

ЭЛЕКТРОМЕХАНИЧЕСКОЕ ОБОРУДОВАНИЕ И АВТОМАТИЧЕСКИЕ СИСТЕМЫ УПРАВЛЕНИЯ

УДК 62-83:621.313

МОДЕЛИРОВАНИЕ МИКРОПРОЦЕССОРНОЙ СИСТЕМЫ УПРАВЛЕНИЯ ШАГОВЫМ ЭЛЕКТРОМАГНИТНЫМ ПРИВОДОМ

К.Ю. Щукин
(ФГУП «НПП ВНИИЭМ»)

Приводятся современные требования к аппаратуре управления шаговыми электромагнитными приводами (ШЭМ) органов регулирования систем управления и защиты (СУЗ) водо-водяных атомных реакторов. Рассматриваются модели для исследования совместной работы разрабатываемой микропроцессорной системы управления с приводом ШЭМ. Разрабатываются и анализируются алгоритмы работы системы управления.

Ключевые слова: водо-водяной энергетический реактор, орган регулирования СУЗ, шаговый электромагнитный привод, микропроцессорная система управления, импульсно-фазовое управление, моделирование алгоритмов работы.

В настоящее время одним из важных направлений в развитии энергетики является атомная энергетика. Разработана программа развития атомной энергетики до 2015 года, приоритетным направлением которой являются АЭС с водо-водяными энергетическими реакторами типа ВВЭР-1000. Многолетняя практика сооружения и эксплуатации энергоблоков АЭС с реакторами типа ВВЭР-1000 подтверждает их надежность и безопасность, а также дает основания полагать, что энергоблоки данного типа будут сооружаться, эксплуатироваться и в ближайшие десятилетия.

Основной задачей, стоящей перед разработчиками оборудования для АЭС с ВВЭР-1000, является повышение их технических характеристик и сроков службы при обеспечении высокого уровня безопасности на всех этапах жизнедеятельности проектируемого оборудования.

В качестве основного способа регулирования мощности водо-водяного атомного реактора используется перемещение поглощающих стержней в активной зоне.

Группа поглощающих стержней объединяется в кластер или орган регулирования (ОР) системы управления и защиты (СУЗ). Каждый ОР перемещается при помощи электропривода. От того, насколько качественно и надежно электропривод выполняет свои функции, зависит качество и безопасность работы реакторной установки.

В настоящее время основным типом привода ОР СУЗ реактора ВВЭР-1000 является шаговый электромагнитный привод ШЭМ-3 (далее привод), разработанный главным конструктором реакторной установки ОКБ «Гидропресс».

Привод ШЭМ-3 вместе с ОР является исполнительным механизмом СУЗ и предназначен для перемещения ОР, фиксации его в крайних и промежуточных положениях, выдачи информации от датчика типа ДПШ о положении ОР и сброса ОР в режиме аварийной защиты (АЗ). С помощью привода осуществляется пуск, регулирование мощности и остановка реактора путем введения в активную зону или выведения из нее ОР, а также аварийная остановка реактора путем сброса ОР при обесточивании привода.

Требования к аппаратуре силового управления приводом

Аппаратура управления приводом ШЭМ-3 должна обеспечивать:

- перемещение ОР вверх или вниз с рабочей скоростью путем формирования токов электромагнитов привода в соответствии с циклограммами токов, задаваемыми ОКБ «Гидропресс»;
- остановку и удержание ОР в любом положении по высоте активной зоны путем подачи на фиксирующий электромагнит привода постоянного тока (режим удержания);
- снятие разрешения управления с приводов ОР по командам АЗ и ускоренной предупредительной защиты (УПЗ), поступающим из исполнительной части аварийной и предупредительной защиты (АЗ-ПЗ);
- удержание ОР в любом положении по высоте активной зоны при недопустимом снижении токов электромагнитов привода путем подключения запирающего и фиксирующего электромагнитов к аккумуляторной батарее (автоматический подхват) с выдачей сигнала неисправности;

- остановку ОР в крайних верхнем КВ и нижнем КН положениях по сигналам конечных выключателей;
 - защиту от «неуправляемого» движения вверх ОР при возникновении неисправностей в устройстве силового управления;
 - синхронное перемещение ОР в группе;
 - формирование сигнала неисправности оборудования.
- Каждый привод ОР должен управляться как индивидуально, так и в составе группы.

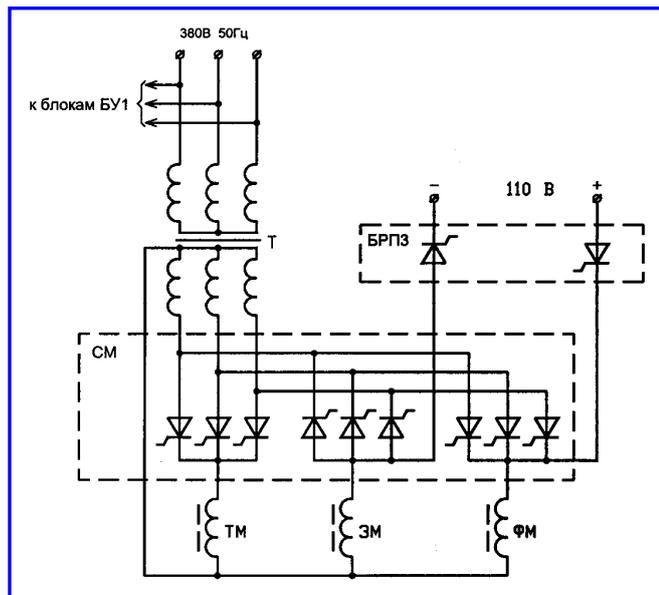


Рис. 1. Упрощенная схема питания привода: СМ – силовой модуль блока БУ1; БРПЗ – блок резервного питания; Т – трансформатор 380/250 В; ТМ – тянущий электромагнит; ЗМ – запирающий электромагнит; ФМ – фиксирующий электромагнит

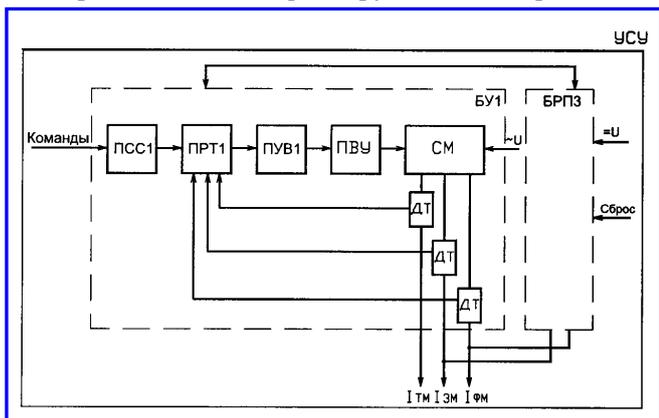


Рис. 2. Структурная схема УСУ: БУ1 – блок управления; БРПЗ – блок резервного питания; ДТ – датчик тока; ПУВ – плата выходных устройств; ПУВ1 – плата управления выпрямителя; ПРТ1 – плата регулятора тока; ПСС1 – плата связи с системой; СМ – силовой модуль; УСУ – устройство силового управления; $I_{ТМ}$ – ток тянущего магнита; $I_{ЗМ}$ – ток запирающего магнита; $I_{ФМ}$ – ток фиксирующего магнита

Существующая система силового управления приводом

С учетом технических требований для управления приводом ШЭМ-3 разработан шкаф силового управления типа ШСУ2, в состав которого входят три устройства силового управления (УСУ). Для перемещения привода вверх или вниз УСУ формирует соответствующие циклограммы токов магнитов.

Схема упрощенного питания привода представлена на рис. 1.

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

При нарушении работы блока БУ, тянущий и запирающий электромагниты привода подключаются к аккумуляторной батарее через блок резервного питания БРП, входящий в состав УСУ.

Структурная схема одного УСУ представлена на рис. 2.

Блок управления БУ1 по управляющим сигналам «больше», «меньше» и «движение» задает циклограммы токов фиксирующего (ФМ), запирающего (ЗМ) и тянущего (ТМ) электромагнитов. Задание режима работы УСУ (вверх, вниз, удержание, сброс) осуществляется платой связи с системой (ПСС) в соответствии с комбинацией управляющих сигналов. В каждый момент времени токи магнитов задаются задатчиками токов, расположенными на плате регуляторов токов (ПРТ). Далее заданные токи сравниваются с действительными значениями, после чего разностные сигналы поступают на регуляторы токов платы ПРТ. Сигналы с выходов регуляторов поступают на вход платы управления выпрямителями (ПУВ) и изменяют углы открытия тиристорных силового модуля (СМ) и, как следствие, токи $I_{ТМ}$, $I_{ЗМ}$, $I_{ФМ}$.

На плате выходных устройств (ПУВ) расположены импульсные трансформаторы, с которых импульсы управления поступают на управляющие электроды тиристорных.

В цепи «СМ – электромагниты» установлены датчики тока для формирования сигналов обратной связи.

Направление модернизации системы управления приводом

В настоящее время для комплекса электрооборудования СУЗ нового поколения разрабатывается блок управления БУ2 на микропроцессорной элементной базе. Микропроцессорное управление электроприводом позволит улучшить технические и эксплуатационные характеристики электропривода ОР СУЗ и КЭ СУЗ в целом.

Разработка микропроцессорной системы управления приводом проводится для:

- повышения гибкости системы управления. Это обеспечит простоту корректировки алгоритмов работы блока, а также возможность реализации перспективных алгоритмов управления и диагностики без изменения схемотехнической части блока. В качестве перспективных алгоритмов рассматривается модифицированный алгоритм управления и алгоритм определения перемещения привода по характеру изменения токов;
- повышения помехозащищенности и устойчивости работы блока;
- упрощения процесса наладки и контроля. Желательно перейти от ручного контроля к контролю в автоматизированном режиме. При контроле должна автоматически диагностироваться неисправность;
- повышения стабильности характеристик блока при воздействии дестабилизирующих факторов (температуры, влажности, старения элементов);
- улучшения возможностей по диагностике неисправностей при работе на АЭС.

Моделирование микропроцессорной системы управления приводом

На основе анализа аналогового блока управления БУ1 и привода ШЭМ-3 построена модель для моделирования в пакете MATLAB с программой SIMULINK [1].

Системы управления одинаковы для всех трех электромагнитов. Поэтому рассматриваем только систему управления тянущим электромагнитом (рис. 3).

В приведенной на рис. 3 модели имеются следующие блоки:

управляющая часть

- блоки Up и Down – формирователи заданной циклограммы «вверх» или «вниз»;
- блок Controller – подсистема, моделирующая работу разрабатываемой цифровой системы управления;
- измерители осциллограмм зазора, силы (d , F) и напряжения, тока электромагнита (U , I);
- блоки Mean 1, 2, 3 для вычисления сглаженных значений измеряемых величин;
- мультиплексоры для одновременного отображения на осциллограммах нескольких сигналов;

силовая часть

- блок 3-Phase Voltage Source – источник трехфазного напряжения;
- блок Thyristors – шестифазный тиристорный мост, из которого используются три тиристора, включенные по нулевой схеме (см. рис.1);
- блок ТМ – подсистема, моделирующая работу тянущего электромагнита привода ШЭМ-3;
- блоки node 0 – нулевая точка силовой схемы.

Блоки ТМ и Controller и 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.

Построение моделей указанных подсистем являются отдельными задачами. Модель тянущего электромагнита привода ранее рассматривалась в [2], а в данной статье рассматривается моделирование системы управления приводом и разработка алгоритмов управления.

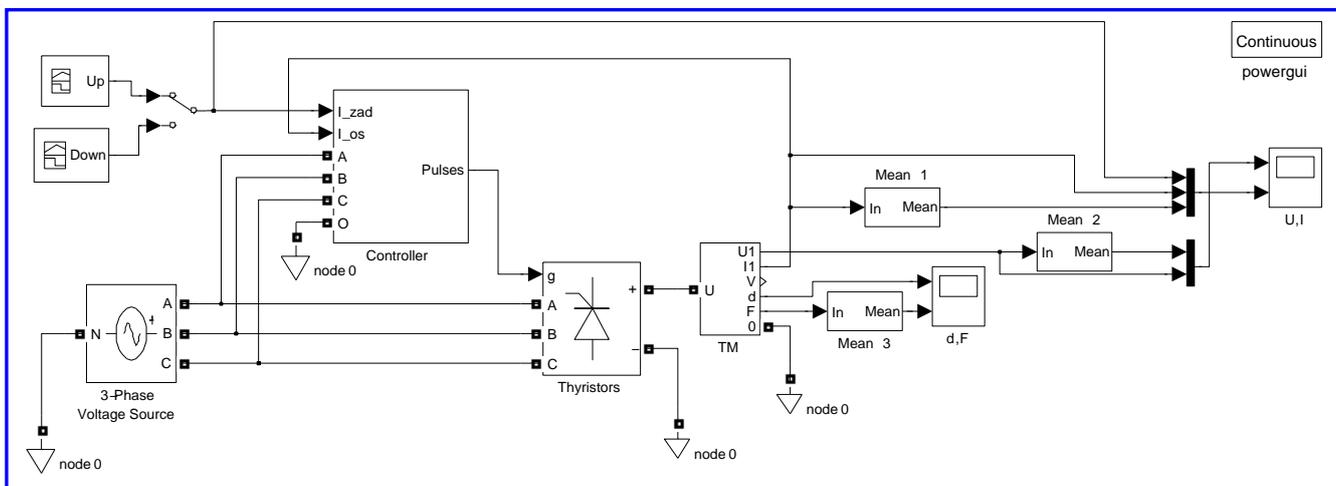


Рис. 3. Модель системы управления тянущим электромагнитом

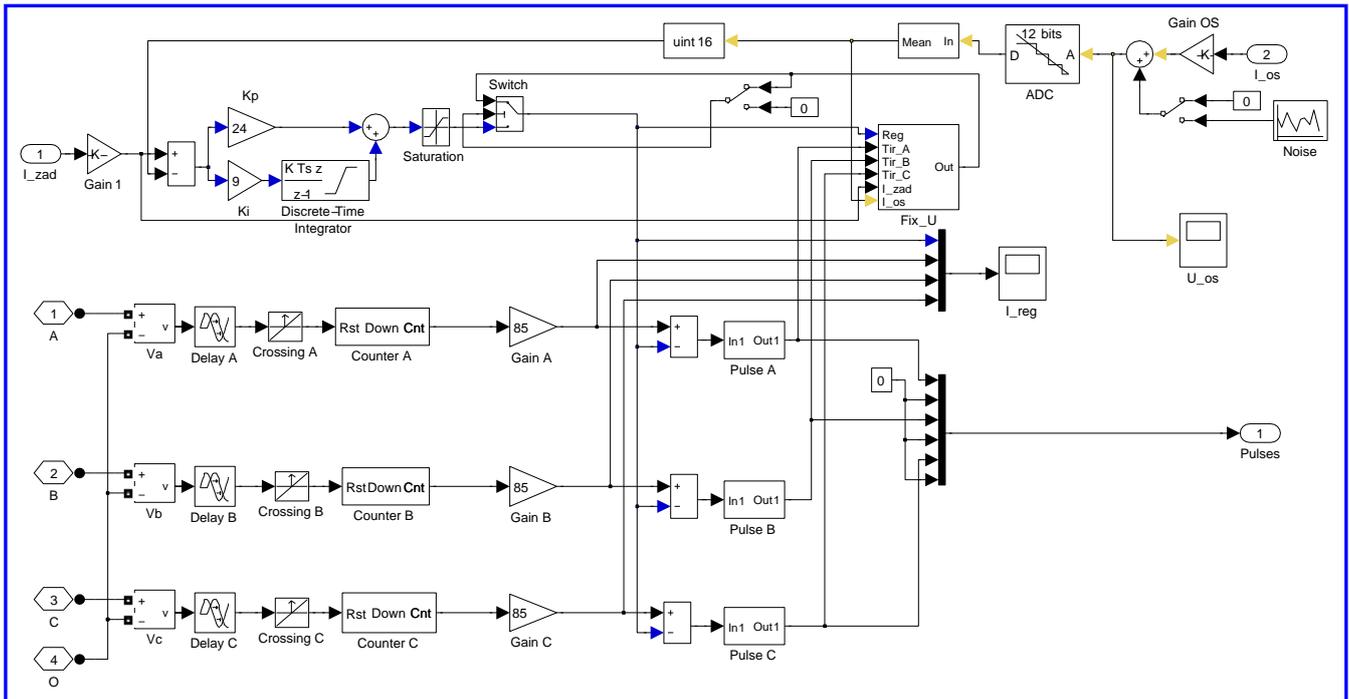


Рис. 4. Подсистема, моделирующая работу управляющего контроллера

Для моделирования управляющей части (блок Controller) на основе анализа аналогового блока БУ1 была построена модель, реализующая алгоритм проектируемого цифрового блока управления. В дальнейшем алгоритм управления отлаживался и корректировался с использованием полученных моделей в программе Matlab, после чего был реализован в цифровом блоке БУ2 шкафа ШСУ2К-В и опробован на опытном стенде в НПП ВНИИЭМ, а также в ОКБ «Гидропресс».

Подсистема Controller, моделирующая работу управляющего контроллера блока БУ2, приведена на рис. 4, в которой имеются следующие блоки:

входные и выходные сигналы

- порты I_zad, I_os, A, B, C, 0 – входные сигналы подсистемы;
- порт Pulses – векторный сигнал $[6 \times 1]$, состоящий из импульсов управления мостовым тиристорным выпрямителем;

блоки импульсно-фазового управления

- Va, Vb, Vc – измерители напряжения входных синхросигналов фаз;
- Delay A, Delay B, Delay C – задержка синхросигнала на $\pi/6$;
- Crossing A, Crossing B, Crossing C – нуль-орган для определения момента перехода фазы через ноль;
- Counter A, Counter B, Counter C – счетчики задержки выходного импульса относительно синхросигнала;

- Gain A, Gain B, Gain C – усилители, необходимые для приведения уровней счетчиков в соответствие с уровнем цифрового регулятора;
- Pulse A, Pulse B, Pulse C – блоки, выдающие импульс открытия соответствующего тиристора в момент равенства счетчика задержки и выхода регулятора;

блоки в цепи обратной связи по току

- Gain OS – коэффициент обратной связи для сопряжения сигнала датчика тока с входом АЦП микроконтроллера. Току 10 А соответствует напряжение 1В на входе АЦП;
- Noise – источник шума для моделирования помех в цепи обратной связи;

- ADC – блок, моделирующий АЦП микроконтроллера с заданной дискретностью по времени и по уровню;
- Mean – небольшое усреднение измеренных значений за время 3,3 мс. Играет роль фильтра со скользящим средним значением;
- Uint16 – преобразование в целочисленный формат. Оно необходимо, так как все блоки, моделирующие работу микроконтроллера, должны обрабатывать сигналы в соответствии с заданным представлением чисел и с заданной дискретностью по времени;

блоки цифрового регулятора

- блок Gain1 для приведения сигнала задания в соответствие со сигналом обратной связи;
- блоки Ki и Kp – интегрирующий и пропорциональный сигналы цифрового регулятора. ПИ-регулятор разделен на две ветви для того, чтобы добиться его корректного насыщения;

- Discrete-time integrator цифровой интегратор с верхним и нижним пределами насыщения;
- Saturation – блок для ограничения выхода регулятора;

блоки для моделирования нового алгоритма управления

- Switch – блок для переключения между выходным сигналом регулятора и зафиксированным блоком Fix_U значением;
- Fix_U – блок для моделирования специально разработанного нового алгоритма управления приводом. Его функция состоит в том, чтобы зафиксировать значение регулятора при завершении переходного процесса тока.

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

Полученные при моделировании графики напряжения, тока, величины зазора, скорости и силы

приведены на рис. 5. Данные графики получены при традиционном алгоритме управления, с поддержанием заданного выходного тока электромагнита в процессе перемещения плунжера.

Из графиков рис. 5 можно сделать следующий вывод: при изменении зазора (и индуктивности) в процессе движения регулятор для поддержания заданного тока увеличивает постоянную составляющую напряжения. Это явление может быть использовано при разработке нового алгоритма управления приводом, целью которого является снижение ударов подвижного полюса о неподвижный в конце перемещения.

Проведенное моделирование позволило разработать алгоритмы работы основного микроконтроллера блока управления приводом. Разработанные алгоритмы реализованы в блоке БУ2 шкафа ШСУ2К-В на втором энергоблоке Ростовской АЭС. Силовая часть блока БУ2 выполнена аналогично блоку БУ1 (см. рис. 1), т. е. блок БУ2 может устанавливаться на место блока БУ1 в существующих шкафах ШСУ2. Управляющая часть реализована в модуле МУ1, который выполнен на микропроцессорных средствах.

Экспериментальная токовая циклограмма, полученная на стенде ОКБ «Гидропресс» с применением традиционного алгоритма приведена на рис. 6.

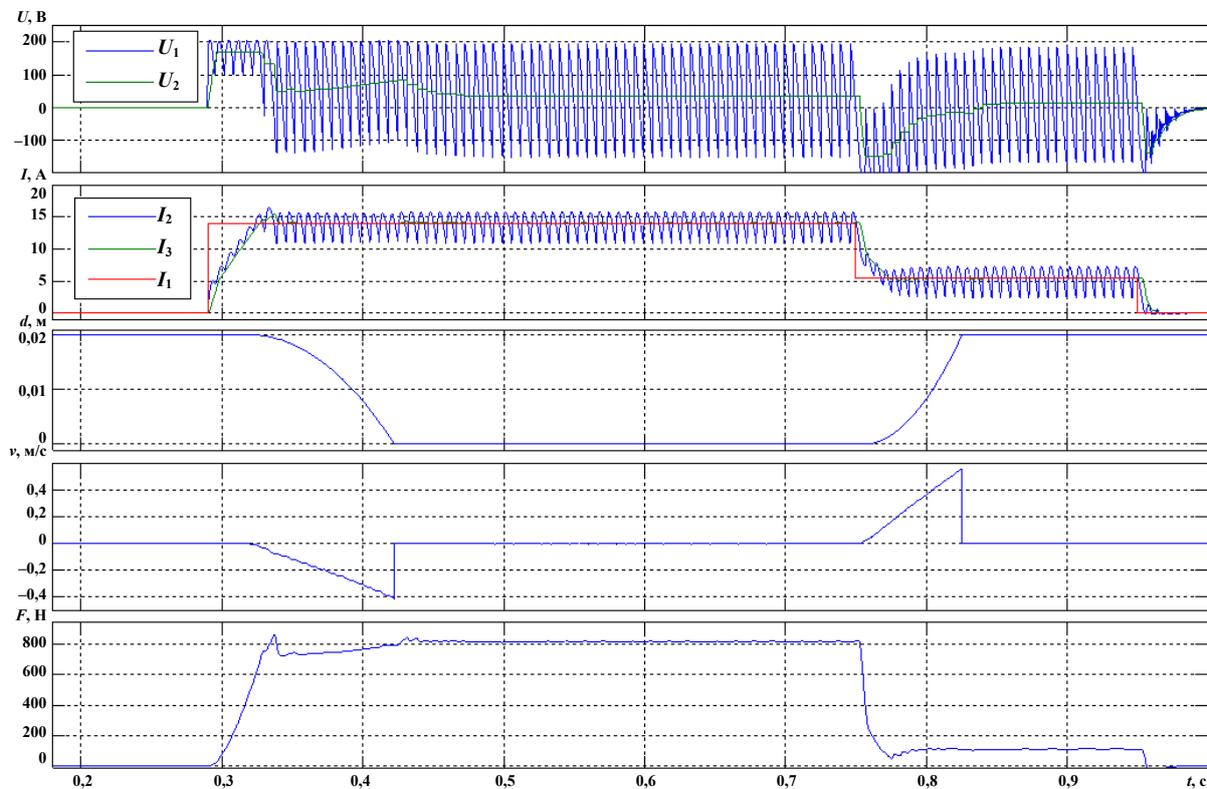


Рис. 5. Графики напряжения U_1 , его постоянной составляющей U_2 , тока I_2 , его постоянной составляющей I_3 , задающего сигнала I_1 , величины зазора d , скорости v и силы F

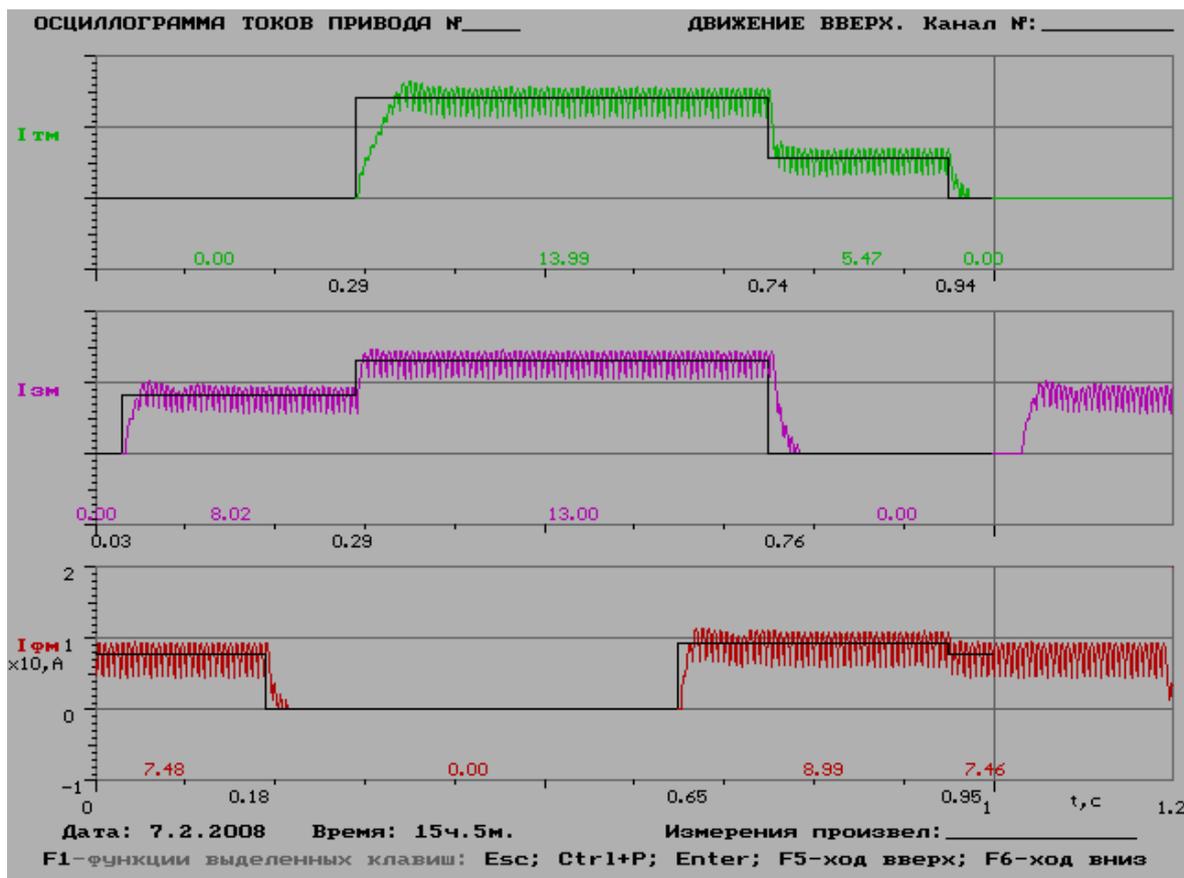


Рис. 6. Циклограмма токов тянущего, запирающего и фиксирующего электромагнитов привода при движении вверх

Переходные процессы токов электромагнитов удовлетворяют требованиям, предъявляемым разработчиком привода к системе управления приводом.

Проведены следующие виды испытаний разработанной системы управления:

- испытания на электромагнитную совместимость;
- испытания на сейсмостойкость;
- испытания на функционирование на опытном стенде НПП ВНИИЭМ;
- испытания с реальными приводами (33 шт.) на стенде ОКБ «Гидропресс»;
- предкомплексные испытания в составе КЭ СУЗ на 2-м энергоблоке Ростовской АЭС.

Выводы

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

1. Построены модели в программе Simulink, достаточно точные для решения задачи разработки пер-

спективной цифровой системы управления. Применение моделирования позволило определить характеристики системы управления на стадии разработки системы управления и оптимизировать алгоритмы управления.

2. Найдена возможность для разработки нового алгоритма управления, цель которого – снижение ударов при перемещении привода.

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

Литература

1. Черных И.В. Моделирование электротехнических устройств в MATLAB, SimPowerSystems и Simulink / И.В. Черных. – 2007. – 288 с.
2. Шукин К.Ю. Математическое моделирование процессов, протекающих при перемещении шагового привода // Вопросы электромеханики. Труды ВНИИЭМ. – М.: ФГУП «НПП ВНИИЭМ», 2007. – Т. 104 – С. 70 – 87.

Поступила в редакцию 29.12.2009

Константин Юрьевич Шукин, начальник лаборатории, т. 623-21-50, e-mail: SchukinKY@npp.vniiem.ru.