

Системный анализ, управление и автоматизация

УДК 004.896:004.416.6

ВНЕДРЕНИЕ КОМПЛЕКСНОЙ СИСТЕМЫ АВТОМАТИЗИРОВАННОГО ПРОЕКТИРОВАНИЯ В ПРОЕКТНОМ ИНСТИТУТЕ

И.В. Артюшкин

ОАО «Гипровостокнефть»
Россия, 443041, г. Самара, ул. Красноармейская, 93

E-mail: ilya.arty@gmail.com

Приведен пример создания и использования комплексной системы автоматизированного проектирования (САПР) в отделе автоматизированных систем управления технологическими процессами (АСУТП) ОАО «Гипровостокнефть». Приведен порядок выполнения проекта традиционными способами, без использования комплексной САПР. Определены критерии выбора САПР для автоматизации работы проектного отдела. Составлен набор программ для максимальной автоматизации выполнения типовых операций. Разработан алгоритм проектирования с помощью САПР. Показаны методы налаживания межпрограммного взаимодействия, а также адаптации существующих программных продуктов под организационную структуру отдела АСУТП. При составлении набора программ приоритет был отдан САПР отечественного производства, что актуально в условиях импортозамещения.

Ключевые слова: система автоматизированного проектирования, САПР, АСУТП, автоматизация проектирования.

Проектирование автоматизированных систем управления технологическими процессами (АСУТП) является достаточно трудоемкой задачей. Сложность проектируемой АСУТП определяется прежде всего количеством и многообразием входящих в состав системы элементов и их взаимосвязей. Кроме этого, процесс проектирования усложняется его итерационностью, обусловленной участием специалистов из различных отделов. Значительная часть от общего времени проектирования тратится на постоянное внесение изменений и оформление выходной проектной документации в соответствии со стандартами проекта, которые постоянно меняются под влиянием нормативных актов и желаний заказчика.

Как правило, проектирование АСУТП с использованием традиционных средств и технологий требует значительных трудозатрат, при этом велика вероятность возникновения несистемных ошибок, что, в свою очередь, влияет на эффективность процесса проектирования и на качество проекта в целом. Устранить указанные недостатки позволяет применение систем автоматизированного проектирования (САПР).

В настоящий момент в институте «Гипровостокнефть» для обеспечения со-

временного уровня автоматизации и соответствия государственным и корпоративным стандартам происходит планомерное развитие комплексной системы автоматизированного проектирования – КСАПР.

Состав программ

Основной графической платформой, используемой во всех проектных отделах института, является AutoCAD. Помимо этого, в настоящий момент в отделе АСУТП применяются следующие системы автоматизированного проектирования:

- AutomatiCS 2011. Система предназначена для автоматизации проектирования систем контроля и управления (СКУ, КИПиА, АСУТП), сложных электротехнических систем, и основана на применении агрегативно-декомпозиционной технологии проектирования (АДТ-технологии), которая поддерживает все этапы проектирования: от получения задания на разработку технического обеспечения АСУТП до создания проектного решения и формирования выходной проектной документации.

Система AutomatiCS предусматривает использование технологий проектирования структурно сложных электротехнических систем и поддерживает все этапы проектирования – от получения задания на разработку технического обеспечения АСУТП до создания проектного решения и формирования комплекта выходной проектной документации [1].

Преимуществом AutomatiCS является возможность создания единой модели проекта – виртуальной модели проектируемой системы, представляющей собой множество взаимосвязанных элементов (технических средств), электрических и прочих связей, и содержащей всю необходимую информацию для последующего отображения в проектных документах.

- Model Studio CS «Кабельное хозяйство». Программный комплекс предназначен для трехмерной компоновки любых кабельных конструкций, прокладки кабелей на открытой местности в соответствии с требованиями ПУЭ-7 и формирования выходной документации. Раскладка кабеля осуществляется с учетом геометрии и радиуса изгиба кабеля.

База данных Model Studio CS «Кабельное хозяйство» содержит оборудование, применяемое при формировании трехмерной модели кабельной раскладки. Как и в САПР AutomatiCS, в «Кабельном хозяйстве» имеются инструменты для внесения новой информации в базу данных.

Исходными данными для начала трассировки кабелей являются план расположения оборудования и информация о кабелях (частично заполненный кабельный журнал). В настоящее время в институте прорабатывается технология интеграции САПР AutomatiCS с Model Studio CS «Кабельное хозяйство».

- Model Studio CS «Компоновщик щитов». Программный комплекс предназначен для автоматизации размещения внутрищитового и внутришкафного оборудования, автоматического формирования чертежей и спецификаций на основе созданной трехмерной модели.

Пользователи системы

В отделе АСУТП существует несколько групп проектировщиков, между которыми разделены некоторые задачи проектирования АСУТП.

Группа контрольно-измерительных приборов и автоматики (КИПиА) занимается размещением приборов контроля и управления по технологическим ли-

ниям проектируемого объекта, созданием функциональной схемы и опросных листов на оборудование.

Группа электроавтоматики (ЭА) занимается проектированием линий передачи информационных и управляющих сигналов, средств защиты измерительных линий от помех, прокладкой сигнальных кабелей. Среди выпускаемых документов – кабельный журнал, схемы внешних электрических проводок.

Группа автоматизированных систем управления (АСУ) занимается описанием логики управления. Данная группа разрабатывает алгоритм управления, на основе функциональной схемы составляет таблицу входных-выходных сигналов.

Группа проектно-аналитической разработки и системной интеграции (ПАРСИ) выполняет разработку шкафов автоматизации, программирование логических контроллеров, создание SCADA-систем автоматизированных рабочих мест (АРМ) оператора. По разработанным программам группа производит описание логики управления и разработку инструкций по работе.

Схема сквозного проектирования объектов АСУТП

Выполнение проекта на стадии разработки рабочей документации (РД) показано в табл. 1.

Таблица 1

Этапы проектирования АСУТП

Этап	Содержание этапа	Ответственное лицо (отдел)
1	Создание структуры реестра проектных работ – объекты-марки.	Главный инженер проекта (служба главных инженеров проектов)
2	Формирование перечня работ в реестре по конкретному объекту-марке. Назначение исполнителей на каждую работу. Оценка трудозатрат каждого из исполнителей.	Главный специалист/ руководитель группы (АСУТП)
3	Получение технического задания.	Главный специалист/ руководитель группы КИПиА (АСУТП)
4	Создание модели проекта в САПР AutomatiCS. Генерация проектной документации.	Администратор проекта (АСУТП)
5	Выдача заданий смежным отделам.	Главный специалист/ руководитель группы (АСУТП)
6	Выполнение кабельной раскладки в САПР Model Studio «Кабельное хозяйство». Генерация проектной документации.	Проектировщик группы ЭА (АСУТП)
7	Разработка схем соединений шкафов в САПР Model Studio «Компоновщик щитов». Генерация проектной документации.	Проектировщик группы ПАРСИ (АСУТП)
8	Прикрепление полученной документации к реестру проектных работ.	Проектировщик (АСУТП)
9	Внутренняя проверка проекта.	Главный специалист (АСУТП)
10	Выдача заданий сметчикам.	Главный специалист/ руководитель группы (АСУТП)
11	Нормоконтроль.	Проверяющий (отдел выпуска документации)
12	Печать проектной документации.	Системы печати (отдел выпуска документации)
13	Сдача документов в электронный архив.	Ответственный за ведение архива (отдел выпуска документации)

Для обмена заданиями между участниками процесса проектирования в ОАО «Гипровостокнефть» используется созданная на базе корпоративного интранет-портала автоматизированная система обмена заданиями. В системе Plant 4D, применяемой в институте для проектирования технологической части проекта в 3D, реализован механизм формирования заданий по точкам контроля в форме, предназначенной для последующего импорта данных в систему AutomatiCS. Созданный технологами в Plant 4D файл задания прикрепляется к заданию в системе «Обмен заданиями» и после прохождения проверки и согласования поступает в отдел АСУТП.

Для случаев, когда не предполагается создание трехмерной модели, специалисты отдела информационных технологий (ИТ) института разработали автоматизированные формы выдачи заданий: файл задания формируется в форме, полностью соответствующей виду задания «на бумаге», после чего с помощью специального приложения преобразуется в форму, предназначенную для импорта данных в AutomatiCS.

Основной этап процесса проектирования АСУТП выполняется в САПР AutomatiCS.

Преимущества использования САПР

При выборе САПР для выполнения проектных работ по созданию сложных автоматизированных систем управления технологическими процессами объектов нефтегазового комплекса специалистами института решалась следующая задача: выбрать такую САПР АСУТП, которая наиболее четко вписалась бы в комплексную систему автоматизации, сформированную и развивающуюся в институте в настоящий момент. До начала работы с AutomatiCS институт имел опыт использования отечественной САПР «Альфа» и зарубежной системы Intools (Intools, или SmartPlant Instrumentation, – один из модулей в составе технологии SmartPlant Enterprise производства компании Intergraph).

Основными критериями выбора являлись:

- способ хранения данных – данные должны храниться и использоваться централизованно;
- объединение базы данных и графики в одной системе;
- возможность интеграции новой системы с другими элементами КСАПР, в частности с системой трехмерного проектирования Plant 4D;
- возможность формирования с помощью САПР максимального количества документов, выпускаемых отделом АСУТП.

В рамках комплексной системы автоматизации в качестве основного элемента КСАПР институтом «Гипровостокнефть» был выбран и принят программный продукт AutomatiCS 2011 производства компании CSoft Development, поскольку он наиболее полно удовлетворяет требованиям института по отношению к САПР АСУТП и покрывает максимум работ, выполняемых при проектировании автоматизированных систем управления технологическими процессами.

Одна из основных проблем при проектировании – внесение изменений и выпуск ревизий. Благодаря САПР можно вносить изменения как в большие группы элементов, например при изменении производителя датчиков, так и в единичные конкретные элементы или даже параметры элементов, например, как при изменении типа информационного сигнала.

Процесс проектирования

Процесс проектирования в AutomatiCS включает в себя выбор из базы данных технических средств автоматизации, задание связей между элементами технических средств и генерацию выходной проектной документации.

Процесс проектирования в AutomatiCS состоит из следующих этапов:

1. Подготовительный этап (адаптация системы). Ответственные лица – администратор системы и администратор проекта.

Известно, что ни одна САПР не может быть внедрена в процесс проектирования без проведения работ по адаптации системы. Как правило, эти работы требуют значительных трудозатрат. В институте «Гипровостокнефть» в рамках подготовительного этапа были решены следующие задачи:

1) формализация опыта проектирования и наполнение базы данных и знаний. База данных и знаний (БДЗ) является центральным элементом информационной структуры AutomatiCS [2]. Она включает в себя описание конкретных технических средств автоматизации (ТСА) различных производителей;

2) создание шаблонов для выходных документов. Шаблоны табличных документов создаются в формате MS Word. Вывод информации из AutomatiCS осуществляется с помощью специальных полей (слотов). Заполнение штампа основной надписи происходит автоматически: штамп также содержит слоты, которые заполняются соответствующими значениями из свойств документа, передаваемых из AutomatiCS [3];

3) создание графических образов технических средств. Формирование графических документов – чертежей AutoCAD – осуществляется на основе фреймов. Фрейм представляет собой графический образ технического средства. Для вывода информации из AutomatiCS, как и при формировании табличных документов, используются специальные поля (слоты). Можно создавать как фреймы, представляющие собой графические образы одного элемента (например датчика), так и фреймы, содержащие в себе законченные фрагменты (например контурные схемы);

4) разработка собственных макросов и приложений. Макрос – это определенный набор команд, автоматизирующий выполнение некоторых операций. Создание макросов – важная составляющая адаптации САПР. В институте разрабатываются макросы трех типов:

- автоматизация формирования выходных документов;
- автоматизация выполнения трудоемких операций;
- облегчение работы в системе (например быстрая классификация элементов).

При подготовке системы к конкретному проекту формируется профиль проекта, в состав которого включаются все необходимые для работы макросы. Пользователи подгружают профиль на своих рабочих местах. В случаях, когда функционала AutomatiCS бывает недостаточно, дополнительно ведется разработка приложений, адаптирующих систему к требованиям института. Применение макросов и внешних приложений в процессе проектирования значительно повышает уровень автоматизации, что, в свою очередь, сокращает время проектирования.

2. Формирование и ввод технического задания. Ответственные лица: администратор проекта и проектировщик – пользователь системы.

Как уже отмечалось ранее, задание на проектирование формируется в системе «Обмен заданиями» с помощью автоматизированных форм выдачи заданий.

Форма задания соответствует виду задания «на бумаге». После этого с помощью специального приложения файл задания преобразуется в форму, предназначенную для передачи в систему AutomatiCS.

3. Выбор из базы данных (БД) технических средств автоматизации. Ответственные лица – проектировщики группы КИПиА.

Ключевым этапом построения единой модели проекта является процесс синтеза. Синтез оборудования реализуется в САПР AutomatiCS на основе выбора из базы данных вариантов, удовлетворяющих требованиям технологического задания. Выбор оборудования может осуществляться как в ручном, так и в автоматическом режиме на основе установленных правил.

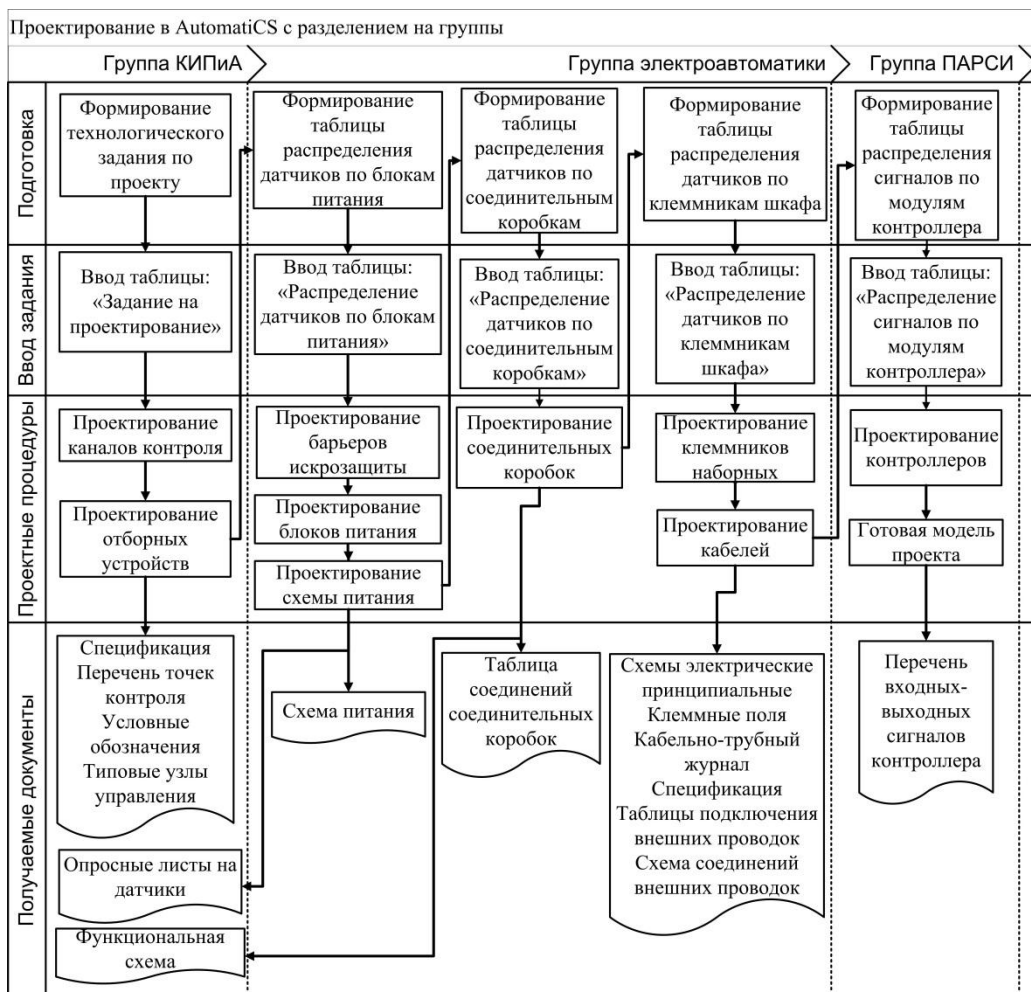


Рис. 1. Процесс проектирования в САПР AutomatiCS

4. Задание связей между отдельными элементами технических средств, выполнение процедур монтажа (построение клеммников и кабелей). Ответственные лица – проектировщики группы ЭА.

Электрические связи формируются в проекте автоматически во время синтеза при выборе параметров электрического подключения датчиков. После этого выполняются процедуры монтажа: врезка клеммников, соединительных коробок, кабелей. В системе AutomatiCS предусмотрено несколько способов выполнения

этих операций: автоматически с помощью макроса, автоматизированно на окне элементов или на окне связей, вручную с помощью встроенного графического редактора.

5. Генерация выходной проектной документации.

С помощью AutomatiCS выпускаются следующие виды проектных документов: опросные листы, спецификация КИП, схемы автоматизации функциональные, кабельные журналы, контурные схемы, схемы внешних соединений, таблицы входных/выходных сигналов и т. д.

Исходными данными для схемы автоматизации является технологическая схема. Для формирования схемы автоматизации необходимо на технологическую схему нанести условно-графические обозначения приборов. В AutomatiCS имеется возможность наносить обозначения приборов из проекта на чертеж не только последовательным способом, то есть прибор за прибором в порядке их следования в проекте, но и группой элементов, предварительно выполнив классификацию (например по измеряемому параметру).

Для формирования схемы внешних соединений достаточно разработать фреймы ограниченного числа типовых контуров в зависимости от специфики подключения прибора или исполнительного механизма. Вывод фреймов в чертеж осуществляется потоком, при этом происходит заполнение слотов информацией из модели проекта.

При формировании графических документов с помощью ГФД сохраняется связь документа с моделью проекта: в случае внесения изменений в модель проекта данные в документе обновляются автоматически.

На рис. 1 представлена детальная схема проектирования в САПР AutomatiCS.

Раскладка кабелей

После выполнения проектирования в САПР AutomatiCS на основе созданной модели выполняется формирование файла задания для Model Studio CS «Кабельное хозяйство». Файл представляет собой таблицу с перечнем элементов в строках и описанием количества контактов и связей между ними в столбцах. При вводе задания система автоматически распознает элементы и предлагает вариант из базы данных.

На полученном от технологического отдела трехмерном плане выполняется размещение выбранных элементов и кабельных конструкций. Система учитывает ключевые параметры при раскладке:

- диаметр изгиба кабеля (в зависимости от толщины);
- наличие пересечений, коллизии оборудования;
- контроль поворотов, подъемов и спусков;
- указание места провисания кабеля;
- учет допустимых расстояний между силовыми и контрольными кабелями;
- контроль спецификации в реальном времени.

После проектирования на чертеж выводится план расположения оборудования. Из трехмерной модели по каждому сечению можно получить отдельный разрез, чертеж, на котором будут отображены кабельные конструкции и кабели.

Наличие трехмерной модели кабельной раскладки обеспечивает наглядность принятых проектных решений.

Проектирование шкафов автоматизации

Формирование файла задания и выполнение процесса проектирования внутришкафного оборудования выполняются так же, как и в случае с «Кабельным хозяйством», с тем лишь отличием, что для проектирования шкафа не требуется план от технологического отдела. Компонировщик щитов имеет большую базу данных оборудования отечественных и зарубежных производителей, на основе которой и производится компоновка, напоминающая сборку конструктора.

На всех этапах система контролирует создаваемую модель, предупреждая пользователя о том, на что стоит обратить внимание. Последнее слово, тем не менее, остается за проектировщиком.

На рис. 2 представлена общая схема взаимодействия между пользователями и программами.

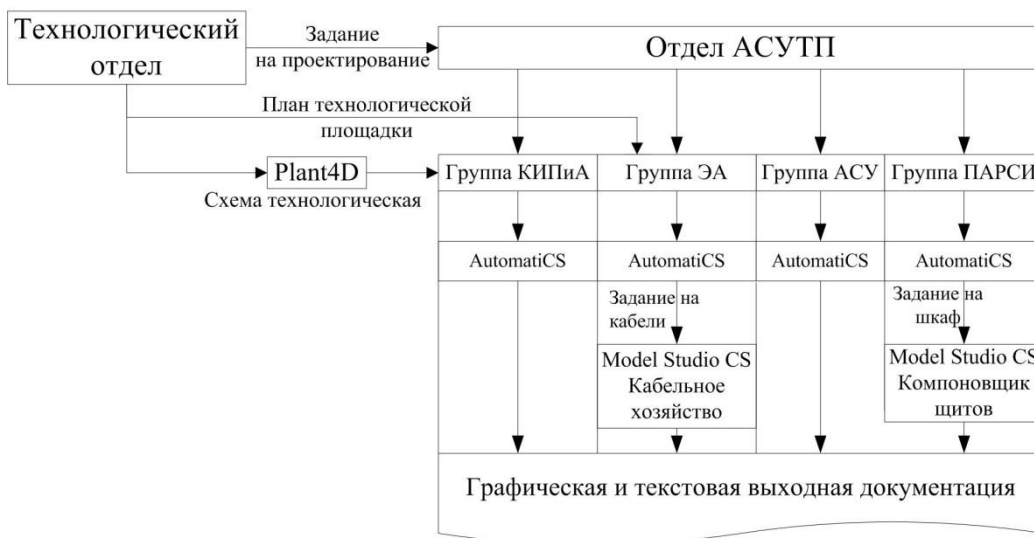


Рис. 2. Состав пользователей и программ в процессе проектирования АСУТП

Перечень документов, выпускаемых отделом АСУТП

Внедрение комплексной системы автоматизации проектных работ позволяет автоматизированным способом выпускать до 70 % разрабатываемых отделом АСУТП документов (табл. 2).

Таблица 2

Перечень выпускаемых документов

Документ	Стадия	Средства разработки
Спецификация оборудования, изделий и материалов	РД	AutomatiCS
Кабельно-трубный журнал	РД	AutomatiCS
Контурные (типовые) схемы	РД	AutomatiCS
Схемы соединений внешних проводок	РД	AutomatiCS
Схемы (таблицы) подключения внешних проводок	РД	AutomatiCS
Схемы электрические принципиальные	РД	AutomatiCS
Схемы автоматизации/схемы трубной обвязки и КИПиА	ПД, РД	AutomatiCS

Документ	Стадия	Средства разработки
Схемы структурные КТС	ПД, РД	Использование САПР невозможно
Схемы функциональной структуры	ПД, РД	Использование САПР невозможно
Условные обозначения	ПД, РД	AutomatiCS
Типовые узлы управления	ПД, РД	AutomatiCS
Установочные чертежи	РД	AutomatiCS
Планы расположения оборудования	РД	Использование САПР невозможно
Планы расположения оборудования и проводок	РД	MS «Кабельное хозяйство»
Опросные листы (приборы, блок-боксы, шкафы ПЛК и ШВО)	ПД, РД	AutomatiCS
Общий вид шкафа (ПЛК, ШВО)	РД	MS «Компоновщик шкафов»
Перечень входных сигналов и данных	ПД, РД	AutomatiCS
Перечень выходных сигналов	ПД, РД	AutomatiCS
Ведомости объемов работ	РД	AutomatiCS
Клеммные поля	РД	AutomatiCS
Блок-схема алгоритмов контроля и управления	РД	Использование САПР невозможно
Видеокадры дисплея оператора	РД	Использование САПР невозможно
Таблицы причинно-следственных связей	РД	Использование САПР невозможно
Описание системы управления	РД	Использование САПР невозможно
Пояснительная записка к проекту	ПД	Использование САПР невозможно
Техническое задание на создание автоматизированной системы	ПД	Использование САПР невозможно

Заключение

Как показывает опыт, использование систем автоматизированного проектирования позволяет решить ряд важных задач, таких как:

- исключение субъективной ошибки исполнителя при создании проекта;
- быстрое внесение изменений в проект;
- значительное уменьшение трудозатрат за счет автоматической генерации и возможности быстрой редакции выходных документов;
- повышение качества проекта.

Наиболее целесообразно применять рассмотренную технологию на типовых проектах, для которых характерны: однотипное оборудование, один заказчик, один регион, один подход к проектированию и т. д. Благодаря накоплению информации в базе данных и знаний, разработанных шаблонов документов, графических образов технических средств (фреймов) доля подготовительного этапа в общем процессе проектирования значительно сокращается, что является очень важным фактором в связи со сжатыми сроками проектирования небольших объектов.

Конечно, преимущества использования САПР неоспоримы. Однако процесс построения КСАПР, включающий в себя разные направления проектирования

(строительное, технологическое, электротехническое, АСУТП и т. д.) и поддерживающий все этапы проектирования (от разработки состава проекта до отправки готовой документации заказчику), – задача сложная. При добавлении в цепочку проектирования новых средств автоматизации необходимо анализировать их на возможность интеграции с уже используемыми САПР для обеспечения бесшовной технологии передачи данных из одной системы в другую с целью создания сквозной комплексной автоматизированной системы проектирования. Эффективное использование приобретаемых на рынке средств автоматизации невозможно без адаптации к конкретным технологиям проектирования, оформления и выпуска проектной документации в организации.

Специалисты института на собственном опыте убедились в том, что только при тесном сотрудничестве специалистов отделов АСУТП и ИТ, а также разработчиков САПР можно рассчитывать на успешное внедрение системы.

БИБЛИОГРАФИЧЕСКИЙ СПИСОК

1. *Целищев Е.С., Глянцева А.В.* AutomatiCS 2011 – разрабатывать КИПиА просто и эффективно. Часть 1: это действительно САПР // САПР и графика. – 2012. – № 4. – С. 76-81.
2. *Целищев Е.С., Кудряшов И.С., Глянцева А.В.* AutomatiCS 2011 – разрабатывать КИПиА просто и эффективно. Часть 6. Базы данных // САПР и графика. – 2013. – № 3. – С. 58-62.
3. *Целищев Е.С., Кудряшов И.С., Глянцева А.В.* AutomatiCS 2011 – разрабатывать КИПиА просто и эффективно. Часть 3. Адаптация проектных документов // САПР и графика. – 2012. – № 7. – С. 58-62.
4. *Целищев Е.С., Глянцева А.В.* AutomatiCS 2011 – разрабатывать КИПиА просто и эффективно. Часть 4. Выбор характеристик технических средств // САПР и графика. – 2012. – № 11. – С. 63-67.

Статья поступила в редакцию 5 октября 2014 г.

INSTALLATION OF COMPLEX COMPUTER-AIDED DESIGN SYSTEM AT DESIGN INSTITUTE

I.V. Artyushkin

OJSC «Giprovostokneft»
93, Krasnoarmeyskaya St., Samara, 443041, Russian Federation

This paper exemplifies creating and using of a complex computer-aided design (CAD) system at the Automated Process Control Systems (APCS) department of the Ghiprovostokneft OJSC. The order of the project implementation by traditional ways, without using of complex CAD-system is given. Criteria of a choice of CAD system for automation of design department actions are defined. The set of programs for the maximum automation of performance of standard operations is worked out. The algorithm of design by using the CAD system is developed. Methods of interprogram interaction and adaptation of software products to the organizational structure of the APCS department are shown. In the process of making up a set of programs the priority was given to the domestically developed CAD systems which is essential in the conditions of import substitution.

Keywords: *Computer-aided design system, installa, CAD, APCS, design automation.*

УДК 681.51

СИНТЕЗ ОПТИМАЛЬНОЙ ПО БЫСТРОДЕЙСТВИЮ СИСТЕМЫ УПРАВЛЕНИЯ ПРОЦЕССОМ ИНДУКЦИОННОГО НАГРЕВА С ФАЗОВЫМИ ОГРАНИЧЕНИЯМИ В УСЛОВИЯХ ИНТЕРВАЛЬНОЙ НЕОПРЕДЕЛЕННОСТИ ХАРАКТЕРИСТИК ОБЪЕКТА*

И.С. Левин, Э.Я. Рапопорт

Самарский государственный технический университет
Россия, 443100, г. Самара, ул. Молодогвардейская, 244
E-mail: levin_ilja@yahoo.com; rapoport@samgtu.ru

Рассмотрена задача синтеза оптимальной по быстродействию системы управления процессом индукционного нагрева заготовки под обработку давлением с неполным измерением состояния в условиях интервальной неопределенности характеристик объекта с учетом фазового ограничения на максимальную температуру. Полученный оптимальный алгоритм управления с обратными связями дополнен специальным участком поддержания максимальной температуры на предельно допустимом уровне. Приведены выражения для расчета коэффициентов обратных связей и представлена структура полученной замкнутой системы. Для взятых в качестве примера исходных данных процесса индукционного нагрева рассчитаны численные значения коэффициентов обратных связей, построены графики управляющего воздействия и температурного поля.

Ключевые слова: система с распределенными параметрами, индукционный нагрев, управление в условиях интервальной неопределенности, синтез оптимального регулятора, фазовые ограничения.

В реальных производственных условиях помимо учета ограничения на управляющее воздействие, определяемое энергетическими возможностями индукционной нагревательной установки, необходим учет дополнительного ограничения на величину максимальной температуры $\theta_{\max}(t)$ в процессе нагрева, которая не должна превышать предельно допустимого значения $\theta_{\text{доп}}$ [1].

В качестве объекта управления рассматривается процесс индукционного нагрева металлических изделий цилиндрической формы с сосредоточенным управляющим воздействием по мощности внутреннего тепловыделения $u(t)$, который можно в линейном приближении описать бесконечной системой дифференциальных уравнений для временных мод $\bar{\theta}_n(\mu_n, t)$ разложения температурного поля $\theta(x, t)$ в ряд по собственным функциям $J_0\left(\eta_n \frac{x}{R}\right)$ радиальной координаты $x \in [0, R]$ [2]:

* Работа выполнена при финансовой поддержке Минобрнауки России в рамках базовой части государственного задания ФГБОУ ВПО «СамГТУ» (код проекта №1271).

Илья Сергеевич Левин, ассистент кафедры «Автоматика и управление в технических системах».

Эдгар Яковлевич Рапопорт (д.т.н., проф.), профессор кафедры «Автоматика и управление в технических системах».

$$\frac{d\bar{\theta}_n(\mu_n, t)}{dt} = -\mu_n^2 \bar{\theta}_n(\mu_n, t) + \frac{1}{c\gamma} \bar{F}_{b1n}(\mu_n, v) u(t) + d_{1n} \theta_C(t), t \in [0, t_1], n = 1, 2, \dots; \quad (1)$$

$$\bar{\theta}_n(\mu_n, 0) = \bar{\theta}_0^{(0)}(\mu_n).$$

На управляющее воздействие $u(t)$ накладывается следующее ограничение:

$$0 \leq u(t) \leq u_{\max} \quad \forall t \in [0, t_1] \quad (2)$$

Здесь R – радиус цилиндра;

c, γ – удельная теплоемкость и плотность нагреваемого материала;

$\bar{\theta}_0^{(0)}(\mu_n)$ – моды разложения заданного равномерного начального распределения температуры $\theta(x, 0) = \theta_0 = \text{const}$ в бесконечный ряд по системе собственных функций;

$$\mu_n^2 = \frac{a\eta_n^2}{R^2} \text{ – собственные числа;}$$

$\eta_n, n = 1, 2, \dots$ – бесконечно возрастающая последовательность корней уравнения $BiJ_0(\eta) - \eta J_1(\eta) = 0$;

Bi – безразмерный критерий Био, характеризующий уровень тепловых потерь с поверхности цилиндра в процессе нагрева;

$J_i(\eta), i = 0, 1$ – функции Бесселя нулевого и первого порядка;

d_{1n} – известные коэффициенты;

$\theta_C(t)$ – температура окружающей среды;

$\theta(x, t)$ – температурное поле нагреваемого металлического изделия, изменяющееся во времени t и по радиальной координате x , которое описывается следующим выражением:

$$\theta(x, t) = \theta_0 + \frac{1}{c\lambda} \sum_{n=1}^{\infty} \frac{2\bar{F}_{b1n}(\eta_n, v) \eta_n^2 J_0\left(\eta_n \frac{x}{R}\right)}{(\eta_n^2 + Bi^2) J_0^2(\eta_n)} \int_0^{t_1} e^{-\mu_n^2(t-\tau)} u(\tau) d\tau, \quad (3)$$

где λ – коэффициент теплопроводности;

$\bar{F}_{b1n}(\eta_n, v)$ – моды функции пространственного распределения по радиусу цилиндра внутренних источников тепла, определяемые по формуле

$$\bar{F}_{b1n}(\eta_n, v) = \int_0^1 F_{b1}(l, v) J_0(\eta_n l) l dl, n = 1, 2, \dots \quad (4)$$

Здесь

$$F_{b1}(l, v) = v \frac{\text{ber}'^2(vl) + \text{bei}'^2(vl)}{\text{ber } v \text{ber}' v + \text{bei } v \text{bei}' v}; l = \frac{x}{R}; v = R\sqrt{2\pi\mu_a f \sigma};$$

f – частота питающего индуктор тока;

σ – электропроводность нагреваемого материала;

μ_a – абсолютная магнитная проницаемость нагреваемого материала;

$\text{ber } z, \text{bei } z, \text{ber}' z, \text{bei}' z$ – функции Кельвина и их первые производные.

Постановка задачи синтеза оптимальной по быстродействию системы автоматического управления (САУ) процессом индукционного нагрева металличе-

ских полуфабрикатов цилиндрической формы под обработку давлением в условиях интервальной неопределенности характеристик объекта без учета дополнительных фазовых ограничений и ее решение рассмотрены в [3]. Полученный в результате решения этой задачи алгоритм управления с обратной связью $u^*(\theta)$ имеет вид

$$u^*(\theta) = \frac{u_{\max}}{2} \left[1 + \text{sign } h_1(\theta_1, \theta_2, \tilde{y}) \right] = \frac{u_{\max}}{2} \left[1 + \text{sign} \sum_{j=1}^2 \rho_j(\tilde{y}) (\theta_j^T(\tilde{y}) - \theta_j) \right], \quad (5)$$

где $\tilde{y} = (\theta_0, Bi)$ – вектор неопределенных характеристик объекта, в качестве которых приняты начальная температура $\theta_0 \in [\theta_{0_{\min}}, \theta_{0_{\max}}]$ и безразмерный критерий Био $Bi \in [Bi_{\min}, Bi_{\max}]$;

$h_1(\theta_1, \theta_2, \tilde{y})$ – функция переключения оптимального управления u^* , формируемая по измеряемым температурам θ_j на поверхности $\theta_1 = \theta(R, t)$ и в центре $\theta_2 = \theta(0, t)$ нагреваемого изделия;

$\rho_j(\tilde{y})$ и $\theta_j^T(\tilde{y}), i=1,2$ – значения коэффициентов обратных связей и заданных конечных температурных состояний, определяемые согласно следующим зависимостям:

$$\rho_i(\tilde{y}) = \rho_i(y_H) + \sum_{j=1}^2 \gamma_{ij} (\theta_j(t_\Phi(\tilde{y})) - \theta_{jH}); \quad i=1,2; \quad (6)$$

$$\theta_i^T(\tilde{y}) = \theta_i^T(y_H) + \sum_{j=1}^2 \gamma_{ij}^* (\theta_j(t_\Phi(\tilde{y})) - \theta_{jH}); \quad i=1,2; \quad (7)$$

Здесь $\theta_j^T(y_H) = \theta^{**} - \varepsilon_{\min}^{(2)}, j=1,2$ – результирующие значения температур на поверхности и в центре нагреваемого изделия в конце оптимального процесса, рассчитанные в окрестности номинальной точки $y_H = (\theta_0^*, Bi^*)$, где $\varepsilon_{\min}^{(2)}$ – предельно достижимая точность равномерного приближения к требуемой конечной температуре $\theta^{**} = const$ в классе управлений (5) с двумя интервалами постоянства;

$\rho_i(y_H)$ – нетривиальные решения однородной системы линейных уравнений

$$\sum_{j=1}^2 \rho_j(y_H) (\theta_j^T(y_H) - \theta_j(\tilde{t}_m(y_H))) = 0, m=1,2,$$

рассчитанные при $\tilde{y} = y_H = (\theta_0^*, Bi^*)$, где $\tilde{t}_m(y_H), m=1,2$ – расчетные моменты времени переключения оптимальной программы $u^*(t)$ при $\tilde{y} = y_H$.

Далее в (6), (7) $\theta_j(t_\Phi(\tilde{y})), j=1,2$ – наблюдаемые и заранее фиксируемые на протяжении первого интервала постоянства управления моменты времени t_Φ при $u(t) = u_{\max}$ значения температуры в точках $x_1 = R$ и $x_2 = 0$ при реализуемых значениях \tilde{y} .

Значения $\theta_{jH} = \theta_j(t_\Phi(y_H)), j=1,2$ в (6), (7) рассчитываются по формулам [2]:

$$\theta_{1H} = \theta_0 + \frac{u_{\max} R^2}{\lambda} \sum_{n=1}^{\infty} \frac{2\bar{F}_{bln}(\eta_n, \nu)}{(\eta_n^2 + Bi^2) J_0(\eta_n)} \left(1 - e^{-\mu_n^2 t \Phi}\right); \quad (8)$$

$$\theta_{2H} = \theta_0 + \frac{u_{\max} R^2}{\lambda} \sum_{n=1}^{\infty} \frac{2\bar{F}_{bln}(\eta_n, \nu)}{(\eta_n^2 + Bi^2) J_0^2(\eta_n)} \left(1 - e^{-\mu_n^2 t \Phi}\right); \quad (9)$$

при $\theta_0 = \theta_0^*$, $Bi = Bi^*$.

Параметры $\gamma_{ij}, \gamma_{ij}^*$ в (6), (7) рассчитаны по предложенной в [3] методике:

$$\begin{aligned} \gamma_{ij}^* &= \sum_{m=1}^2 \alpha_{mj} \beta_{mi}^*; \gamma_{ij} = \sum_{m=1}^2 \alpha_{mj} \beta_{mi}; \\ \beta_{1i} &\cong \frac{\Delta \rho_i}{\Delta \theta_0}; \beta_{2i} \cong \frac{\Delta \rho_i}{\Delta Bi}; \beta_{1i}^* \cong \frac{\Delta \theta_i^T}{\Delta \theta_0}; \beta_{2i}^* \cong \frac{\Delta \theta_i^T}{\Delta Bi}; \quad (10) \\ \alpha_{11} &= \frac{\frac{\partial \theta_2}{\partial Bi}}{\frac{\partial \theta_2}{\partial Bi} - \frac{\partial \theta_1}{\partial Bi}}; \alpha_{12} = \frac{\frac{\partial \theta_1}{\partial Bi}}{\frac{\partial \theta_2}{\partial Bi} - \frac{\partial \theta_1}{\partial Bi}}; \alpha_{21} = -\alpha_{22} = -\frac{1}{\frac{\partial \theta_2}{\partial Bi} - \frac{\partial \theta_1}{\partial Bi}}, \end{aligned}$$

где $\frac{\partial \theta_1}{\partial Bi}$ и $\frac{\partial \theta_2}{\partial Bi}$ находятся путем дифференцирования выражений (8), (9).

Учет фазового ограничения на максимальную температуру $\theta_{\max}(t)$, ограниченную заданным допустимым пределом $\theta_{\text{доп}}$, приводит к необходимости обеспечения на всем протяжении процесса управления соотношения

$$\theta_{\max}(t) = \max_{x \in [0, R]} \theta(x, t) \leq \theta_{\text{доп}}, \quad 0 < t \leq t_1. \quad (11)$$

В соответствии с принципом максимума Понтрягина [4] в этом случае оптимальное программное управление $u^*(t)$ в каждый момент времени либо принимает одно из двух своих предельно допустимых значений u_{\max} и $u_{\min} = 0$, либо определяется из условий поддержания на предельно допустимом уровне $\theta_{\text{доп}}$ максимальной температуры θ_{\max} , что для рассматриваемого случая с двухинтервальным управлением в условиях обеспечения предельно достижимой точности $\varepsilon_{\min}^{(2)}$ равномерного приближения к заданному конечному температурному состоянию $\theta(x, t_1) = \theta^{**} = \text{const}$ приводит к оптимальному программному алгоритму управления следующего вида (рис. 1) [2]:

$$u^*(t) = \begin{cases} u_{\max}, & 0 < t < t_0; \\ u^0(t), & t_0 \leq t < \Delta_1^0; \\ 0, & \Delta_1^0 < t < \Delta_1^0 + \Delta_2^0. \end{cases} \quad (12)$$

Здесь t_0 – момент достижения равенства $\theta_{\max}(t_0) = \theta_{\text{доп}}$, $u^0(t)$ – управление на участке (t_0, Δ_1^0) движения по ограничению с поддержанием равенства $\theta_{\max}(t) = \theta_{\text{доп}}$, $t \in (t_0, \Delta_1^0)$.

Часто в реальных ситуациях за θ_{\max} можно принять с допустимой погрешностью температуру поверхности $\theta(x_{\max}, t) = \theta(R, t) = \theta_1(t)$ нагреваемого металлического изделия для всех $t \in (0, \Delta_1^0)$. Тогда, если пренебречь смещением во времени точки температурного максимума, при сравнительно малой длительности участка поддержания θ_{\max} на $\theta_{\text{доп}}$ равенство $\theta_{\max}(t) = \theta_{\text{доп}}$ определяет с достаточной точностью управление $u^\theta(t)$ в экспоненциальной форме [5]:

$$u^\theta(t) = u_{\max} \left(a_\theta + b_\theta e^{-\beta_\theta(t-t_\theta)} \right), t \in (t_\theta, \Delta_1^0), \quad (13)$$

где коэффициенты $a_\theta, b_\theta, \beta_\theta$ определяются по следующим выражениям:

$$a_\theta = \frac{L_1 \eta_2^2 + L_2 \eta_1^2}{E_1 \eta_2^2 + L_2 \eta_1^2}; b_\theta = \frac{(\eta_2^2 - \eta_1^2)(E_1 L_2 - E_2 L_1)}{(E_1 + E_2)(E_1 \eta_2^2 + E_2 \eta_1^2)}; \beta_\theta = \frac{a(E_1 \eta_2^2 + E_2 \eta_1^2)}{R^2(E_1 + E_2)}. \quad (14)$$

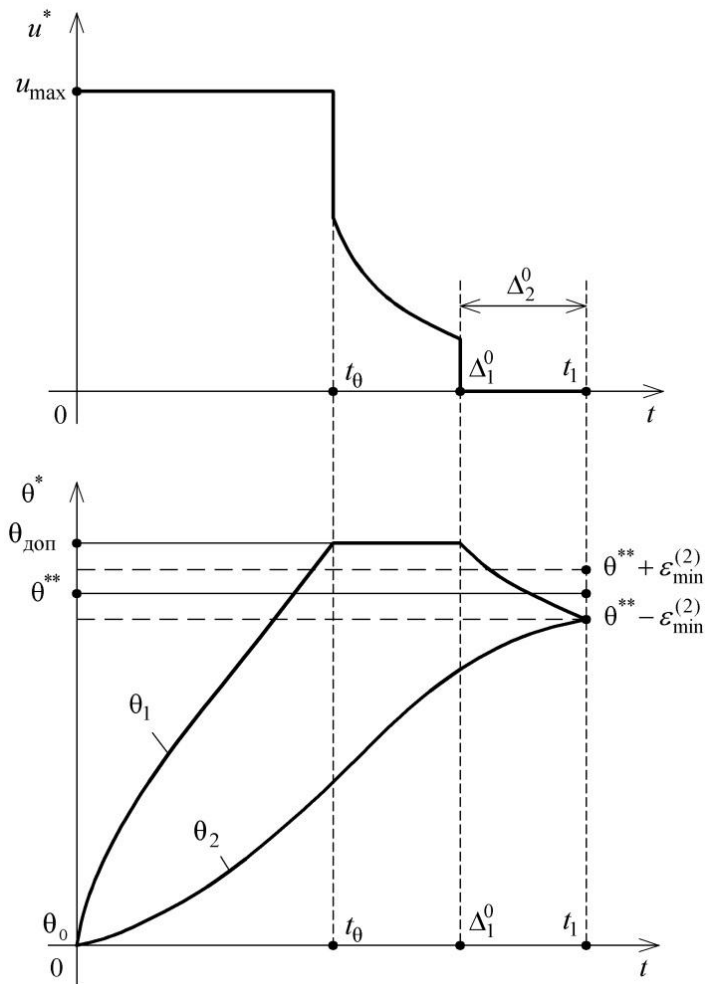


Рис. 1. Управляющее воздействие и температурное поле в оптимальном по быстродействию процессе нагрева с ограничением на максимальную температуру

Здесь $L_n = A_n^0 \bar{\theta}_n^0 \eta_n^2$; $E_n = A_n^0 \bar{F}_{bln}(\eta_n, \nu)$, $n = 1, 2$;

$$A_n^\theta = \frac{2\eta_n^2 J_0\left(\eta_n \frac{x_{\max}}{R}\right)}{(\eta_n^2 + Bi^2) J_0^2(\eta_n)}; \bar{\theta}_n^\theta = \int_0^1 \theta(l, t_\theta) \cdot l \cdot J_0(\eta_n l) dl.$$

Подставив управление (12) в формулу (3), получим для $t = \sum_{i=1}^2 \Delta_i^0$ следующее выражение для конечного распределения температур $\theta(x, \Delta_1^0, \Delta_2^0)$ с учетом фазового ограничения на θ_{\max} :

$$\theta(x, \Delta_1^0, \Delta_2^0) = \theta_0 + \frac{u_{\max} R^2}{\lambda} \sum_{n=1}^{\infty} \frac{2\bar{F}_{b1n}(\eta_n, v) J_0\left(\eta_n \frac{x}{R}\right)}{(\eta_n^2 + Bi^2) J_0^2(\eta_n)} M_n;$$

$$M_n = \left[e^{\mu_n^2 t_\theta} - 1 + a_0 \left(e^{\mu_n^2 \Delta_1^0} - e^{\mu_n^2 t_\theta} \right) + \frac{b_0 \eta_n^2}{\eta_n^2 - \frac{\beta_0 R^2}{a}} \left(e^{\mu_n^2 \Delta_1^0 - \beta_0 (\Delta_1^0 - t_\theta)} - e^{\mu_n^2 t_\theta} \right) \right] e^{\mu_n^2 (\Delta_1^0 + \Delta_2^0)}.$$
(15)

Таким образом, для автоматической отработки оптимальной программы (12) в рассматриваемой замкнутой системе необходимо учитывать соотношение между θ_{\max} и $\theta_{\text{доп}}$ наряду со знаком функции переключения $h_1(\theta_1, \theta_2, \tilde{y})$, что приводит к следующему алгоритму управления с обратными связями вместо (5):

$$u^* = \begin{cases} u_{\max} & \forall \theta_1, \theta_2 : h_1(\theta_1, \theta_2, \tilde{y}) > 0; \theta_1 < \theta_{\text{доп}}; \\ u^\theta(t) & \forall \theta_1, \theta_2 : h_1(\theta_1, \theta_2, \tilde{y}) > 0; \theta_1 = \theta_{\text{доп}}; \\ 0 & \forall \theta_1, \theta_2 : h_1(\theta_1, \theta_2, \tilde{y}) < 0; \theta_1 < \theta_{\text{доп}}; \end{cases} \quad (16)$$

Алгоритм управления (16) будет в любой момент времени соответствовать оптимальному по быстрдействию режиму нагрева, если функция переключения $h_1(\theta_1, \theta_2, \tilde{y})$ меняет знак в расчетный момент времени Δ_1^0 . Моменты времени Δ_1^0, Δ_2^0 , а также величина $\varepsilon_{\min}^{(2)}$ должны быть предварительно найдены альтернативным методом [1, 2] с учетом ограничения на максимальную температуру.

Требуемое поведение $h_1(\theta_1, \theta_2, \tilde{y})$ обеспечивается выбором измененных по сравнению с прежними и рассчитываемых аналогичным способом коэффициентов $\rho_i(\tilde{y})$ в (6) с учетом новых значений $\theta_j^T(y_H), \theta_j(\tilde{t}_m(y_H))$ и \tilde{t}_m , соответствующих алгоритму управления (12) и конечному состоянию объекта, описываемого выражением (15).

Теперь структура замкнутой системы (рис. 2) по сравнению с исходной в [3] дополняется в соответствии с новым алгоритмом управления (16) задержанной обратной связью по $\theta_1(t)$, обеспечивающей поддержание θ_1 на уровне $\theta_{\text{доп}}$ с требуемой точностью, определяемой выбором величины ρ_3 . Задержанный характер дополнительной обратной связи по θ_1 обеспечивается нелинейным эле-

ментом НЭ с зоной нечувствительности, отсекающим ее воздействие при $\theta_1 < \theta_{\text{доп}}$.

Определим значение коэффициента ρ_3 по следующей методике. Рассмотрим контур задержанной обратной связи в режиме поддержания равенства $\theta_{\text{max}} \equiv \theta_{\text{доп}}$ (рис. 3), предварительно выполнив соответствующие преобразования структурной схемы по правилам эквивалентных преобразований.

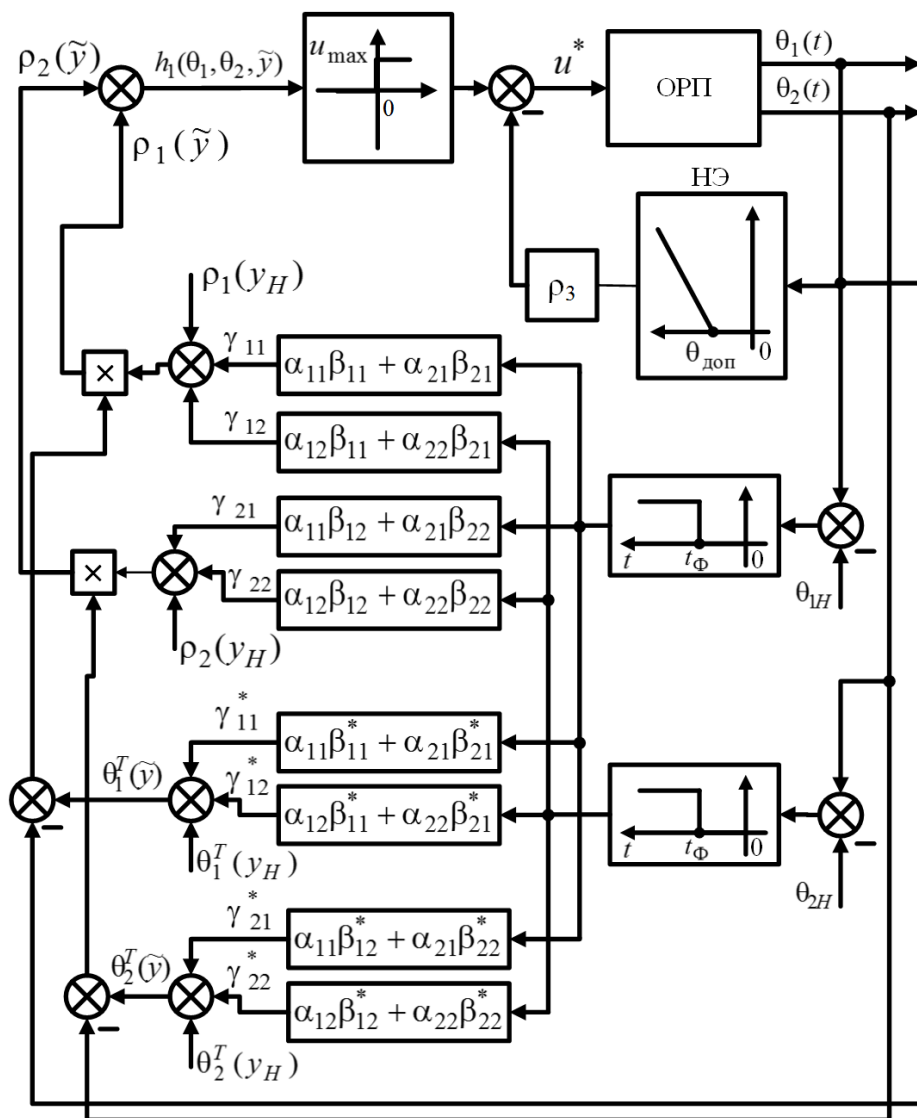


Рис. 2. Структура оптимальной по быстродействию системы управления процессом индукционного нагрева заготовки под обработку давлением с неполным измерением состояния в условиях интервальной неопределенности с учетом фазового ограничения на максимальную температуру

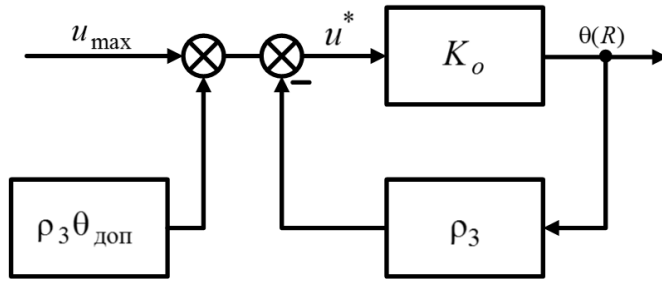


Рис. 3. Контур задержанной обратной связи в статике

В статическом режиме поведение объекта (1)-(3), передаточная функция которого $W_{ОП}(x, p)$ представлена параллельно соединенными аperiодическими звеньями [6], будет характеризоваться только суммарным коэффициентом усиления:

$$W_{ОП}(x, 0) = \sum_1^{\infty} \frac{2}{c\gamma R^2} \cdot \frac{K_n}{T_n p + 1} = \sum_1^{\infty} \frac{2K_n}{c\gamma R^2} = K_o, \quad (17)$$

$$\text{где } K_n = \frac{1}{\mu_n^2} \cdot \frac{\eta_n^2 J_0 \left(\eta_n \frac{x}{R} \right) \left(\int_0^R \xi J_0 \left(\eta_n \frac{\xi}{R} \right) F_{b1} \left(\frac{\xi}{R}, v \right) d\xi \right)}{J_0^2(\eta_n) (\eta_n^2 + Bi^2)}; T_n = \frac{1}{\mu_n^2}.$$

Тогда для замкнутого контура с отрицательной обратной связью можно записать следующее соотношение между входом и выходом структуры (см. рис. 3):

$$\theta_1(R) = (u_{\max} + \beta_3 \theta_{\text{доп}}) \frac{K_o}{1 + \beta_3 K_o}. \quad (18)$$

Задаваясь допустимой погрешностью Ω поддержания θ_{\max} на уровне $\theta_{\text{доп}}$ в замкнутом контуре задержанной обратной связи согласно равенству

$$\theta_1(R) = \theta_{\text{доп}} (1 + \Omega), \quad (19)$$

получим, приравнивая правые части выражений (18) и (19), следующее выражение для коэффициента обратной связи ρ_3 :

$$\rho_3 = \frac{u_{\max} K_o - \theta_{\text{доп}} (1 + \Omega)}{\Omega K_o \theta_{\text{доп}}}. \quad (20)$$

Для исходных данных рассматриваемого процесса индукционного нагрева цилиндрических слитков, представленных в таблице, были получены следующие значения коэффициентов в (6), (7), (10), (20): $\rho_1 = 1$, $\rho_2 = 1.042$, $\rho_3 = 9.7 \cdot 10^4$; $\gamma_{11} = \gamma_{12} = 0$, $\gamma_{21} = -1.77$, $\gamma_{22} = 1.77$, $\gamma_{11}^* = \gamma_{21}^* = 9.25$, $\gamma_{12}^* = \gamma_{22}^* = -9.24$.

На рис. 4 представлены вид управляющего воздействия (а) и температурное поле (б) для рассматриваемого примера в замкнутой системе оптимального по быстрдействию управления процессом индукционного нагрева.

Исходные данные для процесса индукционного нагрева

Параметр	Значение
$2R$, толщина заготовки, м	0,48
λ , коэффициент теплопроводности, Вт/(м · °С)	130
γ , плотность материала, кг/м ³	2800
c , теплоемкость, Дж/(кг · °С)	922
a , коэффициент температуропроводности, м ² /с	49×10^6
ν , характерный параметр	15
Bi , критерий Био	0,05
θ_0 , начальная температура, °С	15
θ^{**} , конечная температура, °С	460
P_{0max} , максимальная поверхностная плотность мощности нагрева, кВт/м ²	130

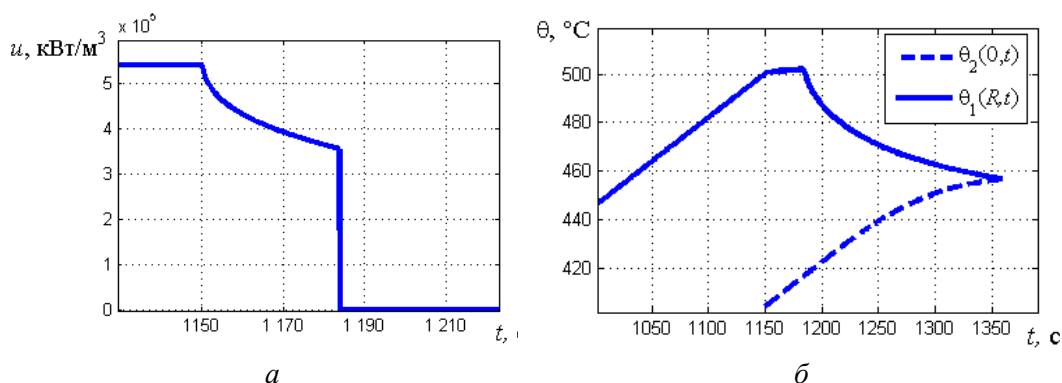


Рис. 4. Управляющее воздействие (а) и температурное поле (б) в замкнутой системе оптимального по быстродействию управления процессом индукционного нагрева

БИБЛИОГРАФИЧЕСКИЙ СПИСОК

1. Рапопорт Э.Я., Плишивцева Ю.Э. Оптимальное управление температурными режимами индукционного нагрева. – М.: Наука, 2012. – 309 с.
2. Рапопорт Э.Я. Оптимальное управление системами с распределенными параметрами – М.: Высшая школа, 2009. – 677 с.
3. Левин И.С. Синтез оптимальной по быстродействию системы управления процессом индукционного нагрева металла под обработку давлением в условиях ограниченной неопределенности характеристик объекта // Проблемы управления и моделирования в сложных системах: Труды XVI Международной конференции. – Самара: СНЦ РАН, 2014. – С. 86-94.
4. Понтрягин Л.С., Болтянский В.Г., Гамкрелидзе Р.В. Математическая теория оптимальных процессов. – М.: Наука, 1983.
5. Рапопорт Э.Я. Оптимизация процессов индукционного нагрева металла. – М.: Metallurgy, 1993. – 279 с.
6. Левин И.С. Моделирование оптимальной по быстродействию системы управления процессом индукционного нагрева в условиях интервальной неопределенности характеристик объекта // Вестник Самарского государственного технического университета. Сер. Технические науки. – 2013. – № 3 (39). – С. 167-174.

Статья поступила в редакцию 10 сентября 2014 г.

SYNTHESIS OF TIME-OPTIMAL CONTROL SYSTEM OF THE STATE-CONSTRAINED INDUCTION HEATING PROCESSES WITH INTERVAL OF UNCERTAINTY CHARACTERISTICS OF THE OBJECT

I.S. Levin, E.Ya. Rapoport

Samara State Technical University
244, Molodogvardeyskaya st., Samara, 443100, Russian Federation

This paper presents the problem of synthesis of the time-optimal system to control the process of induction heating of a workpiece for further chipless shaping with partial condition testing in conditions of the interval indeterminacy of the object characteristics considering the constraint on the state of maximum temperature. The obtained optimal algorithm of control with feedbacks is completed with special section on which the maximum temperature is maintained on the lowest acceptable level. Equations for the feedback coefficient calculation are shown and the structure of obtained closed-loop system is given. Numerical values of the feedback coefficients are calculated for the basic data of the induction heating process given as example, graphs of control input and temperature pattern are constructed.

Keywords: *distributed parameter system, induction heating, control with interval uncertainty of characteristics of the object, the synthesis of an optimal control, constraints on the state.*

*Ilya S. Levin, Assistant.
Edgar Ya. Rapoport (Dr. Sci. (Techn.)), Professor.*

УДК 620.9.001.5

СПЕЦИФИКА ВЗАИМОДЕЙСТВИЯ АГЕНТОВ ПРИ РАЗРАБОТКЕ АРХИТЕКТУРЫ МУЛЬТИАГЕНТНЫХ СИСТЕМ

А.Ю. Рыгалов, Ю.П. Кубарьков, Я.В. Макаров

Самарский государственный технический университет
Россия, 443100, г. Самара, ул. Молодогвардейская, 244

Рассмотрены основные виды архитектур агентов, применимых в энергетике, рассматриваются возможности применения этих архитектур при моделировании агентов электроэнергетической системы. Рассматриваются архитектуры мультиагентных систем (МАС), в состав которых входят эти агенты, и способы организации взаимодействия агентов в подобных системах. Дается классификация моделей взаимодействия агентов и их подробное описание, отмечаются их достоинства и недостатки, возможность применения в энергетике. Делается вывод о целесообразности применения архитектуры, в основе которой лежит опосредованная модель взаимодействия агентов с общей моделью энергосистемы, определяющей как возможные восприятия агентов, так и возможности их воздействия друг на друга.

Ключевые слова: агент, мультиагентная система, энергетика, механизмы взаимодействия.

Агентом электроэнергетической системы является автономная программно-техническая единица, представляющая определенный элемент системы (трансформатор, линию, подстанцию), который способен к взаимодействию с такими же элементами системы для решения сложных задач, принятию тех или иных решений в соответствии со своими целями и обладающий интеллектом благодаря возможности обучения.

Прежде всего необходимо дать определение действиям агента. Действия являются элементами, заложенными в основу поведения агентов: они могут вызывать изменения в окружающей среде или в других агентах. Можно представить несколько моделей для описания действий агентов:

- глобальное преобразование состояния системы (изменение режима работы системы);
- локальное изменение окружающей среды (отключение одного из параллельно работающих трансформаторов при его недостаточной загрузке);
- ответная реакция на воздействие (отключение КЗ агентами релейной защиты);
- вычислительные процессы, осуществляемые внутри агента и необходимые для восприятия полученных данных и изменения своего состояния (при отключении оператором линии агент линии, получая информацию с датчиков, делает соответствующие выводы и переходит в режим ожидания и диагностики);
- перемещение агента в окружающей среде (перемещение диагностирующе-

*Алексей Юрьевич Рыгалов, ассистент кафедры «Электрические станции».
Юрий Петрович Кубарьков (д.т.н., доц.), профессор кафедры «Электрические станции».*

Ярослав Викторович Макаров, ассистент кафедры «Электрические станции».

го агента с одного сервера на другой для выполнения своих функций).

Поведение агентов также включает в себя механизмы выбора того или иного действия, которые будут выполняться в соответствии с имеющимися данными и состоянием агента [1, 2]. В любой электрической схеме сети присутствуют линии электропередачи, которые снабжены индивидуальной защитой, реагирующей на то или иное повреждение. При этом для линии электропередач целесообразно моделировать соответствующую защиту линии своим собственным агентом. Преимущества такого подхода будут следующие: во-первых, можно разграничить деятельность агентов и модель будет наиболее достоверно соответствовать реальной сети; во-вторых, можно исключить перегруженность задачами агентов линий. Таким образом, при возникновении короткого замыкания на линии ее будет отключать именно агент релейной защиты, представляя соответствующую информацию агенту линии.

Термин «архитектура» относится к внутренней структуре агента, которая отвечает за выбор действия. Различные виды архитектур агентов, которые необходимы для получения определенного поведения агентов, можно разделить на социальные и реактивные.

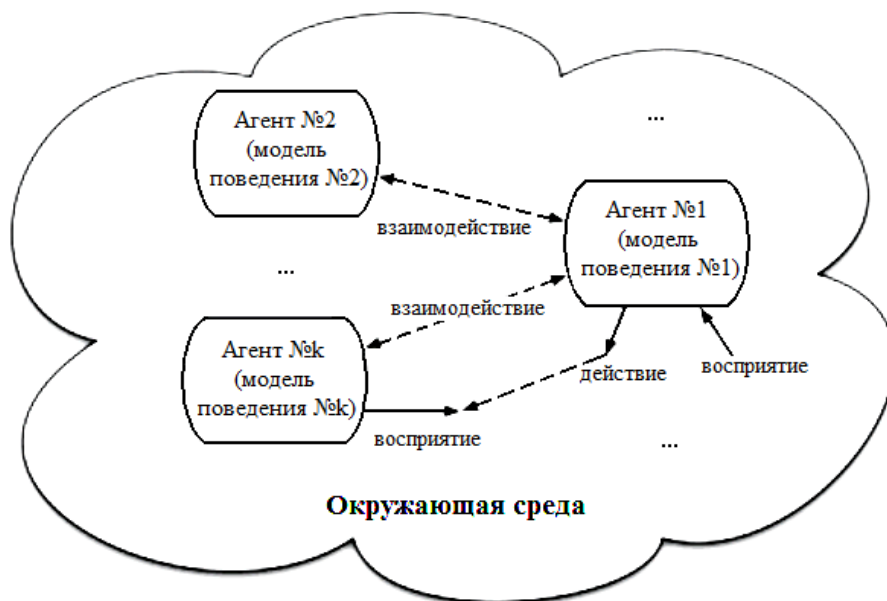


Рис. 1. Абстрактная модель для анализа взаимодействия

Реактивные агенты – это агенты, которые находятся в некоторой окружающей среде, они очень часто не обладают внутренней памятью [3]. Реактивные агенты выполняют конкретные действия только после восприятия определенных сигналов – либо от других агентов, либо из окружающей среды (характерным примером является агент релейной защиты, который, получая сигнал от реагирующих органов, отключает свою линию при превышении протекающего по ней тока). Как правило, поведение этого вида агентов представляет собой набор действий с учетом определенных условий (например, в зависимости от вида короткого замыкания для агентов релейной защиты возможны различные действия – подача предупреждающего сигнала, отключение соответствующего элемента), а

также предусматривает возможность выбора стратегии при действии сразу нескольких ограничений (условия отстройки агента релейной защиты, например при возникновении короткого замыкания на соседней линии или при резервировании основной защиты линии). В этом случае мотивация к тому или иному действию происходит от инициирующего события, обнаруженного в окружающей среде (короткое замыкание в линии); эти агенты по своей сути не могут быть активными.

Совещательные или когнитивные агенты, наоборот, характеризуются более сложным механизмом выбора действия ввиду того, что все агенты должны прийти к соглашению о распределении обязанностей и приемлемости полученного решения. Например, при прогнозировании графиков нагрузки и соответственном распределении нагрузки между несколькими станциями различного типа необходимо учитывать большое количество лимитирующих факторов. А также каждый агент имеет представление об окружающей среде и память о прошлых своих действиях, благодаря чему возможно обучение агентов и, таким образом, ускоренное нахождение решения на основе похожих условий. Для каждой возможной последовательности восприятий совещательные агенты стараются подобрать такую последовательность действий, которая позволит им достичь поставленной цели (например достигнуть минимума потерь за определенный период или на определенном участке). Совещательные модели, как правило, связаны с операциями планирования, и их решения основываются на логических рассуждениях и символьных манипуляциях (сложные вычислительные процессы, совместное согласование действий).

Имеется возможность создания гибридной архитектуры, объединяющей предыдущие виды архитектур. Агенты могут иметь многоуровневую структуру, где совещательные уровни, основанные на символическом представлении окружающего мира, занимаются планированием и принятием решений (для неизвестных возмущений в системе или ее неизвестных ранее состояний), в то время как реактивные уровни выполняют определенные действия, реагируя на внешние факторы. В соответствии с этим были рассмотрены вертикальная и горизонтальная архитектуры.

При горизонтальной архитектуре результаты различных уровней необходимо объединять для получения «итогового поведения» агента. Когда слои расположены вертикальным образом, реактивные уровни имеют более высокий приоритет по сравнению с совещательными, которые активизируются только тогда, когда нет реактивного поведения, вызванного восприятием внешних воздействий.

Структура МАС включает в себя когнитивные агенты (с малым числом совещательных агентов), каждый из которых обладает своей моделью знаний, определяющей его поведение и его взаимодействие. Однако МАС может также состоять только из реактивных агентов. Этот тип системы основан на том, что для демонстрации интеллектуального поведения системы не обязательно, чтобы каждый агент был интеллектуален.

Системы, состоящие из реактивных агентов, как правило, более надежны и отказоустойчивы (например, агент может быть удален из системы без катастрофических последствий для нее). Другие преимущества заключаются в общей гибкости и адаптации реактивных систем в отличие от совещательных систем, которым присуща некоторая инертность. В системе может быть структура с неоднородным составом реактивных и совещательных агентов, что наиболее актуально для российской энергетики.

При этом взаимодействие агентов является ключевым аспектом. Особенно в свете концепции интеллектуальных сетей, которые подразумевают передачу информации параллельно энергии. Существует множество определений понятия агента, и большинство из них подчеркивают, что данная субстанция должна иметь возможность взаимодействовать с окружающей средой и с другими субъектами для того, чтобы решать проблемы или просто достичь своих целей по координации или сотрудничеству. Суть заключается в том, что глобальная динамика системы вытекает из поведения местной системы и взаимодействия ее составляющих частей [6]. Работа объединенной энергосистемы зависит от региональных, а тех, в свою очередь, – от конкретных своих элементов (генерирующих мощностей, подстанций, потребителей и т. д.). Поэтому очевидно, что механизмы взаимодействия имеют огромное влияние на моделирование, проектирование и разработку приложений. На рис. 2 представлена концепция взаимодействия агентов.



Рис. 2. Рассматриваемые модели взаимодействия агентов

В таких моделях можно выделить несколько аспектов. Один из них связан с тем, каким образом происходит взаимодействие между агентами. Если агенты взаимодействуют напрямую (например обмениваются сообщениями), то такая модель не учитывает абстракцию фактического канала связи; с другой стороны, между взаимодействующими агентами могут присутствовать некоторые передающие системы, которые должны быть включены в модель взаимодействия.

Первый подход указывает на модель, в основе которой лежит язык коммуникации агентов [8]. Она имеет свои недостатки: например, для того, чтобы общаться, агенты должны «знать» друг друга – это означает, что они должны быть охарактеризованы уникальным именем, обозначающим их в общей системе. Кроме того, агентам необходимо обеспечить возможность «познакомиться» друг с другом.

В другой модели взаимодействия агентов обеспечивают косвенные связи между ними. Некоторые из этих подходов предусматривают наличие сложных коммуникационных структур [12], которые реализуют механизмы взаимодействия агентов. Другие же модели косвенного взаимодействия в большей степени сосредоточены на моделировании окружающей среды агента (например ГИС или

графические редакторы схем) как средства для визуальной оценки взаимодействия агентов и, следовательно, их поведения.

Первый и самый широко распространенный вид модели взаимодействия агентов обеспечивает прямой обмен информацией между взаимодействующими агентами. Такой подход не учитывает каналы связи, но позволяет агентам взаимодействовать, не прибегая к моделированию этих каналов. Такие механизмы обеспечивают передачу сообщений от одного агента к другому, используя определенный протокол, который служит для обмена сообщениями между агентами. Имеются несколько нюансов относительно самого процесса коммуникации агентов, которые требуют тщательной проработки (начиная с формата сообщения и заканчивая смысловой нагрузкой этих сообщений и диалогов), но в целом этот подход предусматривает выбор подходящих языков программирования для того, чтобы решить все эти проблемы.

Язык коммуникации агентов (ACL) обеспечивает агентов средствами обмена информацией и знаниями. Отличительной особенностью мультиагентных систем, в основе которых лежат языки взаимодействия между агентами, является объект их обсуждения и обозначения. В частности, есть два аспекта (архитектура и распределенное вычисление), которые в равной мере не позволяют говорить об автономии взаимодействующих компонентов.

Компоненты современных систем (даже если они достаточно сложны и могут рассматриваться как самодостаточные, обладающие определенными средствами связи) имеют более низкую степень автономии, чем те, которые связаны с агентами.

Информация, передаваемая в сообщениях, как правило, не требует всесторонней онтологической проработки, в отличие от структуры и категорий, которые можно считать общими для компонентов системы.

Объединение агентов в группу рассматривается как временное явление постоянства и активности, что не является таковым для обычных компонентов программного обеспечения (ПО). Компоненты ПО имеют определенные интерфейсы, что предполагает множество общих структур данных.

Параметры схожей информации и параметры сообщений / вызовов / запросов на обслуживание (более или менее формально) приведены в языках моделирования, а также тесно связаны с компонентом, осуществляющим исполнительные действия. Для эффективного обмена знаниями агенты должны обмениваться онтологиями, которые представляют собой набор категорий объектов, их общие и частные параметры, свойства и взаимосвязь между ними. Иными словами, объект (ГЭС и т. д.) или субъект (диспетчер) должны иметь одинаковые параметры и набор свойств по всей системе, т. е. «общий ресурс данных» (рис. 3).

С чисто технической точки зрения агент связи даже в моделях с непосредственным взаимодействием агентов является косвенным. В самом деле, большинство таких подходов заключается в выборе той или иной коммуникационной инфраструктуры, обеспечивающей надежный механизм передачи сообщений. Тем не менее использование концептуальной модели непосредственного взаимодействия агентов влечет за собой возникновение некоторых ограничений и сложностей. Однако существуют также модели, в которых присутствуют посредники, обеспечивающие взаимодействие агентов [12]. Такие модели взаимодействия агентов, которые обеспечивают косвенные механизмы коммуникации, классифицируются как опосредованные или пространственные модели. Различие заключается в методах воздействия и способах переноса данных, лежащих в ос-

нове этой модели, которые обеспечивают ее разработку и реализацию. Такая модель, в свою очередь, эмулирует конкретные объекты, окружающие агента и необходимые для объединения независимых агентов.

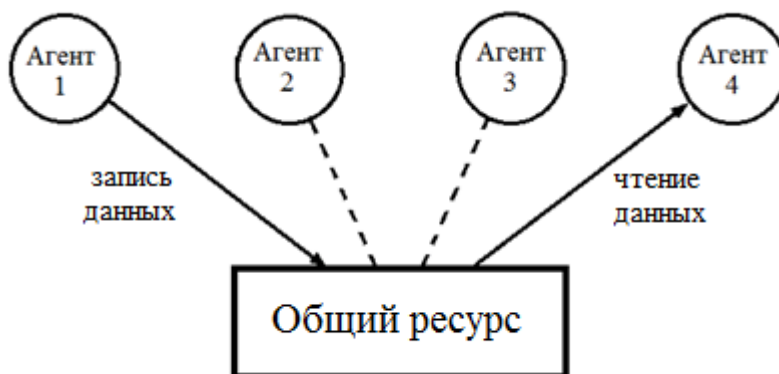


Рис. 3. Концептуальная схема, типичная для архитектуры с «общим ресурсом»

Эти взаимодействия агентов, то есть представление окружающей агента среды в виде собственной конкретной модели, подразумевают, что пространственные характеристики и соответствующая им информация являются ключевыми факторами, которыми нельзя пренебречь при анализе и моделировании системы.

Оба эти подхода обеспечивают механизмы взаимодействия, которые сильно отличаются от модели обмена сообщениями между агентами. На самом деле, механизмы взаимодействия агентов оказывают влияние на связующего агента.

Агенты взаимодействуют для совместного использования ресурсов (загрузка вычислительных мощностей при вычислениях, загрузка параметров ЛЭП при формировании режима) при наличии конкурентного доступа к ним, а также они сотрудничают для выполнения задач, которые не могут быть выполнены отдельным агентом в связи с недостатком информации и возможностей (например сложные технико-экономические расчеты). Некоторые подходы к взаимодействию агентов направлены на моделирование и реализацию некоторой абстрактной модели, позволяющей агентам сотрудничать посредством общего ресурса, доступ к которому регулируется в соответствии с четко определенными правилами [10].

Архитектура, в основе которой лежит принцип «общего ресурса данных», является одним из примеров такого рода моделей. «Общим ресурсом» является хранилище данных, которое дает возможность сотрудничать программным модулям, общаясь при этом косвенно и анонимно. База данных является наиболее подходящим примером такой архитектуры, вся информация относительно электрической схемы может быть записана и четко структурирована в одной или нескольких базах данных, доступ к которым будет иметь каждый агент, по мере необходимости обращаясь за информацией. При этом агенты могут как вносить новые данные (например при добавлении новых присоединений к подстанции), так и изменять старые (например при реконструкции старой подстанции, замене оборудования и соответствующем изменении тех или иных характеристик).

Обоснованием такого подхода является сохранение связи между агентами в процессах вычисления и координации. При этом связи остаются, насколько это

возможно, разделенными путем предоставления определенной свободной абстрактной структуры для взаимодействия агентов. Что касается моделей с непосредственным механизмом взаимодействия, то процесс координации фактически перемещается от самого агента к инфраструктуре. Развитие этого подхода ведется в основном по двум направлениям: расширение языка координации и инфраструктуры с целью повышения ее удобства в использовании и моделировании и реализация общего пространства.

Описанные подходы предназначены для моделирования структуры, посредством которой осуществляется косвенное взаимодействие агентов; другие подходы могут быть направлены на моделирование окружающей среды агентов, принимая во внимание ее пространственные характеристики (рис. 4) [4, 5, 7, 11]. В таких подходах агенты находятся в окружающей среде, пространственные характеристики которой представлены в явном виде и оказывают влияние на их восприятие, взаимодействие и, таким образом, на их поведение.

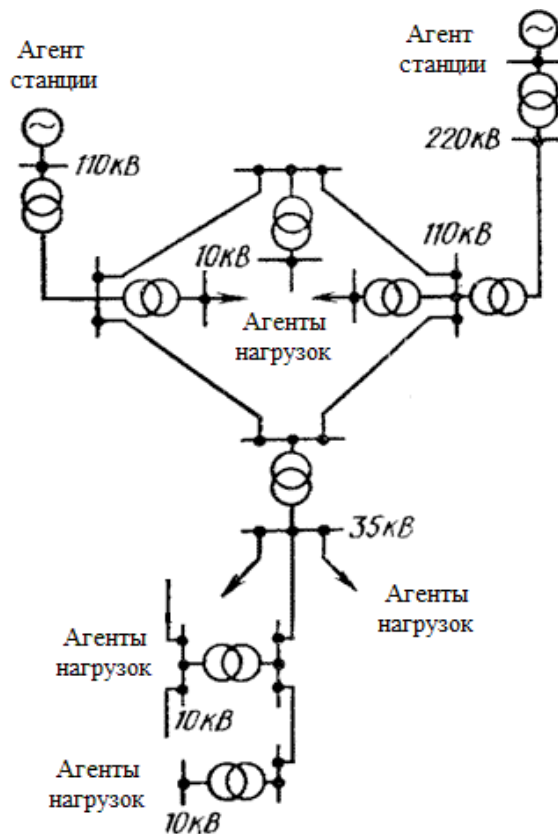


Рис. 4. Пример схемы, иллюстрирующей опосредованное взаимодействие агентов через окружающую среду, в которых пространственная структура окружающей среды играет главную роль в определении восприятия агентов и их возможностей для взаимодействия

Моделирование электрических сетей высокого напряжения возможно осуществить только таким образом, поскольку структура сети представляет собой либо замкнутую, либо сложнзамкнутую цепь с несколькими контурами. Расчет такой сети с помощью отдельных элементов не представляется возможным в виду того, что каждый элемент в большей или меньшей степени влияет на режим

во всей сети. Поэтому моделирование всей сети представляет собой моделирование окружающей среды, в которой располагаются агенты станций и агенты нагрузок, взаимодействие которых происходит через нее. Понятие восприятия, которое на самом деле абстрактно в моделях с непосредственным взаимодействием агентов (агенты воспринимают их состояние, которое включает в себя полученные сообщения, представляемые как новые факты в их базе знаний), непосредственно связано с моделированием так называемой «местной точки зрения».

На самом деле эти подходы направлены на реализацию инфраструктуры для коммуникации агентов, которая позволяет им воспринимать состояние окружающей среды с их позиции (и, возможно, с позиции близлежащих агентов) [9]. Агенты также могут вызывать локальные изменения состояний системы или же просто наблюдать за действиями других агентов. Во всех этих случаях структурирование функции окружающей среды является ключевым аспектом, поскольку оно фактически определяет то, что может быть воспринято агентом в текущем его положении, как он может влиять на окружающую среду, в какой степени его действия могут быть восприняты другими агентами и таким образом взаимодействовать с ними.

Выводы:

- реальные объекты энергетики, моделируемые агентами, выбираются в зависимости от уровня рассматриваемой системы;
- разноуровневые системы в отечественной энергетике актуально представлять неоднородным составом реактивных и совещательных агентов;
- исходя из текущего уровня оснащения предприятий сферы электроэнергетики средствами ИТ и каналами связи наиболее эффективным является построение МАС с косвенным взаимодействием агентов через пространственную модель окружающей среды (системы).

БИБЛИОГРАФИЧЕСКИЙ СПИСОК

1. *Тарасов В.Б.* Агенты, многоагентные системы, виртуальные сообщества: стратегическое направление в информатике и искусственном интеллекте // *Новости искусственного интеллекта*. – 1998. – № 2. – С. 5-15.
2. *Кубарьков Ю.П.* Взаимодействие элементов мультиагентных систем электроэнергетических комплексов / Ю.П. Кубарьков, А.Ю. Рыгалов, Я.В. Макаров // *Труды Кольского научного центра РАН, Энергетика*, 2013. – С. 59-64.
3. *Bandini S., Petta P., Vizzari G., eds.* International Symposium on Agent Based Modeling and Simulation (ABModSim 2006). Volume Cybernetics and Systems 2006, Austrian Society for Cybernetic Studies (2006) 18th European Meeting on Cybernetics and Systems Research (EMCSR 2006).
4. *Bandini S., Federici M.L., Vizzari G.* Situated Cellular Agents Approach to Crowd Modeling and Simulation. *Cybernetics and Systems* 38 (2007). – 729-753.
5. *Bandini S., Petta P., Vizzari G., eds.* Second International Symposium on Agent Based Modeling and Simulation (ABModSim 2008). Volume Cybernetics and Systems 2008, Austrian Society for Cybernetic Studies (2008) 19th European Meeting on Cybernetics and Systems Research (EMCSR 2008).
6. *Hassas S., Serugendo G.D.M., Phan D., eds.* Multi-Agents for modelling Complex Systems (MA4CS). (2007).
7. *Luck M., McBurney P., Sheory O., Willmott S., eds.* Agent Technology: Computing as Interaction. University of Southampton (2005).
8. *North M.J., Collier N.T., Vos J.R.* Experiences Creating Three Implementations of the Repast Agent Modeling Toolkit. *ACM Transactions on Modeling and Computer Simulation* 16 (2006). – 1-25.
9. *Weyns D., Boucké N., Holvoet T.* Gradient Field-Based Task Assignment in an AGV Transportation System. In: *AAMAS '06: Proceedings of the fifth international joint conference on Autonomous*

- agents and multiagent systems, ACM Press (2006). – 842-849.
10. Weyns D., Holvoet T. From Reactive Robots to Situated Multi-Agent Systems: a Historical Perspective on the Role of Environment in Multi-Agent Systems. In Dikenelli, O., Gleizes, M.P., Ricci, A., eds.: Engineering Societies in the Agents World VI , 6th International Workshop, ESAW 2005. Volume 3963 of Lecture Notes in Computer Science., Springer-Verlag (2006). – 63-88.
 11. Weyns D., Breuckner S., Demazeau Y., eds. Engineering Environment-Mediated Multiagent Systems (EEMMAS). (2007).
 12. Weyns D., Omicini A., Odell J. Environment as a First Class Abstraction in Multiagent Systems. Autonomous Agents and Multi-Agent Systems 14 (2007). – 5-30.

Статья поступила в редакцию 2 сентября 2013 г.

SPECIFIC NATURE OF COOPERATION BETWEEN AGENTS IN TERMS OF THE MULTIAGENT SYSTEM ARCHITECTURE DEVELOPMENT

A.Y. Rygalov, Y.P. Kubarkov, Ya.V. Makarov

Samara State Technical University
244, Molodogvardeyskaya st., Samara, 443100, Russian Federation

This paper describes the main types of agent architectures which can be used in energy sector. The paper deals with the possibility of using such architectures to model the agents of electrical power system. Multiagent system architectures which consist of these agents are described, as well as ways to organize cooperation between agents in such systems. Classification of agent cooperation models and their detailed description are given, their advantages and disadvantages are pointed out as well as the possibility of using them in energy sector. The conclusion is drawn about the applicability of the architecture based on the indirect model of cooperation between agents and general model of energy system which determines both potential understanding of agents and the possibility of their potential interaction.

Keywords: *Agent, multi-agent system, energy, interaction mechanisms.*

*Aleksey Y. Rygalov, Assistant.
Yriy P. Kubarkov (Dr. Sci. (Techn.)), Professor.
Yaroslav V. Makarov, Assistant.*

УДК 681.5: 681.5.01

УПРАВЛЕНИЕ ПОЗИЦИОНИРОВАНИЕМ КОСМИЧЕСКИХ АППАРАТОВ

Б.К. Чостковский¹, В.Ю. Денисов²

¹ Самарский государственный технический университет
Россия, 443100, г. Самара, ул. Молодогвардейская, 244

² АО «РКЦ «Прогресс»
Россия, 443009, г. Самара, ул. Земеца, 18

Рассматривается использование структурных решений применительно к управлению одноосной и трехосной системой позиционирования космических аппаратов (КА). Исследуется проблема применения межконтурных регуляторов в многосвязной системе управления. Рассматриваются методы синтеза одноосной и трехосной систем ориентации. Решается задача улучшения динамических характеристик за счет введения корректирующего контура для одноосной системы координат; для многосвязной системы управления позиционированием по трем координатам вводятся межконтурные регуляторы в гироскопические каналы многосвязной системы.

Ключевые слова: многосвязная система управления, оптимизация регуляторов, космический аппарат, позиционирование, система ориентации и стабилизации, двухконтурная система управления.

Одним из важных направлений современного развития теории управления является построение многосвязных систем управления объектами с несколькими входными и выходными воздействиями [1-3].

В качестве такого объекта рассматривается космический аппарат, целью управления которого является его позиционирование по одной, двум и трем координатам с максимально возможной точностью [1]. Ранее при исследовании объектов управления с подобными математическими моделями показано, что эффективным способом достижения указанной цели является синтез контуров управления с межконтурными связями [2]. Актуальным является применение данного подхода к управлению космическим аппаратом и выбор наилучших структур соответствующей управляющей системы.

Управление позиционированием КА по одной координате с использованием терминального регулятора

В [1] предложено в системах позиционирования КА использовать терминальный регулятор, который позволяет управлять длительностью переходного процесса и его формой. Построенный по такому принципу регулятор в сочетании с возможностью тактирования его по пространственной координате позволяет обеспечить попадание объекта в заданную точку фазового пространства в регламентированный момент времени или прохождение объекта через заданные пространственные координаты.

Борис Константинович Чостковский (д.т.н.), профессор кафедры «Автоматика и управление в технических системах».

Владимир Юрьевич Денисов, инженер.

Управление позиционированием КА по одной координате с использованием многоконтурной системы управления

Предположим, что нужно в некоторый момент времени провести точное позиционирование КА на заданной точке, для чего можно использовать активную систему ориентации и стабилизации КА (рис. 1).

Для улучшения динамических характеристик одноосной системы ориентации и стабилизации КА предлагается построить двухконтурную систему управления (рис. 2). Суть построения данной системы заключается в том, что в течение возмущенного переходного процесса в медленнодействующем (верхнем) контуре α в быстродействующем (нижнем) контуре возникает воздействие отклонения $\Delta\alpha$, которое компенсирует влияние α на α_1 .

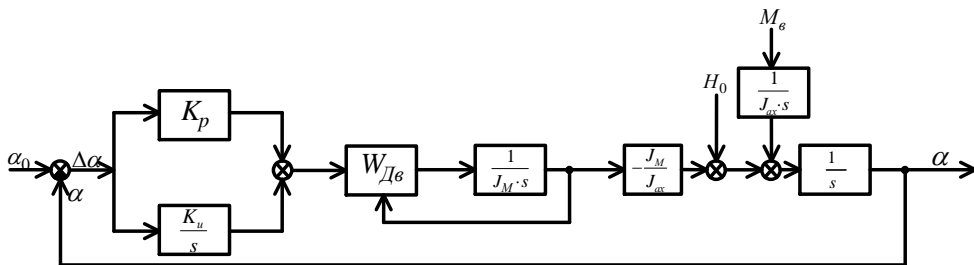


Рис. 1. Структурная схема одноосной системы ориентации КЛА

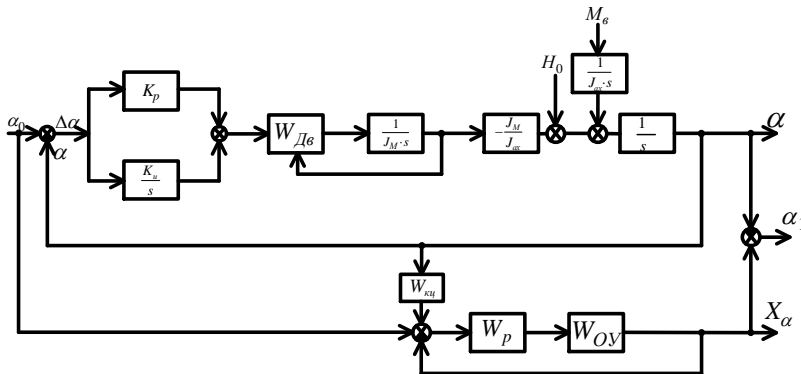


Рис. 2. Исследуемая структурная схема двухконтурной системы управления одноосной активной ориентацией и стабилизацией КА

Построим при помощи имитационной модели Simulink переходный процесс верхнего контура (рис. 3) [3].

В схеме, изображенной на рис. 1, рис. 2 и рис. 4, введены следующие обозначения: α_0 – задающее воздействие; α – выход медленнодействующего контура; X_α – выход быстродействующего контура; α_1, α_2 – выходы двухконтурной системы; W_{kc} – передаточная функция корректирующей цепи; W_{mc} – передаточная функция межконтурного регулятора; K_k – коэффициент коррекции; M_g, H_0 – возмущающие воздействия; K_p – коэффициент передачи пропорционального звена в ПИ-регуляторе; K_u – коэффициент передачи интегрирующего

звена в ПИ-регуляторе; $W_{Дв}$ – передаточная функция двигателя; W_p – передаточная функция регулятора быстродействующего контура; W_{OY} – передаточная функция объекта управления быстродействующего контура; J_m – момент инерции двигателя; J_{ax} – момент инерции космического аппарата относительно оси x .

Начальные условия примем $\alpha_0 = 0,5 \text{ рад}$, $M_e = 0$, $H_x(0) = 0$.

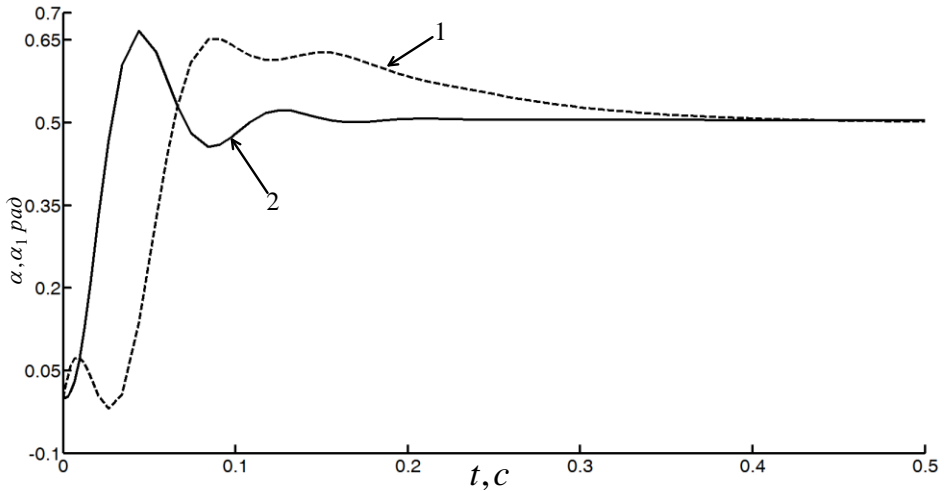


Рис. 3. Сравнение переходных процессов двухконтурной системы управления одноосной активной ориентацией и стабилизацией КА: 1 – по выходу α_1 ; 2 – по выходу α

Отсюда следует, что, как видно из рис. 3, использование структурного решения, основанного на принципе построения двухконтурной системы (условно назовем данную систему двухконтурной системой 1-го типа) (см. рис. 2), не привело к уменьшению времени перехода в установившейся режим (кривая 1). При использовании двухконтурной системы управления 1-го типа с корректирующей цепью (кривая 2) процесс ориентации на заданный угол составляет 0,3 с, но уменьшилось перерегулирование на 2–3 %.

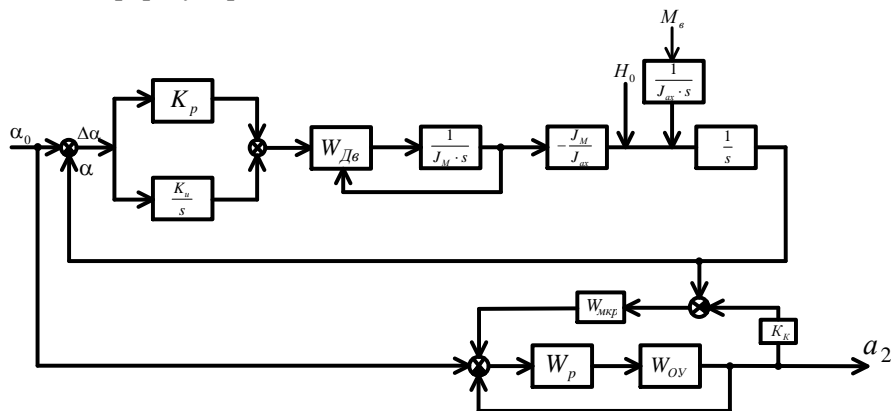


Рис. 4. Исследуемая структурная схема двухконтурной системы управления одноосной активной ориентацией и стабилизацией КА

Рассмотрим двухконтурную систему управления с введением в систему 3-го контура (межконтурной системы координации). Объектом управления третьего контура является уже описанный быстродействующий контур, а источником возмущающего воздействия – медленнодействующий контур. Требуемые динамические характеристики межконтурной связи достигаются оптимизацией параметров вводимого межконтурного регулятора. Структурная схема представлена на рис. 4. В качестве регулятора межконтурной системы координации предлагается выбрать ПИД-регулятор, с которым при появлении скачкообразного возмущающего воздействия в первом контуре обеспечивается компенсация влияния его динамической ошибки на α_2 .

Используя имитационную модель Simulink, построим переходные процессы по выходу α , α_1 , α_2 (рис. 5).

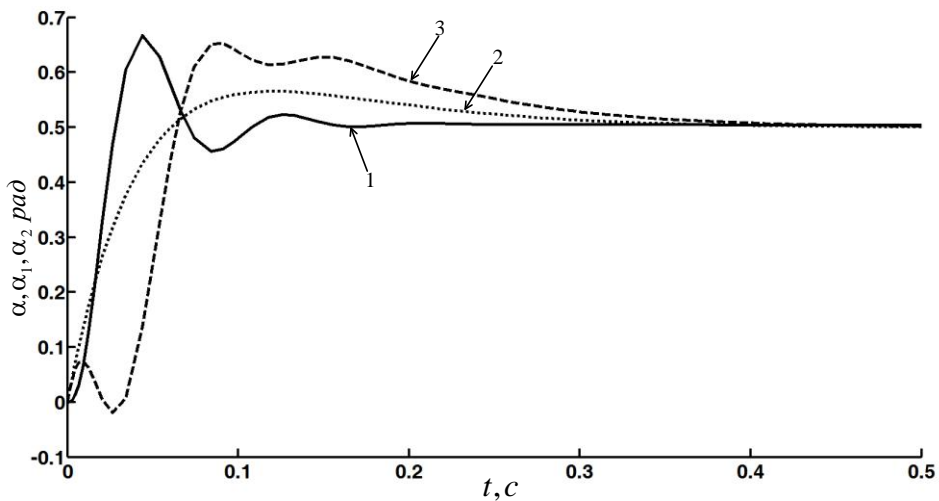


Рис. 5. Сравнение переходных процессов исследуемой двухконтурной системы: 1 – по выходу α ; 2 – по выходу α_1 с применением двухконтурной системы 1-го типа с межконтурными связями; 3 – по выходу α_2 с применением двухконтурной системы 2-го типа с межконтурной системой координации

Таким образом, из семейства переходных характеристик, изображенных на рис. 5, следует, что применение двухконтурной системы управления 2-го типа с межконтурной системой координации привело к улучшению динамических характеристик по выходу одноосной системы ориентации и стабилизации КА. А именно: время переходного процесса осталось прежним и составляет теперь 0,3 с, но зато уменьшилось перерегулирование на 55 %. Из этого следует, что КА будет выходить на заданный угол ориентации за 0,3 с, но со значительно меньшим перерегулированием.

Таким образом, построение двухконтурной системы управления с введением корректирующей цепи и межконтурной системы координации является оправданным.

Управление позиционированием КА по трем координатам

Рассмотрим позиционирование КА по трем координатам. При ориентации КА относительно вращающейся базовой системы отсчета возникают перекрест-

ные связи между каналами управления за счет гироскопических моментов. Эти моменты появляются в результате того, что угловые скорости $\omega_1, \omega_2, \omega_3$ включают соответствующие проекции угловой скорости базовой системы отсчета. Это обуславливает необходимость одновременного рассмотрения процессов управления ориентацией по всем трем осям с учетом перекрестных связей. В дальнейшем предположим, что КА движется по околокруговой орбите [4, 5, 6, 7].

Как известно, движение твердого тела относительно неподвижной точки описывается уравнениями Эйлера, которые в нашем случае применительно к трем осям имеют вид [4, 8]

$$\begin{aligned} J_{ax} \cdot \frac{d\omega_{ax}}{dt} + (J_{az} - J_{ay}) \cdot \omega_{ay} \cdot \omega_{az} &= \sum M_x; \\ J_{ay} \cdot \frac{d\omega_{ay}}{dt} + (J_{az} - J_{ax}) \cdot \omega_{az} \cdot \omega_{ax} &= \sum M_y; \\ J_{az} \cdot \frac{d\omega_{az}}{dt} + (J_{ax} - J_{ay}) \cdot \omega_{ax} \cdot \omega_{ay} &= \sum M_z; \end{aligned} \quad (1)$$

$$\begin{aligned} \sum M_x &= M_{\partial x} + M_{\epsilon x} + M_{\Gamma Px}; \\ \sum M_y &= M_{\partial y} + M_{\epsilon y} + M_{\Gamma Py}; \\ \sum M_z &= M_{\partial z} + M_{\epsilon z} + M_{\Gamma Pz}, \end{aligned} \quad (2)$$

где $M_{\partial x}, M_{\partial y}, M_{\partial z}$ – составляющие внутреннего момента, создаваемого маховиками; $M_{\epsilon x}, M_{\epsilon y}, M_{\epsilon z}$ – составляющие суммарного вектора внешних моментов, исключая гравитационный; $M_{\Gamma Px}, M_{\Gamma Py}, M_{\Gamma Pz}$ – составляющие гравитационного момента.

Систему уравнений (1) нужно дополнить следующими уравнениями:

$$\begin{aligned} \omega_{ax} &= \dot{\epsilon}_1 + \dot{f}(u) \cdot \epsilon_2; \\ \omega_{ay} &= \dot{\epsilon}_2 - \dot{f}(u) \cdot \epsilon_1; \\ \omega_{az} &= \dot{\epsilon}_3 - \dot{f}(u), \end{aligned} \quad (3)$$

где $\epsilon_1, \epsilon_2, \epsilon_3$ – видоизмененные углы Эйлера, которые рассматриваются как функции времени; $f(u)$ – функция аргумента широты [4]. Данные углы являются углами крена, рыскания и тангажа соответственно.

При использовании подвижной базовой системы координат движение КА будем рассматривать в инерциальной системе координат [4, 9].

В случае малых угловых отклонений КА от положения заданной ориентации и их производных после подстановки выражений (3) в (1), заменяя $f(u) = f$ для простоты записи, получим:

$$\begin{aligned}
J_{ax} \cdot \frac{d}{dt} \left(\dot{\varepsilon}_1 + \dot{f} \cdot \varepsilon_2 \right) + (J_{az} - J_{ay}) \cdot \left(\dot{\varepsilon}_2 - \dot{f} \cdot \varepsilon_1 \right) \cdot \left(\dot{\varepsilon}_3 - \dot{f} \right) &= M_{\partial x} + M_{ax} + M_{\Gamma Px}; \\
J_{ay} \cdot \frac{d}{dt} \left(\dot{\varepsilon}_2 - \dot{f} \cdot \varepsilon_1 \right) + (J_{az} - J_{ax}) \cdot \left(\dot{\varepsilon}_3 - \dot{f} \right) \cdot \left(\varepsilon_1 + \dot{f} \cdot \varepsilon_2 \right) &= M_{\partial y} + M_{ay} + M_{\Gamma Py}; \quad (4) \\
J_{az} \cdot \frac{d}{dt} \left(\dot{\varepsilon}_3 - \dot{f} \right) + (J_{ax} - J_{ay}) \cdot \left(\dot{\varepsilon}_1 + \dot{f} \cdot \varepsilon_2 \right) \cdot \left(\dot{\varepsilon}_2 - \dot{f} \cdot \varepsilon_1 \right) &= M_{\partial z} + M_{az} + M_{\Gamma Pz}.
\end{aligned}$$

Опуская промежуточные расчеты, приведенные в [4], дополняя уравнения (4) уравнениями для момента двигателя (5), получим уравнения (6):

$$\begin{aligned}
M_{\partial x} &= -I\Delta \dot{\Omega}_1 - \nu_0 I\Delta \Omega_2 + I\Omega_{30}(\nu_0 \varepsilon_1 - \dot{\varepsilon}_2); \\
M_{\partial y} &= -I\Delta \dot{\Omega}_2 + \nu_0 I\Delta \Omega_1 + I\Omega_{30}(\varepsilon_1 + \nu_0 \varepsilon_2); \\
M_{\partial z} &= -I\Delta \dot{\Omega}_3.
\end{aligned} \quad (5)$$

$$\begin{aligned}
J_{ax} \cdot \ddot{\varepsilon}_1 + \nu_0 \cdot \dot{\varepsilon}_2 (J_{ax} - J_{az} + J_{ay} + I \frac{\Omega_{30}}{\nu_0}) + \nu_0^2 \cdot \varepsilon_1 (4(J_{az} - J_{ay}) - I \frac{\Omega_{30}}{\nu_0}) &= \\
= -k_{M1} I\Delta \dot{U}_1 - k_{M2} \nu_0 I\Delta U_2 + M_{ax}; \\
J_{ay} \cdot \ddot{\varepsilon}_2 - \nu_0 \cdot \dot{\varepsilon}_1 (J_{ay} + J_{az} - J_{ax} + I \frac{\Omega_{30}}{\nu_0}) + \nu_0^2 \cdot \varepsilon_2 (J_{ax} - J_{az} - I \frac{\Omega_{30}}{\nu_0}) &= \\
= -k_{M2} I\Delta \dot{U}_2 + k_{M1} \nu_0 I\Delta U_1 + M_{ay}; \\
J_{az} \cdot \ddot{\varepsilon}_3 + 3\nu_0 \cdot \dot{\varepsilon}_3 (J_{ax} - J_{ay}) = -k_{M3} I\Delta \dot{U}_3 + M_{az}.
\end{aligned} \quad (6)$$

Дополним данные уравнения уравнениями (7) и (8):

$$U = \Delta \varepsilon_i \cdot K_p + \Delta \varepsilon_i \cdot \frac{K_u}{p}; \quad (7)$$

$$\Delta \varepsilon_i = \varepsilon_{0i} - \varepsilon_i. \quad (8)$$

С использованием системы уравнений (6), а также уравнений (7) и (8), и с учетом того, что система разгрузки обеспечивает условие $K_{10} = K_{20} = 0$ [4], была построена многосвязная система, изображенная на рис.6.

В схемах, изображенных на рис. 6 и рис. 7, примем следующие обозначения: ε_1 – выход канала по управлению углом крена; ε_2 – выход канала по управлению углом рыскания; $\varepsilon_{01}, \varepsilon_{02}$ – заданные значения по каждому из каналов; МКР1 и МКР2 – межконтурные регуляторы в гироскопических каналах; $W_{Дв}$ – передаточная функция двигателя. Зададимся начальными условиями, например $\varepsilon_{01} = 0,5 \text{ рад}$, $\varepsilon_{02} = 1,3 \text{ рад}$, которые подавались на задающие входы многосвязной системы; на входы возмущающих воздействий подавался ноль. Оптимальные параметры ПИ-регулятора (УУ в схеме на рис. 6 и рис. 7) в каналах крена и рыскания определены при помощи средств библиотеки Matlab: Simulink De-

sign Optimization. Для канала крена $k_p = -12344.6, k_i = -233.303$, рыскания – $k_p = -26835.1, k_i = -52837.6$.

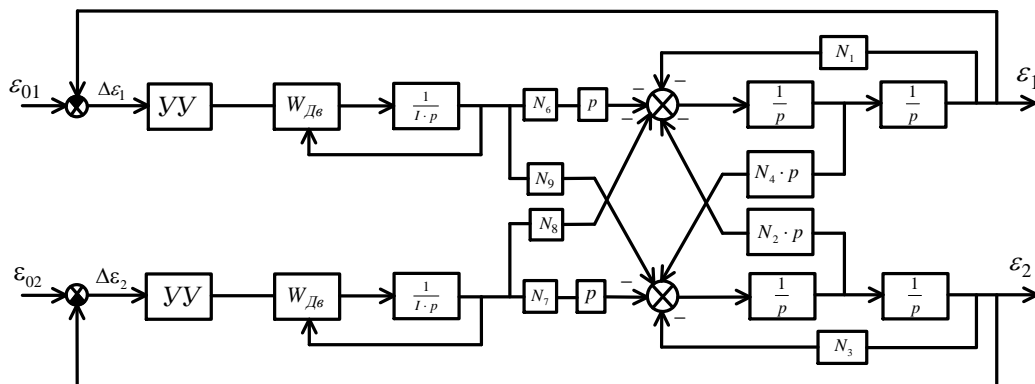


Рис. 6. Структурная схема многосвязной системы управления КЛА с межконтурными регуляторами

После нормализации уравнений (6) коэффициенты в схеме примут вид

$$\begin{aligned}
 N_1 &= \frac{v_0^2 \left(4(J_{az} - J_{ay}) - I \frac{\Omega_{30}}{v_0} \right)}{J_{ax}}; & N_2 &= \frac{v_0 \left(J_{ax} - J_{az} + J_{ay} + I \frac{\Omega_{30}}{v_0} \right)}{J_{ax}}; \\
 N_3 &= \frac{v_0^2 \left(J_{ax} - J_{az} - I \frac{\Omega_{30}}{v_0} \right)}{J_{ax}}; & N_4 &= \frac{v_0 \left(J_{ay} + J_{az} - J_{ax} + I \frac{\Omega_{30}}{v_0} \right)}{J_{ax}}; \\
 N_5 &= \frac{3v_0 \cdot (J_{ax} - J_{ay})}{J_{ax}}; & N_6 &= \frac{1}{J_{ax}}; & N_7 &= \frac{1}{J_{ax}}.
 \end{aligned} \tag{9}$$

Для повышения эффективности динамических показателей многосвязной системы (рис. 6) предлагается использовать межконтурные регуляторы с ПИ- и ПИД-законом регулирования в гироскопических связях (рис. 7).

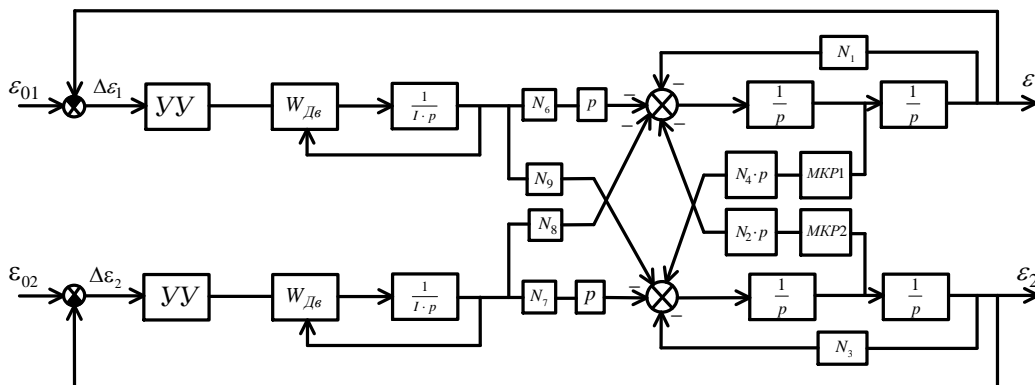


Рис. 7. Структурная схема многосвязной системы управления КЛА с межконтурными регуляторами

Проведены исследования данной многосвязной системы на имитационной модели, построенной в Simulink, с применением межконтурных ПИ- и ПИД-регуляторов в гироскопических каналах. Результаты исследования приведены на рис. 8 и рис. 9.

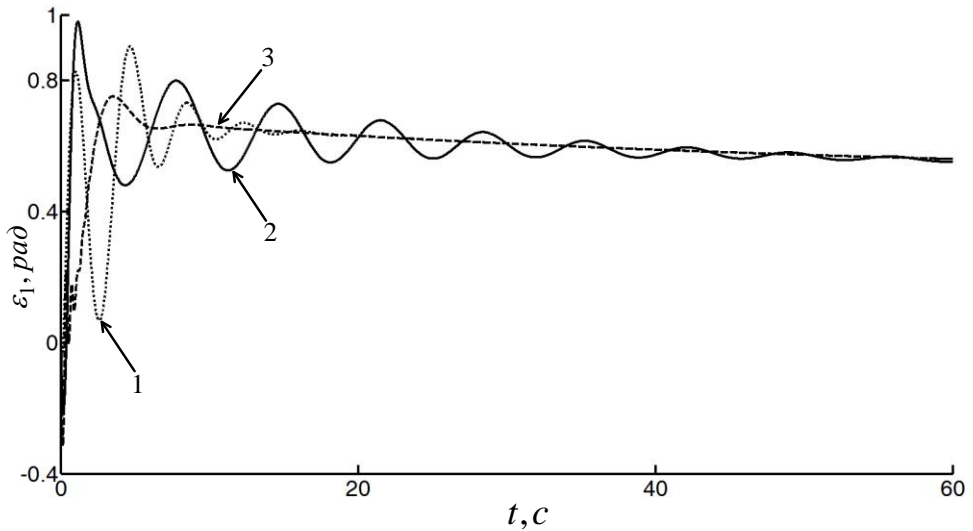


Рис. 8. Переходный процесс по каналу крена: 1 – с использованием ПИ МКР; 2 – без использования МКР; 3 – с использованием ПИД МКР

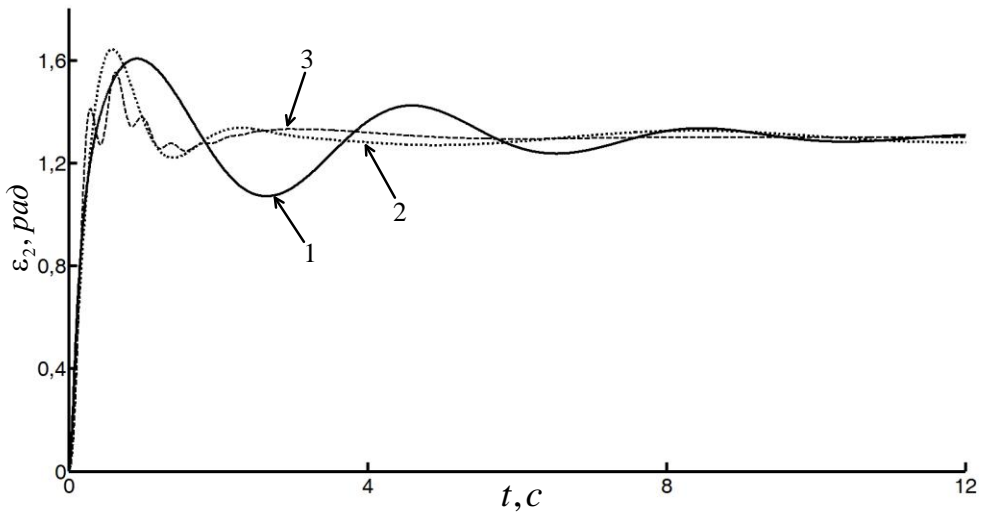


Рис. 9. Переходный процесс по каналу рыскания: 1 – с использованием ПИ МКР; 2 – без использования МКР; 3 – с использованием ПИД МКР

Вывод: после проведенных исследований для многосвязной системы управления КА можно дать следующие рекомендации. Для достижения наилучшего качества управления системой ориентации и стабилизации КА рекомендуется использовать в гироскопических связях межконтурные регуляторы с ПИД-

законом регулирования. Оптимальная схема включения: одновременное использование МКР1 и МКР2.

В заключение можно отметить, что предложенные структуры и регуляторы в них подтвердили работоспособность. Приведенные семейства динамических характеристик доказывают эффективность применяемых структур и их высокое быстродействие.

БИБЛИОГРАФИЧЕСКИЙ СПИСОК

1. Чостковский Б.К., Колпацников С.А. Синтез цифрового регулятора терминальной системы позиционирования динамического объекта // Актуальные проблемы ракетно-космической техники и ее роль в устойчивом социально-экономическом развитии общества: I Козловские чтения. – 2009. – С. 96-98.
2. Денисов В.Ю., Чостковский Б.К. Двухконтурная система управления обобщенным параметром // Вестник Самарского государственного технического университета. – 2012. – Вып. 36.
3. Андриевский Б.Р., Фрадков А.Л. Избранные главы теории автоматического управления с примерами на языке MATLAB. – СПб.: Наука, 2000. – 475 с.
4. Алексеев К.Б., Бебенин Г.Г. Управление космическими аппаратами. – М.: Машиностроение, 1974. – 340 с.
5. Мельников В.Н. Управление ориентацией космического аппарата. Обзор. – М., 2011.
6. Белецкий В.В. Движение искусственного спутника Земли относительно центра масс. – М.: Наука, 1965. – 416 с.
7. Петров В.П. Ориентация в космосе // Наука и жизнь. – 1958. – № 9. – С. 7-12.
8. Бухгольц Н.Н. Основной курс теоретической механики. Ч. 2. – М.: Наука, 1966. – 332 с.
9. Гавриленко О.И., Резникова О.В., Лученко О.А. Оптимальная система стабилизации космического летательного аппарата с электромаховичными исполнительными органами // Авиационно-космическая техника и технология. – 2006. – № 6 (32).

Статья поступила в редакцию 2 октября 2014 г.

POSITIONING CONTROL SATELLITE

B.K. Chostkovsky¹, V.U. Denisov²

¹ Samara State Technical University
244, Molodogvardeyskaya st., Samara, 443100, Russian Federation

² Samara Space Center "Progress"
18, Zemetza St., Samara, 443009, Russian Federation

Use of structural solutions to control of monoaxial and triaxial positioning system of satellite. One investigate the problem of application of intercontour regulators in a multivariable control system. The methods of synthesis of monoaxial and triaxial systems orientation. One solve the problem of improving the dynamic characteristic by introduction a correcting circuit for monoaxial coordination system; intercontour regulators introduced in gyroscopic channels of multivariable control system of positioning in three coordinates .

Keywords: *multivariable control system, optimization c regulators, satellite , positioning, orientation and stabilization system, double-loop control system.*

*Boris K. Chostkovsky (Dr. Sci. (Techn.)), Professor.
Vladimir U. Denisov, Engeneer.*