаются примерно на 20 дБ). Наличие дифференцирующего звена в числителе передаточной функции (3) приводит к относительно большим пульсациям тока.

Построенная подсистема индуктивности (рис.7) устанавливает связь между входным напряжением и током электромагнита. На ее вход подаются значения магнитных сопротивлений R_{cym} (является суммой $R_{oбщ}$ и R_{nepem}) и R_{pacc} . Эти величины получены по результатам расчета магнитных потоков и являются табличными функциями, вычисленными в диапазоне токов I=0..17A с шагом 1A и зазоров d=6,8,11,14,17,20,23,26 мм.

Для учета влияния динамики срабатывания электромагнита на его ток, по току I1, формируемому подсистемой рис. 7, должна определяться сила электромагнита F(I1,d), которая, в свою очередь, определяет динамику изменения зазора d(t) и магнитных сопротивлений $R_{cym}(d)$, $R_{pace.}(d)$.

Так как в приводе ШЭМ-3 к действию силы ТМ добавляется тянущее усилие ЗМ, то необходимо учитывать и это добавочное усилие, которое также является функцией зазора d, причем по мере перемещения привода это усилие снижается. Поскольку перемещение ЗМ происходит при постоянном токе (участки циклограммы 13 или 8А), то достаточно вычислить ее значения на этом токе при различных зазорах d. Результирующая сила F определяется током TM и величиной зазора.

Величина зазора d подчиняется закону:

$$d = d_0 - \int_{t_1}^{t_2} v \cdot dt$$
, $\Gamma \exists e \ v = \int_{t_1}^{t_2} a \cdot dt$, $a = \frac{F - mg}{m} = \frac{F}{m} - g$.

Полученная подсистема, моделирующая динамику перемещения, приведена на рис.9.



Рис.8. Подсистема, моделирующая динамику перемещения.

Итак, имеем подсистему индуктивности (рис. 7) и подсистему, моделирующую динамику перемещения (рис.8). Также имеются зависимости для магнитных сопротивлений $R_{cym}(I1,d)$, $R_{pacc}(I1,d)$, используемые подсистемой индуктивности. В свою очередь, сила, необходимая для определения зазора, определена по результатам магнитных расчетов (см. график на рис.5). В результате получена подсистема, моделирующая работу электромагнита привода (см. рис.9).



Рис.9. Подсистема, моделирующая работу электромагнита привода.

На рис. 9 блоки Rsum(I1,d), Rrass(I1,d), F(I1,d) реализуют табличные функции, полученные по результатам расчетов магнитных систем ТМ и ЗМ.

Для моделирования управляющей части (подсистема «Controller» на рис.3) на основе анализа существующего блока БУ1 построена модель, реализующая алгоритм разрабатываемой микропроцессорной системы управления.

Подсистема, моделирующая работу микропроцессорной системы управления, приведена на рис.10.

Система управления моделируется в виде подсистемы, в которую входят блоки импульсно-фазового управления, цифровой ПИ-регулятор, а также блоки для моделирования работы специально разработанного алгоритма управления, снижающего ток тянущего электромагнита в процессе перемещения. Имеется возможность исследовать поведение системы управления при наличии помех в обратной связи по току. Представленная модель учитывает квантование сигналов по уровню и по времени в цифровой системе управления.



Рис. 10. Подсистема, моделирующая работу микропроцессорной системы управления.

Результаты моделирования работы контура управления током тянущего электромагнита с полученными моделями электромагнита и микропроцессорной системы управления представлены на рис. 11. Представленные на рис.11 графики напряжения, тока, перемещения, скорости и силы получены при традиционном алгоритме управления, с поддержанием заданного выходного тока электромагнита в процессе перемещения плунжера (якоря).

Величина пульсаций тока составляет a=5,1A, время переходного процесса тока tnn=0,38с, время перемещения tn=0,13с, максимальная скорость плунжера в конце перемещения v_{макс}=0.41 м/с.

Также из графиков рис.11 сделан следующий вывод:

- при изменении зазора (и индуктивности) в процессе движения регулятор для поддержания заданного тока увеличивает напряжение U на электромагните.

На основе анализа полученной модели предлагается новый алгоритм управления, основная идея которого заключается в компенсации возрастания скорости плунжера в процессе перемещения снижением тока электромагнита, и, следовательно, тянущего усилия. Для этого регулятором устанавливается заданный ток, а после завершения переходного процесса поддерживается напряжение, соответствующее этому току.

При возрастании скорости плунжера будет возрастать ЭДС движения (см. (2)), вызванная изменением индуктивности в процессе перемещения. Как следствие, ток магнита будет уменьшаться пропорционально скорости уменьшения зазора, также будет уменьшаться и тянущее усилие.

В случае отсутствия движения будет поддерживаться установленный ток.



Рис.11. Графики напряжения (U1), его постоянной составляющей (U2), тока (I2), его постоянной составляющей (I3), задающего сигнала (I1), зазора d, скорости v и силы F.





Рис. 12. Графики напряжения (U1), его постоянной составляющей (U2), тока (I2), его постоянной составляющей (I3), задающего сигнала (I1), зазора d, скорости v и силы F для предлагаемого алгоритма управления.

Графики напряжения, тока, перемещения, скорости и силы тянущего магнита при моделировании предлагаемого алгоритма управления приведены на рис. 12.

По результатам моделирования снижение тока в процессе движения составило $\Delta I=2A$, время перемещения tn=0,14c, максимальная скорость плунжера в конце перемещения $v_{\text{макс}}=0.31$ м/с. Таким образом, применение нового алгоритма управления током электромагнита позволило снизить скорость плунжера в конце перемещения на 32%. Время перемещения увеличилось всего на 0,01с. По полученным данным можно судить о качественных эффектах применения предложенного алгоритма (снижение конечной скорости плунжера и незначительное увеличение времени перемещения).

Достоинством данного алгоритма является простота его реализации. Кроме того, по характерному уменьшению тока в процессе перемещения можно определить факт совершения перемещения приводом без использования дополнительных датчиков напряжения электромагнитов.

В предлагаемом алгоритме управления электромагнитом по завершении переходного процесса величина напряжения компенсирует значение $i \cdot R$, в результате чего формула (1) примет вид:

 $\frac{d\psi}{dt} + \Delta i \cdot R = 0$, где Δi – отклонение тока от первоначально установленного.

Следовательно, потокосцепление при перемещении подчиняется закону:

 $\psi = \psi_0 - \int_{t_0}^{t} \Delta i \cdot R \cdot dt$, где ψ_0 - потокосцепление на момент начала перемещения.

Величина ψ_0 , также как и пороговое значение потокосцепления ψ для определения факта перемещения, определена по результатам расчета магнитной системы электромагнита.

Проведенное моделирование позволило разработать алгоритмы работы управляющего микроконтроллера.

При моделировании процессов, протекающих в блоке управления приводом и собственно шаговом приводе, получены следующие результаты:

– разработаны модели в пакете MATLAB для решения задачи синтеза микропроцессорной системы управления шаговым электромагнитным приводом. Применение моделирования позволило определить характеристики системы управления на стадии разработки и параметры алгоритмов управления;

– на основе анализа полученной модели был предложен и проанализирован новый алгоритм управления. По результатам моделирования скорость плунжера в конце движения снизилась с 0.41м/с до 0.31м/с;

 по характерному уменьшению тока в процессе перемещения можно определить факт совершения перемещения приводом без использования дополнительных датчиков напряжения электромагнитов;

– исследованы основные процессы, оказывающие влияние на ток управляемого электромагнита, такие как вихревые токи в защитной оболочке привода и перемещение якоря.

Результаты моделирования легли в основу разработки цифрового блока управления приводом ШЭМ-3.

<u>В славе 3</u> проводится выбор схемотехнических решений микропроцессорной системы управления шаговым электромагнитным приводом и реализация алгоритмов управления в разработанном устройстве, рассматриваются преимущества микропроцессорной системы управления по отношению к прототипу на дискретных элементах.

Разработка микропроцессорной системы управления приводом позволяет достичь следующих преимуществ:

– повышение гибкости системы управления. Это обеспечивает простоту корректировки алгоритмов работы блока, а также возможность реализации управления перспективных алгоритмов И диагностики без изменения блока. схемотехнической части В качестве перспективных алгоритмов рассматривается новый алгоритм управления алгоритм определения И перемещения привода по характеру изменения токов;

– повышение помехозащищенности и устойчивости работы блока;

– упрощение процесса наладки и контроля. Применение микропроцессорного управления позволяет перейти от ручного контроля к контролю в автоматизированном режиме;

– повышение стабильности характеристик блока при воздействии дестабилизирующих факторов (температуры, влажности, старения элементов);

– улучшение возможностей по диагностике неисправностей при работе на АЭС.

Разработанные алгоритмы реализованы в блоке БУ2 шкафа ШСУ2К-В на втором энергоблоке Ростовской АЭС. Силовая часть блока БУ2 выполнена аналогично с существующим блоком БУ1. Управляющая часть реализована в модуле МУ1, который выполнен на микропроцессорных средствах. Структурная схема разработанного микропроцессорного УСУ приведена на рис. 13.



Рис. 13. Структурная схема разработанного УСУ.

Модуль МУ1 выполнен на основе двух микроконтроллеров – основного МК1 и диагностического МК2.

Модуль МУ1 реализует системы управления токами ТМ, ЗМ и ФМ. Задание режима работы УСУ («вверх», «вниз», «удержание», или «сброс»)

осуществляется в соответствии с комбинацией управляющих сигналов. Для синхронизации импульсов управления с напряжением питающей сети, а также для синхронизации выдачи циклограмм на модуль МУ1 подаются напряжения трех синхронизирующих трансформаторов с платы ППС.

Диагностический контроллер служит для контроля правильности формирования токов. При недопустимых токах магнитов МК2 запрещает работу МК1 и переводит привод на блок резервного питания. Основной контроллер МК1 также производит контроль формируемых токов.

Далее в главе 3 приводятся основные технические решения, использованные при разработке модуля МУ1. В качестве основного микроконтроллера МК1 выбран микроконтроллер TMS320F2812 фирмы Texas Instruments, а в качестве диагностического – микроконтроллер SiLabs C8051F310. Приводится детальное описание функций, выполняемых каждым из микроконтроллеров.

По результатам этапа реализации разработанных алгоритмов в микропроцессорной системе управления приводом сделаны следующие выводы:

– разработанные алгоритмы управления приводом могут быть реализованы на современных микропроцессорных средствах, причем обеспечивается существенный запас ресурсов быстродействия и памяти для дальнейшего развития системы управления приводом;

– разработанный микропроцессорный блок управления приводом БУ2 полностью совместим с блоком БУ1 предыдущего поколения, т.е. может устанавливаться в шкафы силового управления, уже работающие на АЭС. При этом реализуются все преимущества разработанной микропроцессорной системы управления, например, снижение динамических воздействий в управляемом приводе.

<u>В главе 4</u> проведен анализ экспериментальных исследований и испытаний разработанного устройства управления приводом.

Экспериментальные исследования разработанного микропроцессорного устройства управления шаговым электромагнитным приводом проводились в следующих целях:

• подтверждение теоретических результатов, полученных в диссертации;

• подтверждение требуемых характеристик разработанного на основе теоретических исследований цифрового блока управления БУ2 в составе шкафа силового управления ШСУ2.

В ходе экспериментальных исследований анализировалось соответствие следующих теоретических и экспериментальных результатов:

• адекватность разработанной модели тянущего электромагнита привода электромагниту реального привода ШЭМЗ;

• адекватность разработанной модели микропроцессорной системы управления реальному блоку управления БУ2;

• технические характеристики шагового электромагнитного привода с предложенным алгоритмом управления.

Для получения экспериментальных результатов использовалось автоматизированное рабочее место APM-3A-B, которое является

сертифицированным средством измерений. Автоматизированное рабочее место APM-3A-В может использоваться как для осциллографирования токов электромагнитов привода, так и для проверки работоспособности проверяемого блока БУ2 или шкафа ШСУ2К-В. Измерительная погрешность APM-3A-В составляет не более 1% для измерений тока и не более 5 мс для измерения временных параметров.

Для проверки теоретических положений использовался режим «осциллограф» автоматизированного рабочего места АРМ-3А-В.



Рис.14. Осциллограммы токов электромагнитов привода ШЭМ-3 при шаге вверх

На рис.14 представлены осциллограммы токов электромагнитов привода ШЭМ-3 при движении вверх, полученные на Ростовской АЭС с реальным приводом ШЭМ-3 с использованием традиционного алгоритма управления. Время переходного процесса составляет tпп=0,42с, а величина пульсаций тока а=0,46А. Расхождение указанных параметров с параметрами, полученным при составляет не более 12% для tпп и моделировании (см. рис. 11), a. Перерегулирование тока электромагнита (усредненного значения, без пульсаций) во время переходного процесса не превышает 5%, в то время как от системы управления требуется перерегулирование не более 10%.

На рис. 15 представлены осциллограммы токов привода ШЭМ-3 при движении вверх с предложенным в диссертации алгоритмом управления. Такое применялось к тянущему Уменьшение магниту. тока управление при срабатывании ТМ составило $\Delta I=2A$, а время перемещения tn=0,14с. Расхождение величин с величинами, полученными указанных экспериментальных по результатам моделирования (см. 12), не превышает погрешности рис. выбранного средства измерения (АРМ-ЗА-В).



Рис.15. Осциллограммы токов электромагнитов привода при движении вверх с новым алгоритмом управления.

Блок БУ2, разработанный на основе проведенных исследований, предназначен для поставки на 2-й энергоблок Ростовской АЭС в составе шкафа ШСУ2К-В. Испытания блока БУ2 проводились в процессе приемочных испытаний шкафа ШСУ2К-В на соответствие требованиям технического задания.

Проведены следующие виды испытаний блока БУ2:

- испытания на электромагнитную совместимость в составе шкафа ШСУ2;

- испытания на сейсмостойкость в составе шкафа ШСУ2;

– испытания на функционирование на опытном стенде НПП ВНИИЭМ в составе шкафа ШСУ2К-В;

– испытания с реальными приводами (33 шт) на стенде ОКБ «Гидропресс» в составе шкафа ШСУ2;

– предкомплексные и комплексные испытания в составе КЭ СУЗ на 2-м энергоблоке Ростовской АЭС.

Результаты испытаний подтвердили соответствие блока БУ2 требованиям технического задания.

На этапах предкомплексных и комплексных испытаний на 2 блоке Ростовской АЭС проводилась проверка шкафов ШСУ2К-В с блоками БУ2 в составе комплекса электрооборудования СУЗ. На основе проведенного анализа экспериментальных исследований и испытаний разработанной микропроцессорной системы управления приводом сделаны следующие выводы:

• экспериментальные исследования микропроцессорной системы управления приводом ШЭМ подтвердили адекватность построенных моделей тянущего электромагнита и микропроцессорной системы управления реальным объектам. Время экспериментального переходного процесса тока в тянущем магните и величина пульсаций близки к значениям, полученным при моделировании работы микропроцессорного контура управления током. Расхождение указанных параметров не превышает 12%. Динамические характеристики построенной модели тянущего электромагнита привода близки к реальному объекту управления. Ошибка во времени перемещения не превышает погрешности выбранного средства измерения измерительной автоматизированного рабочего места АРМ-ЗА-В;

• построенная модель цифрового контура управления током электромагнита привода ШЭМ использована для синтеза микропроцессорной системы управления, обеспечивающей снижение динамических воздействий в управляемом приводе и тем самым повышающей срок службы и надежность его работы;

• относительно большие пульсации тока (5А при среднем значении тока 14А) объясняются влиянием вихревых токов, возникающих в элементах конструкции привода.

• характерное «проседание» тока на экспериментальном графике подтверждает правильность основного принципа, заложенного в предлагаемый алгоритм управления, т.е. снижение тянущего усилия с ростом скорости плунжера. Даже в случае существенной неточности построенной модели (например, отличие массы груза, наличие большой силы трения, «подпора» кластера теплоносителем) работоспособность предложенного алгоритма управления нарушается. Независимость предложенного алгоритма не управления от дестабилизирующих факторов и погрешностей является его преимуществом. Таким образом, система управления приводом, реализующая предложенный алгоритм, является робастной;

• подтверждена принципиальная возможность определения факта совершения перемещения по снижению тока во время движения;

• разработанная на основе проведенных исследований микропроцессорная система управления приводом ШЭМ-3 успешно прошла функциональные, квалификационные, предкомплексные и комплексные испытания на 2-м энергоблоке Ростовской АЭС и внедрена в промышленную эксплуатацию в составе комплекса электрооборудования СУЗ. Также осуществлена поставка оборудования для ряда строящихся АЭС, в т.ч. для нового проекта АЭС-2006.

- 22 -

ЗАКЛЮЧЕНИЕ

По результатам работы можно сделать следующие выводы:

1. При помощи математического моделирования процессов, протекающих в системе управления шаговым электромагнитным приводом, решена задача синтеза микропроцессорной системы управления приводом, позволяющей повысить срок службы и надежность его работы;

2. Разработана математическая модель контура управления током тянущего электромагнита ШЭМ, учитывающая влияние вихревых токов в защитной оболочке привода и динамики перемещения плунжера (якоря) на ток электромагнита;

3. На основе анализа результатов исследования разработанных моделей предложен новый алгоритм управления током электромагнита, позволяющий снизить динамические воздействия при срабатывании электромагнитов ШЭМ и тем самым повышающий срок службы и надежность его работы;

4. На основе проведенных исследований разработано устройство управления приводом на микропроцессорной элементной базе. В нем реализованы новые структурные и программные решения, полученные в диссертации.

5. Проведенные экспериментальные исследования привода с разработанной микропроцессорной системой управления подтвердили основные теоретические положения и эффективность предложенного алгоритма управления;

6. Разработанная на основе проведенных исследований микропроцессорная система управления приводом ШЭМ-3 успешно прошла функциональные, квалификационные, предкомплексные и комплексные испытания и внедрена на 2-м энергоблоке Ростовской АЭС в составе комплекса электрооборудования СУЗ, а также на ряде строящихся АЭС.

Основное содержание диссертации отражено в следующих публикациях:

1 Щукин К.Ю. Математическое моделирование процессов, протекающих при перемещении шагового привода// Вопросы электромеханики, Труды НПП ВНИИЭМ -2007.-Т.104-с.70-87

2 Щукин К.Ю. Моделирование микропроцессорной системы управления шаговым электромагнитным приводом// Вопросы электромеханики, Труды НПП ВНИИЭМ -2009.-Т.113 №6-с.37–42

3 Щукин К.Ю. Разработка нового алгоритма управления шаговым электромагнитным приводом// Вопросы электромеханики, Труды НПП ВНИИЭМ -2009.-Т.113 №6-с.43–44

4 Щукин К.Ю. Преимущества перевода аппаратуры силового управления шаговыми электромагнитными приводами на микропроцессорную элементную базу.//Известия Тульского государственного университета. Технические науки. Вып.3: в 5ч. Тула: изд-во ТулГУ, 2010. Ч.2. с.127-132

Типография ФГУП «НПП ВНИИЭМ» Подписано в печать 16.11.2011 Тираж 70 экз. Усл. п.л. 1