

На правах рукописи



СМИРНОВ Максим Александрович

**РАЗРАБОТКА МУЛЬТИПРОЦЕССНОЙ СИСТЕМЫ АДАПТИВНОГО
УПРАВЛЕНИЯ ЭЛЕКТРИЧЕСКИМИ ПЕЧАМИ СОПРОТИВЛЕНИЯ**

Специальность 05.13.06 – «Автоматизация и управление
технологическими процессами и производствами»

АВТОРЕФЕРАТ

диссертации на соискание ученой степени
кандидата технических наук

Иваново 2012

Работа выполнена на кафедре Автоматики и микропроцессорной техники ФГБОУ ВПО «Костромского государственного технологического университета».

Научный руководитель

доктор технических наук, профессор **Староверов Борис Александрович**

Официальные оппоненты:

доктор технических наук, профессор **Тверской Юрий Семенович**
кандидат технических наук, доцент **Мишулин Юрий Евгеньевич**

Ведущая организация

ЗАО НПО «Системотехника», г. Иваново

Защита диссертации состоится «16» марта 2012 года, в 14 часов, на заседании диссертационного совета Д 212.064.02 при ФГБОУ ВПО «Ивановский государственный энергетический университет имени В.И. Ленина» по адресу: 153003, г. Иваново, ул. Рабфаковская, 34, аудитория Б-237.

С диссертацией можно ознакомиться в библиотеке Ивановского государственного энергетического университета.

Автореферат разослан « 7 » февраля 2012 г.

Ученый секретарь
диссертационного совета



Тютиков В.В.

ОБЩАЯ ХАРАКТЕРИСТИКА РАБОТЫ

Актуальность работы. Уровень развития микропроцессорной техники на сегодняшний день позволяет реализовывать в полной мере положения классической и современной теории автоматического управления, тем самым решать задачи автоматизации сложных технологических процессов и производств, добиваться высоких показателей качества систем автоматического управления.

Замена аналоговых регуляторов универсальными микроконтроллерами (МК), способными программно перестраиваться на реализацию различных по сложности законов регулирования, записанных в их память, обеспечивает повышение точности, надежности, гибкости, производительности и снижение стоимости систем управления. Большим достоинством МК является поддержка дополнительных системных функций: автоматизация процесса настройки, автоматическое обнаружение ошибок, контроль предельных значений параметров, оперативное отображение состояния систем и т. п.

В то же время, несмотря на растущие требования к показателям качества технологических процессов и стремительное развитие микропроцессорной техники, современные достижения теории автоматического управления практически не находят своего применения в реальном производстве. Порядка 90-95% регуляторов, находящихся в настоящее время в эксплуатации, используют пропорционально-интегрально-дифференциальный (ПИД) алгоритм работы. Причинами столь высокой популярности являются простота построения и промышленного использования, ясность функционирования, пригодность для решения большинства практических задач и низкая стоимость.

Однако, в условиях удорожания ресурсов, энергии и растущих требований к качеству продукции при наличии дрейфа параметров объекта управления (ОУ), а также действию внешних и параметрических возмущений, типовые ПИД-регуляторы не обеспечивают необходимые статические и динамические показатели. В частности, данные проблемы возникают при создании систем автоматического управления электрическими печами сопротивления, применяемыми во многих технологических процессах, например, при производстве сварочных электродов.

Многочисленные публикации по нечетким, нейросетевым, генетическим адаптивным регуляторам свидетельствуют также о попытках повысить качество выпускаемой продукции за счет неклассического подхода. Как правило, данные системы управления «привязаны» к конкретной технологической установке, требуют знаний эксперта, больших трудозатрат на отладку и внедрение, поэтому не нашли пока серийного применения. Наиболее перспективным является использование регуляторов состояния, но они требуют знания точных моделей объектов управления.

В этом отношении явным прогрессом при реализации типовых регуляторов в цифровом исполнении по сравнению с аналоговым является введение функций автонастроек. Эти процедуры повышают эксплуатационные качества микропроцессорных систем управления и снижают требования к квалификации

специалистов, обслуживающих технологические установки. Поэтому многие разработчики промышленных контроллеров снабжают свою продукцию фирменными алгоритмами автонастройки. Однако, как показала практика, использование таких процедур в подавляющем большинстве случаев малоэффективно: операции автоматического вычисления коэффициентов регулятора продолжительны по времени, а вводимые тестовые воздействия могут нарушать условия протекания технологического процесса; автонастройка осуществляется только при работе «в малом» и требует, как правило, уточнения параметров и контроля со стороны оператора.

Таким образом, отсутствие универсальных и эффективных алгоритмов и программных средств самонастройки, которые отслеживали бы в реальном времени изменение параметров объекта управления, что позволило бы в свою очередь использовать более совершенные законы управления, говорит об актуальности решения задачи разработки таких адаптивных систем управления.

Цель и задачи исследований. Целью диссертационной работы является разработка адаптивной системы управления промышленного назначения для электрических печей сопротивления.

В соответствии с указанной целью в работе поставлены следующие задачи:

1. Провести анализ существующих алгоритмов адаптивного управления и способов их реализации на серийно выпускаемых микропроцессорных регуляторах и промышленных компьютерах.
2. Обосновать необходимость использования адаптивной самонастраивающейся системы управления электрическими печами для многорежимных технологических процессов.
3. Разработать систему адаптивного управления на основе использования промышленного компьютера или программируемого логического контроллера.
4. Дать рекомендации по практическому использованию результатов работы и апробировать технические решения в реальном производстве.

Методы исследований. При решении поставленных задач в работе использовались элементы теории адаптивного управления, методы теории пространства состояний и модального управления, аппарат передаточных функций и структурных схем, методы процедурного программирования.

Исследование синтезированной цифровой системы выполнялось с помощью имитационного моделирования и натуральных экспериментов на лабораторном и опытно-производственном оборудовании.

Научная новизна работы состоит в следующих положениях:

1. Для промышленных электрических печей сопротивления со сложным технологическим циклом обосновано применение адаптивной системы управления, включающей в себя блоки параметрической идентификации, параметрической адаптации и динамического регулятора состояния.
2. Разработаны параметрические идентификаторы однократного, по начальному участку переходной характеристики, и многократного, на

основе метода наименьших квадратов, принципов действия, предназначенные в зависимости от сложности технологического цикла решать задачи адаптации первого и второго уровней.

3. Предложены мультипроцессная организация адаптивной системы и способы межпроцессного взаимодействия, позволяющие на основе использования режимов асинхронного и синхронного обмена данными осуществлять многозадачное управление технологическими установками с применением промышленного компьютера или программируемого логического контроллера как в модельном, так и в реальном времени.

Практическая значимость работы состоит в следующем:

1. Создано программное обеспечение функциональных блоков мультипроцессного адаптивного управления.
2. Реализован расширяемый модульный комплекс адаптивного управления, функционирующий с помощью средств межпроцессного взаимодействия, который может быть реализован на основе программируемого логического контроллера или промышленного компьютера.
3. Даны рекомендации по применению мультипроцессной адаптивной системы управления электрическими печами сопротивления, которая осуществляет самонастройку параметров регулятора при смене режимов работы технологического оборудования.

Реализация работы. Разработанная мультипроцессная адаптивная система нашла применение на Судиславском заводе сварочных материалов Костромской области (ООО «СЗСМ») для управления термообработкой сварочных электродов.

Результаты работы используются также в учебном процессе на кафедре «Автоматика и микропроцессорная техника» Костромского государственного технологического университета при подготовке инженеров по автоматизации технологических процессов и производств (учебные курсы: «Теория автоматического управления», «Управляющие системы реального времени»).

Апробация результатов работы. Материалы диссертации были доложены и получили положительную оценку на международных научно-технических конференциях: «Проблемы автоматизации и управления в технических системах» (Пенза, 2009 г.), «Лен-2010» (Кострома, 2010 г.), «Состояние и перспективы развития электротехнологии» (XVI Бенардосовские чтения, Иваново, 2011 г.); пятой международной конференции-выставке «Промышленные АСУ и контроллеры 2010: от А до Я» (Москва, 2010 г.); шестой международной конференции «Автоматизированные, информационные и управляющие системы 2011: от А до Я» (Москва, 2011 г.); 61-й, 62-й, 63-й межвузовской научно-технической конференции молодых ученых и студентов КГТУ «Студенты и молодые ученые КГТУ – производству» (Кострома, КГТУ, 2009 г., 2010 г., 2011 г.), на научно-методических семинарах и заседаниях кафедры «Автоматика и микропроцессорная техника» КГТУ.

Основные положения диссертации, выносимые на защиту:

1. Функциональная схема и мультипроцессная организация адаптивного управления электрическими печами сопротивления.
2. Диаграмма деятельности и использования мультипроцессного адаптивного управления.
3. Способы организации межпроцессного взаимодействия и режимов асинхронного и синхронного обмена данными, позволяющие осуществлять моделирование и настройку замкнутой системы автоматического управления в темпе технологического процесса.
4. Алгоритмы параметрической идентификации однократного и многократного принципа действия и автоматической настройки динамических регуляторов состояния.
5. Результаты моделирования и натурных испытаний мультипроцессной адаптивной системы управления электрическими печами и рекомендации по их практическому использованию.

Публикации. По теме диссертации опубликовано 15 работ, в том числе 4 статьи в центральных научных журналах; получено свидетельство об официальной регистрации программы для ЭВМ № 2011611749 от 24 февраля 2011 г.

Объем работы. Диссертационная работа состоит из введения, четырех глав, заключения, библиографического списка, включающего 110 наименований, и приложений. Работа изложена на 130 листах машинописного текста, содержит 50 рисунков и 3 таблицы.

СОДЕРЖАНИЕ РАБОТЫ

Во введении обоснована актуальность темы диссертационной работы, сформулированы цель и задачи исследования, отмечена научная и практическая значимость, приведена апробация результатов работы.

В первой главе обоснована необходимость применения самонастраивающихся систем управления электрическими печами сопротивления, продиктованная особенностями операций электротермии и предъявляемыми высокими требованиями к качеству получаемого в результате термообработки изделия.

Сложность решения задачи высокоточного и оптимального по затратам электроэнергии и времени управления процессом термообработки связана в первую очередь с меняющимися в широких пределах (в 2-4 раза) параметрами объекта управления, которые вызваны априори неизвестными физическими свойствами обрабатываемого в печи материала, разной степенью и видом загруженности, особенностями технологического режима, состоянием оборудования и т.д.

В настоящее время для управления электропечами используют ПИД-регуляторы с ШИМ-преобразователем, который определяет величину отбираемой от нагревательного элемента мощности. Автоматическая настройка коэффициентов ПИД-регулятора осуществляется, как правило, один раз на пустой печи, поскольку данная процедура может вызвать недопустимые изменения температуры и тем самым привести к браку дорогостоящей продукции. По этой

причине качество управления тепловыми режимами загруженной печи будет уже зависеть от «новых» характеристик объекта и отличаться от оптимальных.

Многokратно изменяющиеся в процессе эксплуатации параметры электропечи создают проблемы эффективного и высокоточного управления процессом термообработки с помощью ПИД-регуляторов, которые не обладают свойствами адаптации. Применение приборов с однократной автонастройкой в процессе пуска системы тоже не решает проблему.

В связи с этим проектирование и разработка адаптивных систем управления по-прежнему востребованы и носят актуальный характер.

Во второй главе дан обзор литературы по адаптивным регуляторам, выпускаемым отечественной и зарубежной промышленностью, рассмотрены методы самонастройки, приведены примеры программных продуктов, обеспечивающих автоматическое определение коэффициентов регулятора и на этапе пуско-наладки, и в процессе функционирования технологической установки.

Анализ научных публикаций и рынка серийно выпускаемых промышленных регуляторов выявил, что большинство работ посвящено непрерывным системам управления с ПИД-регулятором; отсутствуют практические рекомендации теоретически изложенных алгоритмов адаптации; в большинстве случаев работоспособность адаптивной системы демонстрируется только с помощью численного моделирования; современным серийно выпускаемым приборам характерна длительность, низкая эффективность и однотипность процедуры автоматического определения коэффициентов настройки регулятора.

На основе проведенного аналитического обзора сформулированы основные задачи исследования.

Третья глава посвящена разработке мультипроцессной системы адаптивного управления.

Рассмотрены типовые структурные схемы и алгоритмы функционирования адаптивных систем.

На основе проведенной классификации адаптивных систем и анализа их алгоритмов работы сделан вывод о целесообразности использования для решения задачи высокоточного управления температурой в электропечи самонастраивающихся систем (СНС) с параметрическим идентификатором.

Анализ алгоритмов идентификации, алгоритмов адаптации и законов регулирования показал, что наиболее перспективным для управления температурными режимами промышленных печей сопротивления является применение в основном контуре регулятора состояния (РС), в контуре адаптации – метода стандартных коэффициентов (МСК) в качестве адаптатора и метода наименьших квадратов (МНК) в качестве идентификатора.

Преимущества МНК проявляются в быстрой сходимости оценок, в простом вычислительном алгоритме, в рекуррентной и ретроспективной работе. Метод стандартных коэффициентов обеспечивает требуемые вид переходного процесса, статическую точность и быстроедействие, возможность получения робастных решений. Синтез динамического регулятора состояния позволяет управлять объектом, описываемым уравнением высокого порядка.

Применение МНК предполагает, что исходное разностное уравнение для

k -го такта квантования имеет вид:

$$y(k) + a_1 y(k-1) + \dots + a_n y(k-n) = b_1 u(k-1) + \dots + b_n u(k-n);$$

прогнозируемый выходной сигнал:

$$\hat{y}(k) = \psi^T(k) \hat{\theta}(k-1), \quad (1)$$

где

$$\hat{\theta}^T(k-1) = [a_1, \dots, a_n, b_1, \dots, b_n]$$

– вектор оценок параметров модели,

$$\psi^T(k) = [-y(k-1), \dots, -y(k-n), u(k-1), \dots, u(k-n)]$$

– вектор экспериментальных данных.

Система $(N+1)$ уравнений вида (1) в векторно-матричной форме запишется, как:

$$y(n+N) = \psi^T(n+N) \hat{\theta}(n+N-1) \quad (2),$$

где

$$y^T(n+N) = [y(n), y(n+1), \dots, y(n+N)]$$

– вектор выхода,

$$\psi(n+N) = \begin{bmatrix} -y(n-1) & \dots & -y(0) & u(n-1) & \dots & u(0) \\ -y(n) & \dots & -y(1) & u(n) & \dots & u(1) \\ \dots & \dots & \dots & \dots & \dots & \dots \\ -y(n+N-1) & \dots & -y(N) & u(n+N-1) & \dots & u(N) \end{bmatrix}$$

– матрица данных.

Из (2) находится вектор оценок параметров объекта управления $\hat{\theta}$.

Разработана следующая методика проведения идентификации ОУ по МНК, которая состоит из следующих действий:

1. Снять переходную характеристику объекта управления.
2. Определить максимальную постоянную времени объекта T_{\max} , как интервал времени между достижением температуры уровня 0.63 и уровня 0.1 от установившегося значения.
3. Определить период квантования T_0 , как 5% от T_{\max} .
4. Подавать в течение T_{\max} на вход объекта тестовый сигнал с периодом квантования T_0 .
5. Получить три кортежа данных: время, входное воздействие и выходная величина объекта.
6. По МНК определить параметры модели объекта управления и порядок, обеспечивающие минимум СКО между переходными характеристиками ОУ и модели.
7. Провести верификацию.
8. При неудовлетворительной аппроксимации повторить пункты 4-7, увеличив время идентификации.
9. Получить результирующую передаточную функцию объекта управления в виде

$$W(z) = \frac{b_1 z^{n-1} + \dots + b_{n-1} z + b_n}{z^n + a_1 z^{n-1} + \dots + a_{n-1} z + a_n}.$$

Для установок с квазистационарным коэффициентом передачи разработан алгоритм определения параметров объекта по переходной характеристике, суть которого состоит в следующем:

1. По экспериментальной переходной характеристике (рис. 1) синтезируется импульсная передаточная функция объекта управления в виде

$$W(z) = h_1 z^{-1} + h_2 z^{-2} + h_3 z^{-3} + \dots + \frac{h_n z^{-n}}{1 - qz^{-1}},$$

согласно которой модель точно совпадает с переходной характеристикой в $n-1$ точке, а начиная с n -ой точки, заменяется экспоненциальной кривой.

2. Коэффициент q рассчитывается из условия, что в установившемся режиме

$$W(z) \Big|_{t \rightarrow \infty, z=1} = \theta_y \text{ или}$$

$$h_1 + h_2 + h_3 + \dots + \frac{h_n}{1-q} = \theta_y, \text{ следовательно, } q = 1 - \frac{h_n}{\theta_y - \sum_{i=1}^{n-1} h_i}.$$

3. Результирующая передаточная функция объекта управления после приведения к общему знаменателю запишется в виде

$$W(z) = \frac{b_1 z^{n-1} + \dots + b_{n-1} z + b_n}{z^n + a_1 z^{n-1}},$$

где $a_1 = -q$, $b_1 = h_1$, $b_i = h_i - qh_{i-1}$, $i = 2..n$.

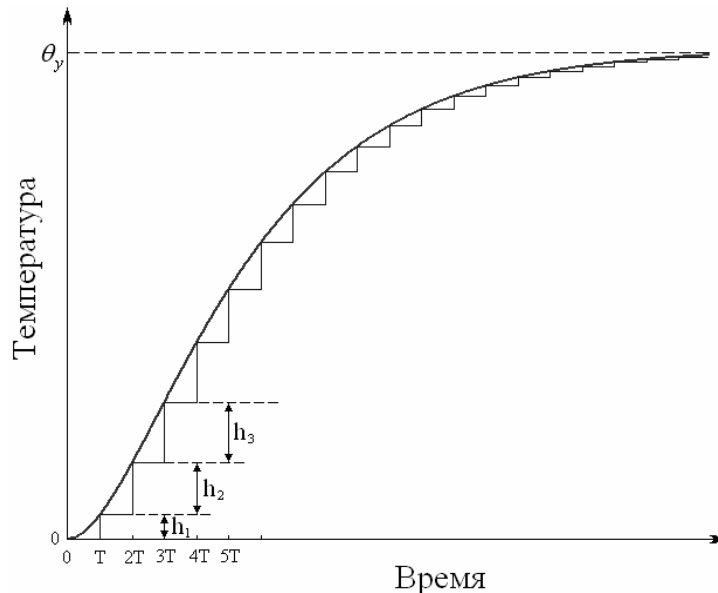


Рис. 1. Экспериментальная переходная характеристика объекта управления

Представленный подход легко алгоритмируется. Методика идентификации состоит в следующем:

1. Снять переходную характеристику объекта управления.

2. Определить максимальную постоянную времени объекта T_{\max} , как интервал времени между достижением температуры уровня 0.63 и уровня 0.1 от установившегося значения.
3. Определить период квантования T_0 , как 5% от T_{\max} .
4. Задаться порядком объекта управления $n=2$.
5. Вычислить высоту ступенек h_1, h_2, \dots, h_n для n тактов.
6. Рассчитать коэффициент q .
7. Получить результирующую передаточную функцию объекта управления в виде

$$W(z) = \frac{b_1 z^{n-1} + \dots + b_{n-1} z + b_n}{z^n + a_1 z^{n-1}}$$

8. Провести верификацию.
9. При неудовлетворительной аппроксимации повторить пункты 5-8, увеличив порядок объекта.

Данный метод идентификации может быть применен для оперативного определения параметров объекта по начальному участку переходной характеристики, т.е. за время $n \cdot T_0$, при условии, что конструктивные особенности печи за время проведения технологической операции неизменны (коэффициент передачи является квазистационарной величиной).

Перечисленные процедуры идентификации (на основе МНК и по переходной характеристике) реализованы на языке Си под ОС Linux с использованием библиотеки научных расчетов GSL.

Работоспособность и эффективность процедур идентификации по МНК и по начальному участку переходной характеристики для решения задач адаптации первого и второго уровня подтверждена соответствующими экспериментами. Структурная схема экспериментальной установки представлена на рис. 2.



Рис. 2. Структурная схема САР:

1 – широтно-импульсный сигнал (ШИМ), 2 – сигнал обратной связи; АЦП – аналого-цифровой преобразователь, ШИП – широтно-импульсный преобразователь

Процедура синтеза цифрового астатического регулятора будет состоять

из следующих действий:

1. Проводится идентификация объекта управления по методу наименьших квадратов или непосредственно по переходной характеристике с целью определения порядка и коэффициентов полиномов числителя и знаменателя импульсной передаточной функции вида:

$$W(z) = \frac{b_1 z^{n-1} + \dots + b_{n-1} z + b_n}{z^n + a_1 z^{n-1} + \dots + a_{n-1} z + a_n}.$$

2. Формируются матрицы состояния объекта управления в канонической форме управляемости: $\bar{A}, \bar{B}, \bar{C}$.
3. Формируются матрицы состояния в канонической форме наблюдаемости:

$$\tilde{A} = \bar{A}^T, \tilde{B} = \bar{C}^T, \tilde{C} = \bar{B}^T.$$

4. Осуществляется проверка на наблюдаемость и управляемость.
5. Учитывается включение интегратора с помощью расширенных матриц состояния A_r, B_r, C_r .
6. Матрицы A_r и B_r приводятся к канонической форме управляемости.
7. Формируются матрицы управляемости расширенного объекта.
8. Формируется желаемый характеристический полином расширенной замкнутой системы:

$$D_{жс}^p(z) = z^{n+1} + a_{1,жс}^p z^n + a_{2,жс}^p z^{n-1} + \dots + a_{n,жс}^p z + a_{(n+1),жс}^p.$$

В частном случае, для синтеза регулятора с конечным временем установления все коэффициенты многочлена приравниваются к нулю.

9. Вычисляются коэффициенты астатического регулятора состояния.
10. Формируется желаемый характеристический полином замкнутой системы по наблюдению

$$D_{жс}^n(z) = (z^n + a_{1,жс}^n z^{n-1} + a_{2,жс}^n z^{n-2} + \dots + a_{n,жс}^n).$$

11. Вычисляется вектор настроек наблюдателя.

Таким образом, адаптивная система управления примет вид, представленный на рис. 3.

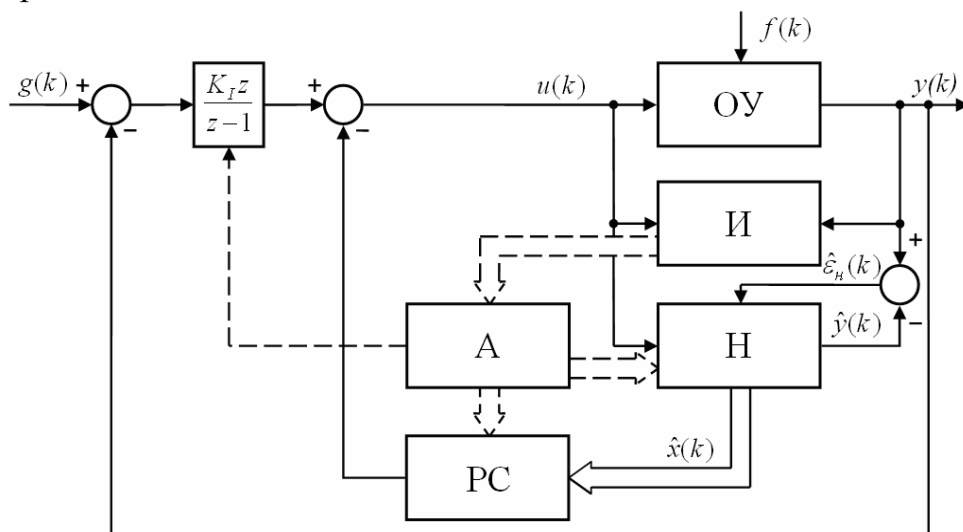


Рис. 3. Цифровая самонастраивающаяся система управления: ОУ – объект управления, И – идентификатор, А – адаптатор, Н – наблюдатель, РС – регулятор состояния

Современные системы управления – это однокристалльные микро-ЭВМ, программируемые логические контроллеры (ПЛК) или промышленные компьютеры, которые работают в режиме реального времени под управлением специализированного программного обеспечения. Для реализации адаптивной системы управления на современной аппаратной платформе необходимо иметь несколько самостоятельных программных модулей (блоков), каждый из которых будет выполнять узкоспециализированную задачу, а именно: идентификация, расчет коэффициентов регулятора в зависимости от принятого критерия качества, вычисление управляющего воздействия в соответствии с используемым законом регулирования.

Имеющиеся на сегодняшний день стандартизованные Международной Электротехнической Комиссией (МЭК) языки программирования для ПЛК (язык структурированного текста, списка инструкций, функциональных блоков, диаграмм последовательностей, релейных схем) не позволяют написать гибкую и легко масштабируемую (перестраиваемую, дополняемую) систему управления, включающую блоки идентификации, адаптации и регулирования. В то же время промышленные компьютеры и старшие модели ПЛК имеют вычислительные возможности, достаточные для установки на них полноценной многозадачной ОС, для которой можно создавать прикладные программы на универсальных языках высокого уровня.

Написание программы-«монолита», в которую в виде отдельных процедур входят соответствующие блоки для реализации упомянутых выше узкоспециализированных задач, нецелесообразно по той причине, что потребуются использование различных модулей в разных сочетаниях и в разной последовательности, а при изменении требований к системе потребуются модификация и перекомпиляция всего проекта.

Если создавать набор простых программ, реализующих какую-либо одну схему взаимодействия, то их количество будет неконтролируемо возрастать ввиду многообразия сочетаний функциональных блоков.

Вариант разработки многопоточного приложения неприемлем по той причине, что программа должна содержать в себе весь набор потенциально необходимых потоков. При изменении требований к системе управления придется добавлять новый поток и усложнять логику работы программы с последующей ее перекомпиляцией.

Поэтому предлагается следующее решение: разработка небольших узкоспециализированных программ, из которых легко можно собирать целые комплексы произвольной конфигурации и теоретически неограниченной сложности (именно такой подход отвечает идеологии ОС UNIX). Взаимодействие программ осуществляется при помощи средств межпроцессного взаимодействия или механизмов синхронизации.

Практически все операционные системы поддерживают механизмы синхронизации. Проведенный анализ выявил, что наиболее перспективными для организации мультипроцессной системы адаптивного управления являются семафоры стандарта System V, разделяемая память и сигналы. Данные средства межпроцессного взаимодействия поддерживаются ОС Linux.

Ограничения семафоров System V – максимальное количество в группе и максимальное значение счетчика – являются не критичными в решаемой задаче, а особенности – наличие режима пассивного ожидания обнуления счетчика и создание за один прием группы с заданным количеством семафоров – позволяют создать простой и масштабируемый код.

В современном ядре ОС Linux большинство системных вызовов являются вытесняемыми и имеются таймеры высокого разрешения. Вследствие этого Linux начинает занимать области, ранее принадлежащие классическим ОС реального времени, таким как QNX, OS-9 и VxWorks. Поддержка спецификации POSIX данными ОС позволяет сравнительно легко переносить программы между ними.

На сегодняшний день ОС Linux широко применяется во встраиваемых системах – промышленных компьютерах (фирмы JetBox, Atmel, Techbase и др.) и программируемых логических контроллерах (фирмы WAGO, ICP DAS, ОВЕН и др.).

Для мультипроцессной адаптивной системы разработаны UML-диаграммы использования и деятельности, последняя из которых представлена на рис. 4.

На основе UML-диаграмм созданы следующие программы: «диспетчер», «регулятор состояния», «наблюдатель полного порядка», «адаптатор», «задающее устройство эталонного сигнала», «цифровая модель объекта управления», «связь с реальным объектом», «идентификаторы».

Количество требуемых семафоров наряду с периодом квантования задается «диспетчеру» через параметры командной строки. «Диспетчер» создает набор из соответствующего количества семафоров и в цикле инкрементирует счетчики семафоров в порядке возрастания их номеров. Каждый из последующих процессов при старте получает свой номер семафора и производит декремент его счетчика. Таким образом, «диспетчер» может синхронизировать работу произвольного количества процессов, давая им сработать в строго определенной последовательности.

«Цифровая модель объекта управления» и «связь с реальным объектом» являются взаимоисключающими процессами, т.е. запускаться на исполнение может только один из них. Если запускается «связь с реальным объектом», то «диспетчер» инициирует синхронный режим обмена данным между процессами с заданным периодом квантования. Если запускается «цифровая модель объекта управления», «диспетчер» инициирует асинхронный обмен, позволяя за доли секунды провести вычислительный эксперимент, который в реальном времени занимает от нескольких минут до нескольких часов. Целью вычислительного эксперимента может быть уточнение периода квантования, параметров настройки регуляторов и т.д.

Рассмотрим на примере двух процессов диаграмму деятельности (см. рис. 4) разработанной мультипрограммной системы. На диаграмме цифрами обозначено:

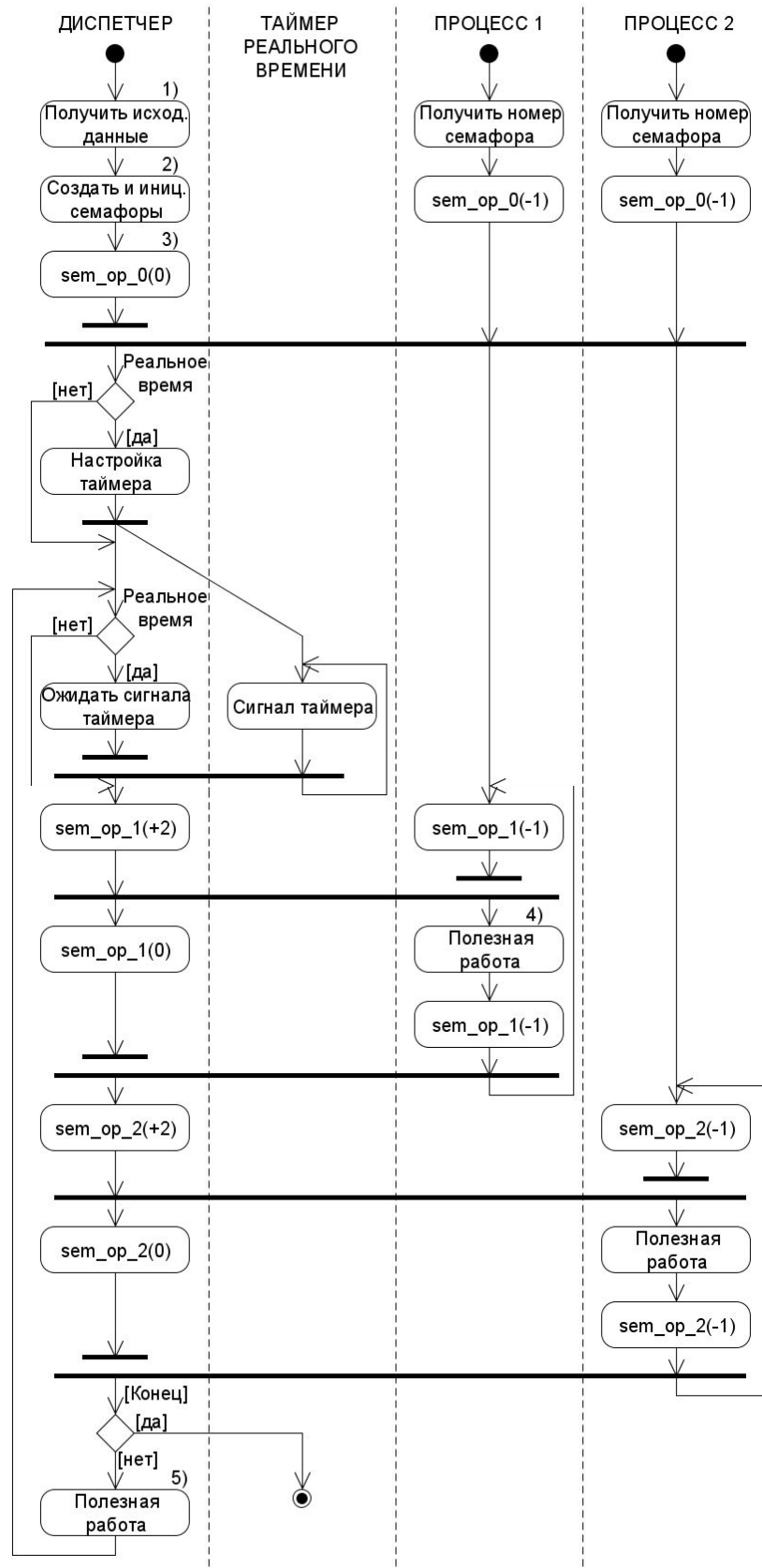


Рис. 4. Диаграмма деятельности

- 1) количество семафоров, период квантования, режим работы (синхронный или асинхронный);
- 2) нулевой семафор в группе инициализируется числом рабочих процес-

сов;

3) `sem_op` означает системный вызов для семафоров System V:

`sem_op_n(m)`,

где n – номер семафора в группе, m – операция со счетчиком семафора;

4) полезная работа зависит от вида процесса. Это может быть АЦП, ШИП, вычисление управляющего воздействия, изменение значения задания и т.д.;

5) полезная работа диспетчера – это увеличение текущего времени на величину периода квантования T_0 и запись информации в файл.

В зависимости от требований технологического процесса «идентификаторы» реализованы в трех вариантах: «пассивный идентификатор», «идентификатор однократного действия», «идентификатор многократного действия».

В том случае, когда параметры объекта известны, применяется «пассивный идентификатор». Данный процесс выполняет инициализацию указанных параметров в разделяемой памяти, а расчет коэффициентов регулятора и наблюдателя осуществляет «адаптатор».

«Идентификатор однократного действия» осуществляет идентификацию объекта управления с использованием метода наименьших квадратов или по начальному участку переходной характеристики один раз в процессе пуска, коэффициенты регулятора и наблюдателя рассчитываются в «адаптаторе» непосредственно перед работой замкнутой системы.

«Идентификатор многократного действия» работает в темпе с процессом. Идентификация в замкнутом контуре реализуется с помощью «скользящего окна» по МНК. При изменении параметров объекта коэффициенты регулятора и наблюдателя автоматически пересчитываются «адаптатором» и переопределяются в разделяемой памяти.

«Наблюдатель полного порядка» восстанавливает переменные состояния объекта управления.

В **четвертой главе** изложены результаты экспериментальных исследований разработанной мультипроцессной системы адаптивного управления на примере технологического процесса сушки сварочных электродов.

Термообработку электродов проводят с целью придания покрытию достаточной механической прочности при содержании в нем влаги в пределах, как способствующих нормальному протеканию сварочного процесса, так и позволяющих обеспечить заданный химический состав и свойства наплавленного металла и сварных соединений. Операции термообработки электродов характеризуются многоступенчатыми циклами нагрева, причем скорость нарастания уставки в зависимости от начальной влажности и обрабатываемого материала может быть разной.

Электроды обрабатываются в камерных печах с электрическим нагревом в две стадии. На первой стадии провяливания электроды сушатся в мягком режиме, на второй стадии прокалки происходит окончательная досушка. При переходе от одной стадии к другой температура в печи должна повышаться с определенной скоростью, иначе на поверхности электродов могут образоваться

повреждения в виде трещин.

При обработке температура в печи стабилизируется на определённом уровне, который зависит от марки электродов, в пределах от 80 °С до 400 °С.

Результаты работы мультипроцессной системы с идентификаторами разного принципа действия показаны на примере управления температурой печи (постоянная времени объекта управления 2000 с) на рис. 5 и 6.

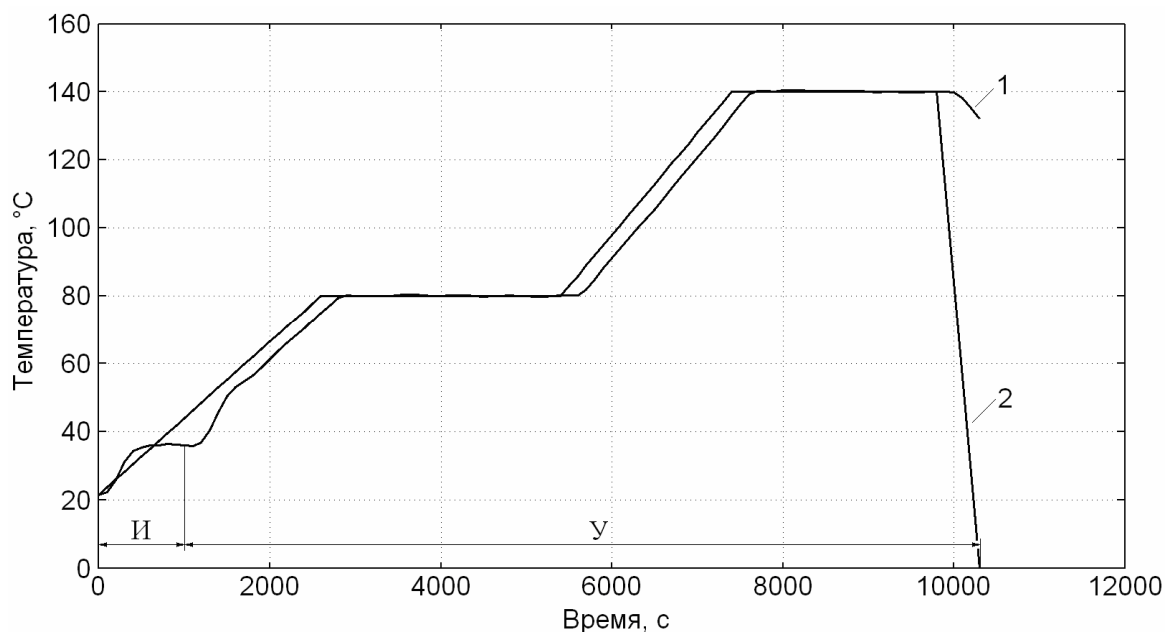


Рис. 5. Управление реальным объектом с «идентификатором однократного действия», вычисляющим параметры объекта по МНК, период квантования 100 с: 1 – текущая температура, 2 – заданная температура; И – идентификация, У – управление

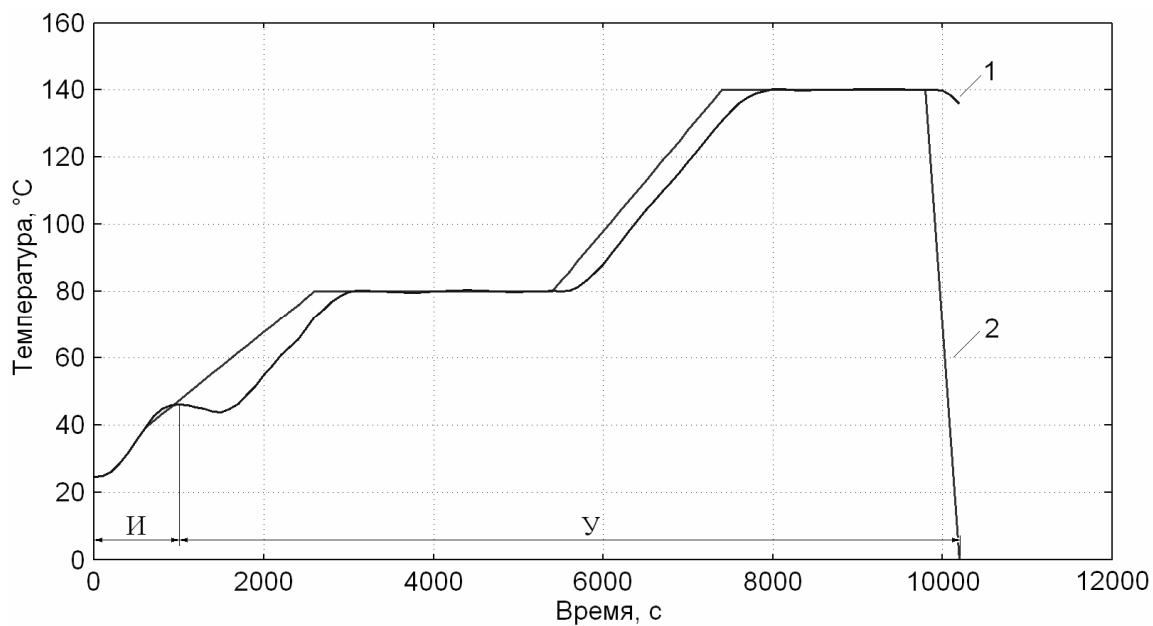


Рис. 6. Управление реальным объектом с «идентификатором однократного действия», вычисляющим параметры объекта по начальному участку переходной характеристики, период квантования 100 с: 1 – текущая температура, 2 – заданная температура; И – идентификация, У – управление

Для многофункциональной мультипроцессной системы адаптивного управления разработаны практические рекомендации, позволяющие использовать синтезированный комплекс в реальном промышленном производстве.

В приложениях приведены акты промышленного внедрения и внедрения в учебный процесс.

ОСНОВНЫЕ РЕЗУЛЬТАТЫ РАБОТЫ

1. Предложена мультипроцессная организация адаптивной системы, которая обеспечивает требуемое качество управления промышленными электропечами при изменении их параметров в широких пределах.
2. Разработано программное обеспечение функциональных блоков адаптивной системы управления, а именно идентификаторы однократного и многократного действия, наблюдатель полного порядка, регулятор состояния, цифровая модель объекта управления, связь с реальным объектом, задающее устройство и диспетчер.
3. Разработаны диаграммы использования и деятельности, описывающие принцип работы мультипроцессной системы управления и взаимодействие программных модулей.
4. Реализованы механизмы межпроцессного взаимодействия, позволяющие осуществить мультизадачное управление с применением промышленного компьютера или программируемого логического контроллера как в модельном, так и в реальном времени.
5. На основе средств межпроцессного взаимодействия реализована расширяемая модульная система адаптивного управления.
6. Предложены алгоритмы параметрической идентификации, позволяющие решать задачи адаптации первого и второго уровней, в том числе, разработан способ автоматической настройки динамического регулятора состояния по начальному участку переходной характеристики объекта управления.
7. Приведены рекомендации по практическому использованию мультипроцессного комплекса цифрового адаптивного управления.

ОСНОВНЫЕ РЕЗУЛЬТАТЫ ДИССЕРТАЦИИ ОПУБЛИКОВАНЫ

в изданиях, рекомендованных ВАК РФ:

1. Смирнов М.А. Дискретные алгоритмы идентификации для систем управления на основе микропроцессорных контроллеров / В.В. Олоничев, Б.А. Староверов, М.А. Смирнов // Приборы и системы. Управление, контроль, диагностика. – 2010. – № 6. – С. 27-31.
2. Смирнов М.А. Расширяемая модульная компьютерная система управления на основе средств межпроцессного взаимодействия UNIX / Б.А. Староверов, В.В. Олоничев, М.А. Смирнов // Вестник ИГЭУ. – 2010. – № 4. – С. 110-113.

3. Смирнов М.А. Самонастраивающаяся система управления с цифровым астатическим регулятором состояния / Б.А. Староверов, В.В. Олоничев, М.А. Смирнов // Промышленные АСУ и контроллеры. – 2011. – № 6. – С. 43-47.
4. Смирнов М.А. Цифровой адаптивный регулятор для промышленного контроллера с многозадачной POSIX-совместимой операционной системой / Б.А. Староверов, В.В. Олоничев, М.А. Смирнов // Вестник ИГЭУ. – 2011. – №3. – С. 37-39.

в прочих изданиях:

5. Смирнов М.А. Мультипроцессный комплекс цифрового управления технологическими установками / В.В. Олоничев, М.А. Смирнов, Б.А. Староверов // Свидетельство о государственной регистрации программы для ЭВМ № 2011611749. Зарегистрировано в Реестре программ для ЭВМ 24 февраля 2011 г.
6. Смирнов М.А. Проблемы классификации микропроцессорных регуляторов технологических параметров / М.А. Смирнов // Научные труды молодых ученых КГТУ. – Кострома: КГТУ. – 2009. – Вып. 10. – Ч. 1. – С. 82-86.
7. Смирнов М.А. Наиболее перспективные алгоритмы управления, применяемые в современных микропроцессорных регуляторах / М.А. Смирнов // Материалы 61-й межвузовской научно-технической конференции молодых ученых и студентов «Студенты и молодые ученые КГТУ – производству» – Кострома: КГТУ. – 2009. – Т.2. – С. 136-137.
8. Смирнов М.А. Микропроцессорная система управления печами термообработки сварочных электродов / В.В. Олоничев, Б.А. Староверов, М.А. Смирнов // Труды международной научно-технической конференции «Проблемы автоматизации и управления в технических системах» (г. Пенза, 20-23 октября 2009 г.). – Пенза: ПГУ. – 2009. – С. 225-228.
9. Смирнов М.А. Аналитический обзор алгоритмов самонастроек микропроцессорных регуляторов / М.А. Смирнов // Вестник КГТУ. – 2010. – № 23. – С. 77-80.
10. Смирнов М.А. Особенности применения адаптивных микропроцессорных регуляторов для управления технологическими процессами / М.А. Смирнов // Материалы 62-й межвузовской научно-технической конференции молодых ученых и студентов «Студенты и молодые ученые КГТУ – производству» – Кострома: КГТУ. – 2010. – Т.2. – С. 79-80.
11. Смирнов М.А. Алгоритм прямой цифровой самонастройки микропроцессорного регулятора для апериодических объектов / М.А. Смирнов // Научные труды молодых ученых КГТУ. – Кострома: КГТУ. – 2011. – Вып. 12. – Ч. 1. – С. 54-59.
12. Смирнов М.А. Повышение качества электродной продукции за счет самонастраивающихся систем управления / М.А. Смирнов // Тезисы докладов международной научно-технической конференции «Состояние и перспективы развития электротехнологии» (XVI Бенардосовские чтения). – Иваново: ИГЭУ. – 2011. – Т.3. – С. 260-261.

13. Смирнов М.А. Цифровая самонастраивающаяся система управления процессом сушки / М.А. Смирнов // Материалы 63-й межвузовской научно-технической конференции молодых ученых и студентов «Студенты и молодые ученые КГТУ – производству» – Кострома: КГТУ. – 2011. – Т.2. – С. 104-105.
14. Смирнов М.А. Алгоритмы управления технологическими установками на ПЛК. Особенности и перспективы / Е.С. Морозов, М.А. Смирнов // Материалы 63-й межвузовской научно-технической конференции молодых ученых и студентов «Студенты и молодые ученые КГТУ – производству» – Кострома: КГТУ. – 2011. – Т.2. – С. 106.
15. Смирнов М.А. Алгоритм цифрового управления электрической печью методом пространства состояний / М.А. Смирнов, Б.А. Староверов, В.В. Олоничев // Вестник КГТУ. – 2011. – № 26. – С. 62-65.

СМИРНОВ Максим Александрович

**РАЗРАБОТКА МУЛЬТИПРОЦЕССНОЙ СИСТЕМЫ
АДАПТИВНОГО УПРАВЛЕНИЯ ЭЛЕКТРИЧЕСКИМИ ПЕЧАМИ
СОПРОТИВЛЕНИЯ**

АВТОРЕФЕРАТ
диссертации на соискание ученой степени
кандидата технических наук

Подписано в печать 2.02.2012. Печ. л. 1,25. Заказ 43. Тираж 100.
РИО КГТУ, Кострома, ул. Дзержинского, 17