СБОРНИК МАТЕРИАЛОВ КОНФЕРЕНЦИИ

Федеральное агентство по образованию и науке

Московский энергетический институт
(технический университет)

Филиал Московского энергетического института
(технического университета) в г. Волжском

РЕСУРСО-ЭНЕРГОСБЕРЕЖЕНИЕ И ЭКОЛОГО-ЭНЕРГЕТИЧЕСКАЯ БЕЗОПАСНОСТЬ ПРОМЫШЛЕННЫХ ГОРОДОВ

ВСЕРОССИЙСКАЯ НАУЧНО-ПРАКТИЧЕСКАЯ КОНФЕРЕНЦИЯ

г. Волжский
26 – 28 сентября 2006 г.

ФЕДЕРАЛЬНОЕ АГЕНТСТВО ПО ОБРАЗОВАНИЮ И НАУКЕ

Московский энергетический институт
(технический университет)

Филиал Московского энергетического института
(технического университета) в г. Волжском

РЕСУРСО-ЭНЕРГОСБЕРЕЖЕНИЕ И ЭКОЛОГО-ЭНЕРГЕТИЧЕСКАЯ БЕЗОПАСНОСТЬ ПРОМЫШЛЕННЫХ ГОРОДОВ

ВСЕРОССИЙСКАЯ НАУЧНО-ПРАКТИЧЕСКАЯ КОНФЕРЕНЦИЯ

г. Волжский
26 – 28 сентября 2006 года

Сборник научных статей

Волжский **Филиал ГОУВПО «МЭИ (ТУ)»** **2007**

УДК 621.3+621.37[(043.2)]
ББК 65.304.14

Организационный комитет:

Скибицкий Н.В. (председатель), Андрюшин А.В., Васильев П.Д., Воронов В.Н., Гончарова Л.К., Грошев А.И., Капля Е.В., Кузеванов В.С. (сопредседатель), Ладыгин И.И., Раменский П.П. (сопредседатель), Седлов А.С., Шевчук В.П., Шилин А.Н., Цырук С.А.

Ресурсо-энергосбережение и эколого-энергетическая безопасность промышленных городов: Материалы Всероссийской научно-практической конференции / Сборник научных статей. – Волжский: Филиал ГОУ ВПО «МЭИ (ТУ)» в г. Волжском, 2007. – 282 с.

ISBN 5-94721-032-0

В сборник вошли статьи, отражающие основное содержание докладов, представленных на конференцию. Освещены актуальные проблемы теплоэнергетики, электроэнергетики, электротехники и электромеханики, моделирования объектов энергетики, информационных технологий в энергетике, управляющих систем в энергетике, технических и программных средств автоматизации.
Публикуемые материалы предназначены для научных работников, административных работников энергетической отрасли, энергетиков-практиков, аспирантов, студентов. Сборник может быть полезен и для преподавателей вузов и инженеров, интересующихся указанными выше направлениями науки и техники.
Сохранена авторская редакция.

УДК 621.3+621.37[(043.2)]
ББК 65.304.14

ISBN 5-94721-032-0

© Авторы, 2007
© Филиал ГОУ ВПО «МЭИ (ТУ)» в г. Волжском, 2007

ВВЕДЕНИЕ

В настоящем сборнике опубликованы материалы Всероссийской научно-практической конференции по тематике, традиционной для организуемых на базе филиала Московского энергетического института (технического университета) в г. Волжском форумов. По сути, проведение Всероссийской конференции вместо очередной межрегиональной конференции отражает требование времени.

По-прежнему в центре нашего внимания комплекс важных проблем теплоэнергетики, электроэнергетики и электротехники, а также вопросы внедрения в производство передовых технологий, систем управления, вопросы экологической и энергетической безопасности.

Важным шагом к реальному взаимодействию науки и производства явилось проведение в рамках конференции круглого стола. Продуктивная дискуссия привела при этом к выработке следующего решения.

РЕШЕНИЕ

28 сентября 2006 г.

В период с 25 сентября по 28 сентября в городе Волжском проходила Всероссийская научно-практическая конференция

«РЕСУРСО-ЭНЕРГОСБЕРЕЖЕНИЕ И ЭКОЛОГО-ЭНЕРГЕТИЧЕСКАЯ БЕЗОПАСНОСТЬ ПРОМЫШЛЕННЫХ ГОРОДОВ»

В конференции приняло участие более 100 человек.

Из них 25 человек иногородних, представляющих научное сообщество городов: Волгоград, Воронеж, Москва, Комсомольск, Иваново и других.

Состоялась плодотворная работа шести секций конференции, проведен круглый стол с участием представителей генерирующей компании с обсуждением региональных проблем в рамках темы конференции.

В результате обсуждения докладов на секциях конференции и на круглом столе принято следующее решение:

1. Генерирующим предприятиям Волгоградской области рекомендуется предусмотреть мероприятия с выделением в плановом порядке ресурсов по внедрению передовых информационных технологий и новых информационно-измерительных систем.

2. Филиалу Московского энергетического института (технического университета) в г. Волжском интенсифицировать внедрение на производстве научных разработок в области создания интеллектуальных измерительных систем.

3. Филиалу Московского энергетического института (технического университета) в г. Волжском активно взаимодействовать с предприятиями – потребителями кадров – в части совершенствования учебных планов специальностей и рабочих программ дисциплин по предложениям предприятий с целью повышения качества подготовки выпускаемых специалистов для генерирующих и энергопотребляющих предприятий области.

4. Сохранить сложившуюся традицию проведения конференции по представленной тематике один раз в два года, определив время проведения следующей научно-практической конференции – сентябрь 2008 года.

Председатель оргкомитета Н.В. Скибицкий

Сопредседатель оргкомитета П.П. Раменский

Сопредседатель оргкомитета В.С. Кузеванов

ПЛЕНАРНЫЕ ДОКЛАДЫ

АНАЛИЗ МЕТОДОВ И СРЕДСТВ ПЕРЕДАЧИ ИНФОРМАЦИИ В ЭНЕРГЕТИКЕ

А.Н. Шилин – д-р техн. наук, профессор
Волгоградского государственного технического университета
Ю.А. Дубина – аспирант
Волгоградского государственного технического университета
С.А. Иванников – аспирант
Волгоградского государственного технического университета

ВВЕДЕНИЕ

Переход экономики России на рыночные методы хозяйствования предъявляет жесткие требования к достоверности и оперативности учета электрической энергии. Эти требования могут быть удовлетворены только путем создания автоматизированных систем коммерческого учета электроэнергии (АСКУЭ). В рыночных условиях этап реализации электроэнергии является ключевым как для энергосистемы, так и для потребителей. Кроме функций учета электроэнергии, с помощью АСКУЭ возможно также осуществлять контроль и управление электропотреблением на предприятиях. Основной экономический эффект от внедрения АСКУЭ состоит для потребителя в уменьшении платежей за использованную энергию, а для энергетической компании – в снижении пиков потребления и уменьшении капиталовложений на наращивание пиковых генерирующих мощностей.

СОСТАВ И СХЕМА АСКУЭ

Система АСКУЭ включает измерение электрической энергии, местную обработку и сохранение данных, передачу их в удаленный счетный центр, а также обработку и надежное сохранение результатов измерения в центре (рис. 1). Система может содержать практически неограниченное количество узлов учета (счетчиков электрической энергии), единственным ограничением является пропускная способность дистанционных каналов связи и емкость центральной вычислительной системы.

Для передачи данных в учетный центр могут быть использованы коммутируемые каналы связи, выделенные каналы тональной частоты (в том числе, организуемые по высоковольтным линиям электропередач), физические двухпроводные линии, УКВ-радиосвязь, GSM-связь (в каждом из случаев должны использоваться специализированные модемы). При проектировании информационно-измерительных систем возникает проблема выбора каналообразующего оборудования. Выбор этот достаточно широк. При анализе рассмотрим все возможные способы построения канала связи: два беспроводных – радиосвязь и лазерная связь, и три проводных – на основе медного, волоконно-оптического кабеля и с использованием силовых линий.

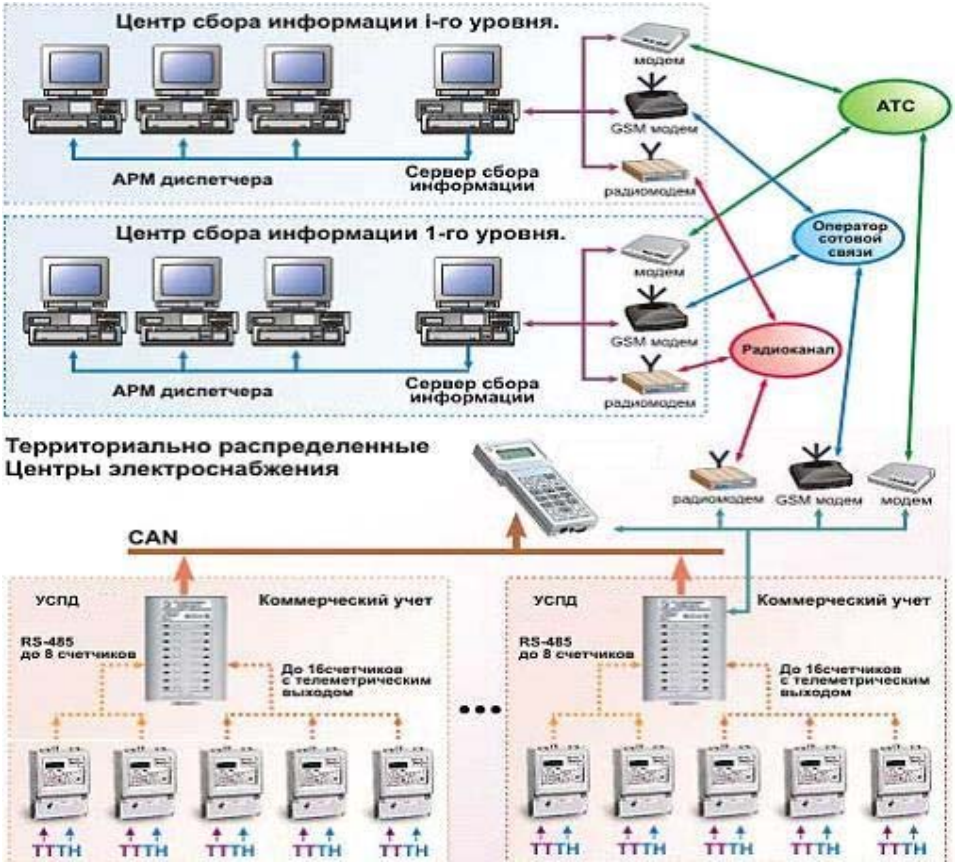


Рис. 1. Состав и схема АСКУЭ

МЕДНЫЙ КАБЕЛЬ

В качестве среды для передачи информации некоторые компании используют обычный медный кабель (витые пары). Модемы для выделенных физических линий при значительной дальности (5-30 км) имеют невысокую скорость передачи (до 160 Кбит/с). Оборудование обеспечивает скорость 2 Мбит/с по двум медным витым парам. Однако при значительном удалении пользователей друг от друга (свыше 1,5-2,2 км) необходимы ретрансляторы. Чем их больше, тем дороже канал связи. Качество и скорость передачи таких трактов являются невысокими. Согласно заявленным техническим характеристикам частота появления ошибочных битов имеет порядок 10-7 (хотя, по мнению практиков, и это значение занижено), то есть она значительно выше, чем у ВОЛС.

ТЕХНОЛОГИИ HDSL

Следует отметить, что сегодня существует целый ряд технологий, обеспечивающих высокоскоростную передачу трафика по линиям связи на основе медного кабеля. Для уплотнения абонентских и соединительных линий используется аппаратура HDSL, для которой не надо подбирать параметры провода и можно воспользоваться витыми парами уже проложенного кабеля (в зависимости от типа аппаратуры требуется от двух до четырех пар). Технология HDSL предусматривает новый способ кодировки, позволяющий

исключить взаимное влияние потоков информации, идущих в прямом и обратном направлениях, а также наводки на аналоговые сигналы в соседних парах. По данным фирм-производителей оборудования, созданного на основе технологии HDSL, эта технология обеспечивает величину BER порядка 10-10. Проводимые в России эксплуатационные испытания оборудования HDSL показали значительное увеличение дальности передачи потоков E1 (зависит от диаметра жилы кабеля) по сравнению с дальностью, обеспечиваемой аппаратурой ИКМ30. Однако такие испытания проводились при фиксированном коэффициенте BER, равном 10-6. HDSL – перспективная технология, но техническое состояние наших телефонных линий не позволяет в полной мере использовать все ее достоинства.

ТЕХНОЛОГИЯ PLC

Технология Power Line Communication (PLC) разработана для силовых сетей низкого (180-400 В) и среднего (4-60 кВ) напряжения и является альтернативой сетям Ethernet и HDSL. Заявлено, что в электросетях реально достижимым является быстродействие на уровне 14-200 Мбит/с. Поскольку среда для передачи сигнала разделяема, то указанная полоса пропускания распределяется между всеми пользователями. Поэтому без регенерации при современном уровне развития PLC информационные сигналы сравнительно быстро затухают и, как следствие, протяженность абонентской линии не может превышать 0,5 км, но даже при таких расстояниях скорость передачи сигнала заметно падает. Абонентские устройства PLC по сути являются специализированными модемами с разделительными фильтрами, позволяющими отсекать сетевые помехи. Они снабжены наборами стандартных интерфейсов типа USB, RS-232 RJ-45 и Ethernet для подключения различных терминалов сети передачи данных.

Основными преимуществами технологии PCL являются:

– экономия кабеля для передачи информационных сигналов;

– для подключения этой системы не требуется согласований с контролирующими инстанциями (провайдеру PLC-сети необходимо получить только разрешение от электроснабжающей компании);

– при переносе устройств внутри локальной PLC-сети не требуются дополнительные настройки;

– электрическая сеть – идеальная среда передачи управляющих сигналов между бытовыми приборами и передачи данных с датчиков охранной сигнализации (реализация идеи «умного дома»).

Основными недостатками технологии PCL являются:

– высокий коэффициент затухания при передаче информационных сигналов по бытовой электросети (объекты в локальной PLC-сети можно располагать на расстоянии 50-150 м друг от друга, а общая протяженность линии не должна превышать 300 м);

– влияние сетевых помех на работу PLC-сети;

– электрическая сеть при передаче высокочастотных сигналов является генератором помех;

– отсутствие отраслевых стандартов на новую технологию – PLC-сеть;

– электроснабжающие компании не гарантируют помехоустойчивости и качества передачи информационных сигналов;

– возможность работы только в однофазной сети.

ВОЛОКОННО-ОПТИЧЕСКИЕ ЛИНИИ СВЯЗИ

При использовании волоконно-оптических линий связи (ВОЛС) обеспечиваются высокие качество (частота появления ошибочных битов (BER) меньше 10-10) и скорость (ограничена только скоростью используемого интерфейса) передачи, но, к сожалению, эти линии еще достаточно дороги. Так, стоимость прокладки километра волоконно-оптического кабеля в черте города может составить в среднем 6-10 тыс. долл. Поэтому наиболее перспективным является использование ВОЛС в качестве магистралей для связи сегментов ЛВС. Волоконно-оптический кабель позволит увеличить пропускную способность сети и сделать ее максимально «прозрачной» для различных протоколов. Однако высокая стоимость его прокладки ограничивает использование ВОЛС.

РАДИОСВЯЗЬ

В настоящее время для беспроводного обмена информацией широко применяются радиорелейные линии и радиомодемы. Предельный радиус действия беспроводных радиоканалов – 80 км (без использования ретрансляторов). Радиорелейные линии работают в диапазоне частот до 60 ГГц и обеспечивают скорость передачи от 2 до 34 Мбит/с и выше. В корпоративных сетях более популярны радиомодемы. Различают радиомодемы, работающие в узком (narrow band) и широком (spread spectrum) спектре частот. Для радиомодемов первого вида характерны диапазон частот до 1 ГГц и скорость передачи до 128 Кбит/с, а для радиомодемов второго вида – диапазон частот до 5,85 ГГц и скорость передачи до 2 Мбит/с. Однако при использовании радиомодемов и радиорелейных линий возникает проблема, связанная с искажением или даже потерей сигнала из-за засоренности радиоэфира. К тому же само радиооборудование является источником помех. Для повышения качества связи производители вынуждены идти на различные ухищрения, но, несмотря на это, проблемы остаются. Нельзя забывать и о трудностях, связанных с получением лицензии на использование радиоканала.

БЕСПРОВОДНАЯ ЛАЗЕРНАЯ СВЯЗЬ

Сейчас интенсивно развивается технология беспроводной связи – лазерная. Она имеет бесспорное преимущество перед радиосвязью при организации беспроводных мостов («точка-точка») на расстоянии до 1,2 км.

Цены на оборудование лазерной связи имеют тот же порядок (а зачастую и ниже), что и цены на радиооборудование.

В пользу лазерной технологии свидетельствуют следующие характеристики систем лазерной связи:

– скорость передачи данных до 155 Мбит/с;

– частота появления ошибочных битов (BER) от 10-10 до 10-9;

– поддержка большинства сетевых интерфейсов (Ethernet, Token Ring, ATM, FDDI, Fast Ethernet и т.д.);

– наличие электрических и (или) волоконно-оптических устройств сопряжения для подвода сетевого трафика к лазерному приемопередатчику;

– наличие комбинированного интерфейса для передачи трафика телефонной сети и ЛВС без применения дополнительного мультиплексора.

Таблица

Сравнительный анализ основных технологий передачи данных

	Медный кабель	**PCL**	**Волоконно-оптический кабель**	**Радиоканал**	**Лазерный канал**
Ориентировочная стоимость	300-500 дол. за 1 км	120 дол. за комплект	до 5-6000 дол. за 1 км	7-100 тыс. дол. за комплект	5-22 тыс. дол. за комплект
Время на подготовку и выполнение монтажа	Подготовка работ и прокладка – до 1 месяца; установка HDSL-модемов – несколько часов	Установка 2-3 часа	Подготовка работ и прокладка 1-2 месяца	Установка – несколько часов	Установка – несколько часов
Максимальная пропускная способность	До 2 Мбит/с при использованием HDSL	До 200 Мбит/с	До 155 Мбит/с	До 155 Мбит/с	До 155 Мбит/с
Максимальная дальность связи без повторителей	До 20 км при использовании HDSL	До 0.5 км	Не менее 50-70 км	До 80 км (зависит от мощности сигнала)	До 1,2 км
Защищенность канала	Необходимо использование протоколов шифрования информации	Необходимо использование протоколов шифрования информации	Необходимо использование протоколов шифрования информации	Необходимо использование протоколов шифрования информации	Возможна передача данных без шифрования за счет узкой направленности канала

ВЫВОДЫ

Выбор того или иного типа оборудования (если он вообще возможен) зависит от многих факторов. Основными являются стоимость оборудования и время, затрачиваемое на его установку (при этом, конечно, необходимо, чтобы выбранное оборудование обеспечивало потребности на текущий момент и, возможно, в перспективе), что особенно важно при наблюдаемой сегодня динамике роста корпоративных сетей и количества абонентов телефонных сетей.

Лучший вариант для проводной связи (особенно при наличии уже проложенного силового кабеля) – применение оборудования PCL. При этом получается выигрыш и в цене и во времени, а также вы автоматически избавляетесь от необходимости прокладки дополнительных коммуникаций. Аппаратура HDSL обладает высокими адаптивными свойствами и неприхотлива к параметрам медного провода, однако качество передачи может зависеть от его состояния и изменяться на несколько порядков. Если же для организации ближней связи необходимо воспользоваться беспроводным оборудованием, то преимущество здесь будет на стороне лазерной связи. Оборудование для лазерной связи стоит меньше радиооборудования и, кроме того, в этом случае нет необходимости в получении разрешения на использование частоты. Лазерная связь является альтернативой радио-, кабельной и волоконно-оптической связи. Лазерные системы позволяют создать канал связи между двумя зданиями, находящимися на расстоянии до 1,2 км друг от друга, и передавать по нему телефонный трафик (скорость от 2 до 34 Мбит/с), данные (скорость до 155 Мбит/с) или их комбинацию. В отличие от беспроводных радиосистем лазерные системы связи обеспечивают высокие помехозащищенность и секретность передачи, так как получить несанкционированный доступ к информации можно только непосредственно от приемопередатчика. Компания, которая воспользуется лазерной связью для создания основного (резервного) канала ближней связи, избавится не только от необходимости прокладывать новые проводные коммуникации, но также и от необходимости получать разрешение на право пользования радиочастотой. Кроме того, невысокий уровень затрат на организацию высокопроизводительного канала связи, а также небольшое время его ввода в эксплуатацию обеспечат быструю окупаемость вложенных средств.

АЛГОРИТМ ФОРМИРОВАНИЯ ТЕХНИЧЕСКИХ РЕШЕНИЙ ЭНЕРГОУСТАНОВОК

А.А. Яковлев – канд. техн. наук, доцент
Волгоградского государственного технического университета

Одним из путей повышения качества проектов технических систем является формирование на стадии технического предложения множества альтернативных технических решений и выбор из них наиболее перспективного варианта для последующей реализации в виде некоторой конструкции. Чем больше число исследованных вариантов, тем выше вероятность создания проекта с форсированным уровнем качества.

Традиционным решением является разработка морфологических таблиц. Их атрибуты заполняются описаниями альтернативных элементов, а затем из них формируются возможные технические решения. Однако определение атрибутов таблицы является нетривиальной задачей, и успех ее решения во многом зависит от опыта и интуиции проектировщика. Другим недостатком

такого подхода является неработоспособность части получаемых решений из-за функциональной несовместимости включенных в таблицу элементов.

В работах [1, 3] описан метод, позволяющий научно обосновывать структуры энергоустановок (ЭУ) – технических систем для преобразования одного вида энергии в другой – путем построения модели физического принципа действия (ФПД), определяющей их конструктивную организацию [2]. Модель предназначена для разработки на основе ее анализа матрицы, содержащей множество возможных технических решений ЭУ.

Рассматриваемый подход основан на создании таблиц (матриц соответствия) [1], ячейки которых указывают на соответствие каждого конструктивного элемента выполняемым им элементарным функциям в конструкции ЭУ. Заголовок такой таблицы содержит список выявленных из модели ФПД элементарных функций. Множество технических решений получается путем подбора различных комбинаций конструктивных элементов так, чтобы получить из них наборы, выполняющие все специфицированные функции. Даже при сравнительно небольшом объеме информации без использования ЭВМ нельзя найти все возможные варианты технических решений и оценить их.

Исходные данные для формирования списков возможных технических решений можно представить в виде следующей структуры:

$$< A, F, P, E >,$$

где A – множество описаний конструктивных элементов, из которых формируются технические решения; F – множество функций, выявленных при анализе модели ФПД; P – множество показателей качества для оценки получаемых технических решений; E – множество наборов экспертных оценок конструктивных элементов по каждому показателю качества.

Выходные данные. Техническое решение двигателя представляется списком конструктивных элементов A_k. Поскольку список формируется в оперативной памяти ЭВМ, то в узлах списка можно хранить только указатели (ссылки) на описания конструктивных элементов. Узел *списка элементов* имеет следующую структуру:

$$N_{el} = < p_e, p_{se} >,$$

где p_e – указатель на описание конструктивного элемента; p_{se} – указатель на следующий узел списка элементов.

Итоговый *список технических решений* представляется как множество узлов типа:

$$N_{td} = < E_{sum}, p_{se0}, p_{st} >,$$

где E_{sum} – множество суммарных значений экспертных оценок конструктивных элементов по каждому показателю качества; p_{se0} – указатель на начало списка элементов, входящих в данное техническое решение; p_{st} – указатель на следующий узел списка технических решений.

На рисунке показано графическое представление формируемого в памяти ЭВМ списка технических решений ПЭ, с указанием на соответствующие им списки элементов и множество описаний конструктивных элементов.

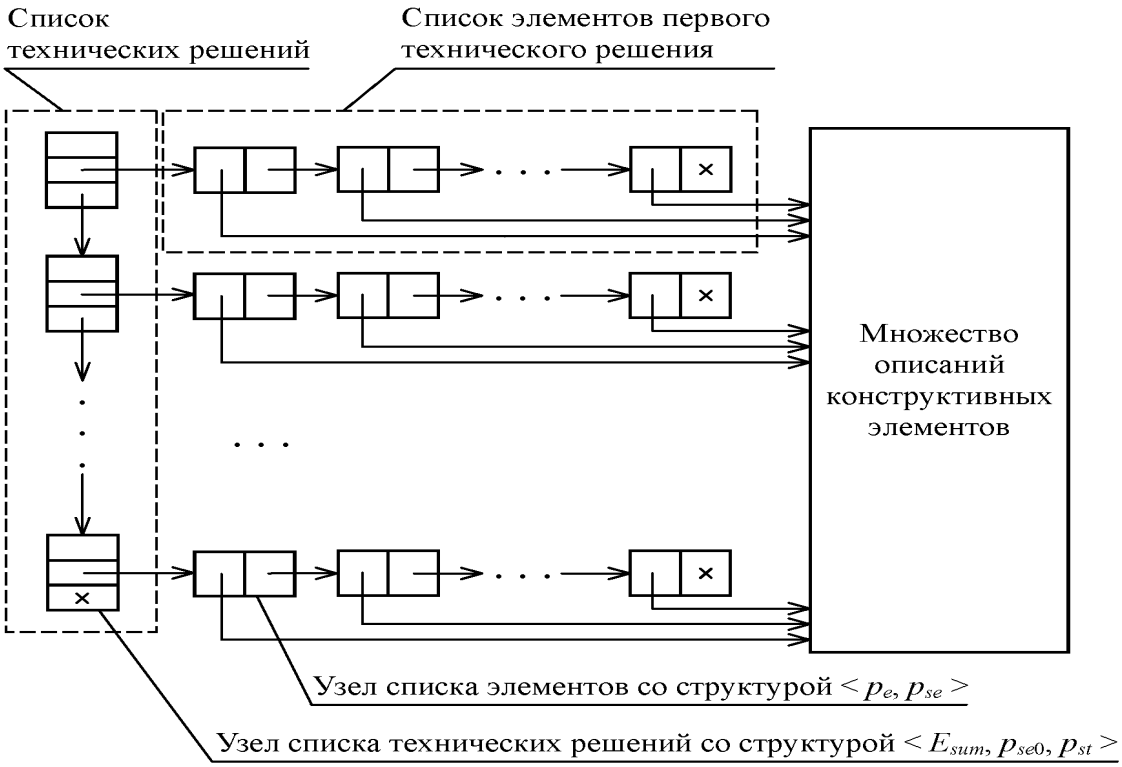


Рисунок – Графическая иллюстрация списка технических решений преобразователей энергии, формируемого в памяти ЭВМ

Формирование списка возможных технических решений преобразователей реализуется в два этапа.

Этап 1. *Формирование начального списка технических решений.*

Осуществляется просмотр множества конструктивных элементов, и находятся элементы, выполняющие первую из требуемых элементарных функций. Для каждого найденного элемента в динамической памяти ЭВМ выделяется память под узел списка элементов и под узел списка технических решений. В поле p_e узлов списков элементов заносятся указатели на ячейки памяти, где хранятся описания соответствующих конструктивных элементов. В поле p_{se0} узлов списка технических решений заносятся значения указателей на первые узлы списков элементов.

Этап 2. *Формирование списка технических решений.*

Эта часть алгоритма является циклом обработки каждого из узлов списка технических решений. Список элементов технического решения доступен через указатель p_{se0}. Во время каждой итерации проверяются выполняемые списком элементарные функции. Если все функции выполняются, происходит переход к следующей итерации и обрабатывается следующий узел списка

технических решений. В противном случае осуществляется поиск конструктивных элементов, которые совместимы с уже входящими в список (множество функций, выполняемых списком элементов, не должно пересекаться с множеством функций включаемого в список элемента).

Для каждого найденного элемента, который удовлетворяет условию совместимости с остальными элементами, выделяется память под новый узел списка элементов и новый узел списка технических решений. Затем из памяти удаляется обработанный узел списка технических решений и начинает обрабатываться следующий. Цикл заканчивается, когда будут проверены все узлы списка.

Во время выполнения операторов цикла необходимо удалять узлы списка технических решений не только из начала списка, но и из середины. Во втором случае, чтобы настраивать указатели на следующие узлы списка, значения указателей предыдущего узла сохраняются в переменной, которая перед началом цикла инициализируется значением указателя на начало списка.

Для проверки работоспособности алгоритма был разработан программный модуль, который позволяет получить полный список возможных технических решений для заданной модели ФПД. В результате его работы формируется значительное количество технических решений. Например, в таблице, приведенной в работе [1], содержится 81 тыс. вариантов. Консольному приложению на компьютере с процессором «Pentium IV» (2,4 ГГц) требуется около получаса для того, чтобы сформировать полный список технических решений.

Выбор наиболее перспективных вариантов может осуществляться, например, с помощью аддитивного критерия, объединяющего все выходные показатели в одну целевую функцию, представляющую собой взвешенную сумму экспертных оценок по каждому частному критерию качества:

$$F = \sum_{i=1}^{n} k_i e_i ,$$

где k_i – весовой коэффициент; n – количество показателей качества; e_i – сумма экспертных оценок конструктивных элементов, входящих в техническое решение, по i-му показателю качества.

Алгоритм позволяет сопоставить каждому элементу, входящему в техническое решение, свой набор элементарных функций. Это позволяет осуществлять с помощью ЭВМ обработку патентной и другой научно-технической информации для получения множества возможных технических решений, среди которых можно выбрать самые перспективные конструкции преобразователей энергии.

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. *Яковлев А.А.* Инженерно-физический подход к проектированию преобразователей энергии // Справочник. Инженерный журнал. – 2006. – № 2. С. 32-38.

2. *Яковлев А.А.* Инженерно-физический метод синтеза концептуальных технических решений преобразователей энергии: монография / Волгоград. гос. техн. ун-т. – Волгоград, 2004. – 160 с.

КОНЦЕПЦИЯ ПОСТРОЕНИЯ АВТОМАТИЗИРОВАННОЙ СИСТЕМЫ УПРАВЛЕНИЯ ТЕХНОЛОГИЧЕСКИМИ ПРОЦЕССАМИ (АСУ ТП) НА ПОДСТАНЦИЯХ ОАО «МОЭСК»

С.В. Хомицкий – канд. техн. наук
ОАО «Энергосервиспроект», г. Москва

ОАО «Московская объединенная электросетевая компания» (ОАО «МОЭСК») является одной из крупнейших в России электросетевых компаний, имеющей в своем составе около 640 подстанций напряжением 35, 110 и 220 кВ. В рамках реформирования РАО ЕЭС возник ряд новых требований по организации систем управления как на уровне подстанций, так и на уровне предприятий электрических сетей (ПЭС).

1. ПРИНЦИПЫ МОДЕРНИЗАЦИИ И РЕКОНСТРУКЦИИ СИСТЕМ УПРАВЛЕНИЯ ПОДСТАНЦИЙ

1. *Для подстанций, на которых установлены современные АСУ ТП*

Для интеграции АСУ ТП в ОИК АСДУ необходимо организовать информационный обмен между АСУ ТП и ОИК ПЭС с требуемым количеством сигналов и скоростью передачи данных.

2. *Для подстанций, не оснащенных АСУ ТП*

На подстанциях с морально и физически устаревшими средствами диспетчерского управления необходима их ликвидация и замена на современные. В первую очередь необходимо сосредоточить усилия на магистральных и узловых подстанциях 220-110 кВ.

3. *Для подстанций, включенных в план реконструкции основного оборудования или строительства новых*

Построение АСУ ТП подстанции закладывается в обязательном порядке.

1.1. Общие требования к системе управления подстанций

Программно-технический комплекс (ПТК) системы контроля и управления (СКУ) подстанций должен соответствовать нормативным требованиям на разработку и создание АСУ ТП:

1. Технические условия по организации передачи в ОАО «СО-ЦДУ ЕЭС» информации, необходимой для управления режимами ЕЭС. Приложение к Соглашению о технологическом взаимодействии по оперативно-диспетчерскому управлению ЕЭС России между ОАО «МОЭСК» и ОАО «СО-ЦДУ ЕЭС», 2005 г.

2. Концепция технической политики ОАО РАО «ЕЭС России» на период до 2009 года, 2005г.

3. Принципы создания АСУ ТП на подстанциях ЕНЭС, 2003г.

4. Рекомендации по технологическому проектированию подстанций переменного тока с высшим напряжением 35-750 кВ, Минэнерго РФ, 2003г.

5. РД 34.35.310-97 «Общие технические требования к микропроцессорным устройствам защиты и автоматики энергосистем».

При построении СКУ подстанций используются следующие принципы:

– система контроля и управления реализует информационные и управляющие функции и сопрягается в единую вертикаль АСУ ТП и АСУ предприятия, АСДУ и АСУ энергосистемы;

– система контроля и управления формируется из функционально законченных подсистем автоматизации (релейная защита и автоматика, телемеханика, контроль и диагностика и пр.), способных выполнять заданные функции независимо от состояния иных подсистем автоматизации;

– отдельные подсистемы автоматизации интегрируются на базе стандартных интерфейсов (сетей, сетевых и транспортных протоколов, механизмов динамического обмена данными, механизма доступа к архивным данным);

– дистанционное управление коммутационной аппаратурой выполняется в соответствии со сложившейся структурой оперативного управления.

Распределенное управление и сбор информации в системе контроля и управления подстанций должны удовлетворять следующим требованиям:

1. Система управления строится как многоуровневая система управления непрерывным производственным процессом. Каждый из функциональных уровней системы управления может представлять собой сложную иерархическую структуру.

2. Задачи управления и сбора информации распределяются между несколькими (десятками, сотнями) микропроцессорами. Отдельно взятый контроллер обслуживает сравнительно автономную зону технологического процесса.

3. Представление информации централизуется в соответствии с иерархией системы (по подстанции, предприятию).

4. На нижних уровнях объединение технических средств в единую систему осуществляется на основе промышленных локальных сетей типа FieldBus.

5. В составе системы интегрируются разнотипные технические средства. Между ними обеспечивается обмен данными и ресурсами.

6. Допускается включение в систему существующих аналоговых приборов и регуляторов с постепенной заменой их на цифровые.

7. Информация представляется оперативному персоналу преимущественно на экране монитора в наглядной, компактной, удобной для быстрого восприятия форме. Предусматривается вывод информации на коллективные средства отображения (диспетчерский щит, коллективный экран).

8. Система контроля и управления технологическими процессами подстанций является системой реального времени и должна функционировать в непрерывном режиме в течение всего срока эксплуатации объекта и по решаемым задачам относится к *системам автоматического управления*. Обеспечивается высокое быстродействие и надежность функционирования системы.

9. На верхних уровнях используются промышленные ЭВМ, объединенные между собой в локальную вычислительную сеть. Промышленной ЭВМ является ЭВМ специального исполнения, которая имеет модульную

структуру, пассивную объединительную (материнскую) плату, сторожевой таймер и средства защиты, обеспечивающие возможность ее промышленной эксплуатации.

10. Нижние уровни системы могут иметь в своем составе собственные вычислительные сети (малые распределенные системы).

11. Каждая из подсистем системы контроля и управления может выполнять функции регистрации аварийных процессов с обеспечением записи до и после аварии.

12. Функциональные подсистемы могут функционировать независимо друг от друга, но должны интегрироваться на уровне общей базы данных.

13. Пропускная способность и мощность вычислительной сети рассчитывается на максимальные потоки информации, которые могут возникать в системе, особенно в аварийных режимах.

При построении АСУ ТП подстанций обязательными условиями являются:

1. Применение микропроцессорных устройств на всех уровнях.
2. Открытая масштабируемая архитектура.
3. Функциональная распределённость (функциональные подсистемы).
4. Электромагнитная совместимость.
5. Информационная совместимость.
6. Территориальная распределённость.
7. Наличие системы гарантированного питания.
8. Высокая точность измерений и привязка к единому времени.

При выборе числа контроллеров для нижнего уровня системы должны учитываться следующие требования:

1. Каждая выделенная зона технологического процесса, которую обслуживает один контроллер, должна обладать максимально возможной автономией. В результате облегчается обслуживание системы и сводится к минимуму число связей между контроллерами.

2. Должна обеспечиваться требуемая реакция системы на внешние события.

3. Система должна иметь минимальное количество кабельных связей.

4. Должна быть обеспечена живучесть системы. Отказ одного из контроллеров не должен приводить к отказу системы в целом. Допускается постепенная деградация системы управления путем уменьшения числа решаемых задач, снижения реактивности системы и ухудшения других ее характеристик.

Децентрализация системы управления подстанций предполагает максимальное приближение микропроцессорных устройств к объектам.

Степень децентрализации зависит от задач, решаемых конкретной системой управления. При этом принимается во внимание необходимая реакция системы на внешние воздействия, синхронизация работы всех устройств, структура каналов связи, надежность и стоимость всей системы в целом.

1.2. Цели и задачи создания АСУ ТП на подстанциях

Повышение эффективности функционирования объекта в целом в нормальных и аварийных режимах.

Снижение аварийных ущербов и потерь.

Снижение эксплуатационных затрат и затрат на ремонт основного и вспомогательного оборудования.

Создание единого комплекса технических средств с интеграцией систем измерений, защиты, автоматики и управления оборудованием объектов электрических сетей.

Создание средств диагностики основного оборудования.

Система контроля и управления подстанций должна охватывать:

– синхронные компенсаторы с системами возбуждения и охлаждения и другие компенсирующие устройства;

– трансформаторы собственных нужд;

– блочные трансформаторы и трансформаторы связи;

– распределительные устройства;

– воздушные и кабельные линии;

– системы пожаротушения;

– системы оперативного переменного и постоянного тока.

Посредством СКУ ЭТО решаются следующие классы задач (табл. 1):

1. Контроль режима работы подстанции и его отображение оперативному и ремонтному персоналу.
2. Диагностика электротехнического оборудования.
3. Регистрация аварийных процессов.
4. Дистанционное управление электрооборудованием.
5. Автоматическое регулирование.
6. Релейная защита.
7. Противоаварийная автоматика, АЧР, АВР, АЧД и пр.
8. Информационный обмен с верхними уровнями АСДУ.
9. Коммерческий и технический учет электроэнергии.
10. Контроль показателей качества электроэнергии.

Таблица 1

Задача	Цель	Параметры	Требуемое быстродействие
1	2	3	4
Релейная защита и автоматика	– защита оборудования; – АПВ, АВР, блокировки; – осциллографирование (РАС); – расчет действующих значений по мгновенным значениям;	фазные и линейные токи и напряжения, положение коммутационных аппаратов, переключателей, накладок	до 1 мс

Продолжение таблицы 1

1	2	3	4
	– диагностирование устройств РЗиА*		
Дистанционное управление	управление коммутационными аппаратами главной схемы и схемы собственных нужд	положение коммутационных аппаратов	1 с
Дискретное (логическое) управление	оперативные переключения в электрических схемах, синхронизация	токи, напряжения, положение коммутационных аппаратов, переключателей, накладок	1 с
Контроль стационарного режима	ведение режима	фазные и линейные токи и напряжения, положение коммутационных аппаратов, переключателей, накладок, сигнализация и т.п.	1 с
Централизованное ведение режима по напряжению и реактивной мощности	– ведение режима; – оптимизация режима	токи, напряжения, мощности	1 с и более
Сопряжение с каналами телемеханики	передача информации на верхние уровни управления (АСДУ)	параметры телеизмерения и телесигнализации	1 с
Учет электроэнергии	технический и коммерческий учет	токи, напряжения	-
АДЗ (анализ действия защит)	– выявление первопричин аварий; – определение места повреждения	определяются задачей осциллографирования (РАС)	см. п.1
Контроль токов замыкания на землю в цепях дугогасящих реакторов (сети с изолированной нейтралью)	определение мест повреждения, в том числе присоединений, имеющих перемежающиеся замыкания на землю	фазные и линейные токи и напряжения	1 мс
Контроль системы оперативного тока: – аккумуляторная батарея;	контроль цепей управления:	токи, напряжения	1 с

Продолжение таблицы 1

1	2	3	4
– зарядное устройство; – ШУ и ШП			1 мс 1 с
Поддержка оператора	выдача рекомендаций оперативному персоналу по ведению режима и ликвидации аварий	фазные и линейные токи и напряжения, положение коммутационных аппаратов, переключателей, накладок, сигнализация и т.п.	1 с и более
Диагностика выключателей	определение ресурса	токи отключения	1 мс
Диагностика компенсаторов: – нагрев обмотки и сердечника статора; – нагрев обмотки ротора с учетом токов обратной последовательности; – ток возбуждения, контроль витковых замыканий обмотки ротора; – диаграмма нагрузок с учетом состояния системы	повышение эксплуатационной надежности, предотвращение аварий, планирование ремонтов	– токи: фазные статора, ротора, возбудителя, возбуждения возбудителя, входа регулятора возбуждения; – напряжения: фазные статора, нулевой последовательности, возбуждения, возбуждения возбудителя, входы и выходы преобразователей в цепи возбуждения возбудителя, вход регулятора возбуждения,	1 с и более 1 мс 1 мс 1 с и более
охлаждения; – уплотнение вала, газомасляная система; – тепловое состояние выпрямителей системы возбуждения; – работа выпрямителей системы возбуждения; – вибрация подшипников; – местные перегревы внутри корпуса по выявлению		управляющие сигналы регулятора возбуждения, питания (основное и резервное) системы возбуждения; – дискретные сигналы: положение первичного коммутационного оборудования, автоматов, переключателей, накладок системы возбуждения, состояния АГП; – температура, давление, расход	1 с и более 1 с и более 0,5 мс 0,5 мс

Окончание таблицы 1

1	2	3	4
в охлаждающем газе примесей-аэрозолей;			
– нарушение креплений обмотки и сердечника статора по данным виброконтроля; – снижение сопротивления изоляции обмотки статора и ротора; – дефекты ротора по данным виброконтроля			1 с и более – 1 с и более
Диагностика трансформаторов: – суммарный износ изоляции; – значение и длительность перегрузки; – давление масла во вводах; – концентрация горючих газов, растворенных в масле;	повышение эксплуатационной надежности, предотвращение аварий, планирование ремонтов	фазные токи, температура, давление, состояние коммутационной аппаратуры	от 10 с до 4 ч
– механический ресурс и износ контактов РПН; – система охлаждения			
Коммерческий и технический учет электроэнергии с контролем показателей качества	повышение эксплуатационной надежности, предотвращение аварий, планирование ремонтов	– фазные токи и напряжения; – фазные токи и напряжения, форма кривой напряжения на шинах	1-30 мин. 100 мкс
Ведение оперативной документации	освобождение оперативного персонала от рутинных операций	–	–

Система управления и автоматизации подстанций должна представлять собой единое техническое решение для целой совокупности функций *на базе микропроцессорных устройств*. Внедрение микропроцессорных систем контроля и управления увеличивает надежность и примерно на два порядка информационную обеспеченность оперативного и эксплуатационного персонала.

В микропроцессорных устройствах могут реализовываться следующие функции измерения: контроль направления вращения фаз; измерение токов и напряжения по фазам и нулевому проводу; измерение напряжений по фазам и относительно земли; измерение активной, реактивной и полной мощности; измерение частоты; контроль времени отключения выключателей; измерение коэффициента мощности. Помимо традиционных функций выполняется регистрация аварийных электромагнитных процессов, автоматическое повторное включение (АПВ), а также функции блокировки включений выключателя, определения места повреждения, дистанционное изменение уставок РЗА.

Одними из главных достоинств микропроцессорных устройств являются развитые средства диагностики самих устройств. В результате обеспечивается быстрое и эффективное предотвращение случаев неправильной работы устройств. Таким образом, имеется возможность без использования дополнительных датчиков информации иметь в темпе процесса:

– сигналы по работе устройств (пуски, возвраты пусков, срабатывание, возврат срабатывания) по каждой ступени и виду защит с разрешающей способностью 1 мс;

– сигналы по исправности устройств релейной защиты и автоматики (РЗА), цепей управления, сигнализации;

– осциллограммы переходных процессов;

– сигналы по техническому и коммерческому учету мощности и электроэнергии;

– сигналы по коммутационному ресурсу выключателей и пр.

Имеется возможность работу с устройствами РЗА вести с районного диспетчерского пункта (РДП).

1.3. Требования к каналам связи для обмена информацией с микропроцессорной релейной защитой

Внедрение современных микропроцессорных систем контроля и управления на электростанциях и подстанциях, необходимость передачи технико-экономической информации ужесточают требования к каналам связи средств диспетчерского и технологического управления.

Требуемая пропускная способность канала связи влияет на выбор организации каналов, которые могут быть выполнены различными способами. Целесообразность использования того или иного типа подключения локальных сетей передачи данных определяется на основании многих факторов, важнейшими из которых являются:

– требуемая по технологическим условиям полоса пропускания канала связи;

– наличие на конкретном объекте уже имеющейся сетевой инфраструктуры;

– наличие соответствующих служб наладки и технической поддержки;

– соответствие стандартам единой корпоративной политики компании в области информационных технологий;

– минимизация разовых финансовых вложений и затрат на эксплуатацию каналов связи, активного оборудования и пр.

1.4. Основные подсистемы АСУ ТП подстанции

Информационно-управляющая подсистема (SCADA).

Подсистема РЗА.

Подсистема дистанционного управления и информационного обмена с РДП ПЭС и ЦДП РДУ.

Подсистема мониторинга и диагностики ЭТО.

Подсистема регистрации аварийных событий.

Подсистема контроля показателей качества электроэнергии.

Подсистема коммерческого учета электроэнергии.

Подсистема технического учета электроэнергии.

Подсистема видеонаблюдения.

1.4.1. *Требования к МП устройствам РЗА – основному источнику информации*

МП РЗА должны выполнять функции релейной защиты и автоматики объекта в необходимом объеме.

МП РЗА должны помимо функций защиты и автоматики выполнять функции:

– телеуправления;

– телесигнализации;

– телеизмерения (не аттестованы как средство измерения – используются в качестве индикаторов).

МП РЗА должны поддерживать только открытые протоколы обмена.

Возможность автономной работы при пропадании связи с верхним уровнем.

МП РЗА должны иметь два цифровых интерфейса:

– для подключения к серверу информационно-управляющей подсистемы (стандартный открытый протокол);

– для подключения к АРМ инженера РЗА (допускается фирменный интерфейс).

1.4.2. *Требования к измерительным устройствам и вторичным цепям*

Измерительные трансформаторы:

Классы точности обмоток измерительных ТТ:

– для устройств РЗА 10Р;

– для цепей измерения не более 0,5;

– для цепей коммерческого учета 0,2S, 0,5S.

Токовые цепи релейной защиты, измерений и коммерческого учета должны быть разделены.

Классы точности обмоток измерительных ТН:

– для релейной защиты 3;

– для цепей измерения и АСКУЭ не более 0,5.

Нагрузка вторичных обмоток измерительных трансформаторов не должна превышать номинальных значений.

Сечение и длина проводов в цепях напряжения должны выбираться такими, чтобы потери напряжения составляли не более 0,25 % номинального.

Должна проводиться метрологическая аттестация средств измерений в соответствии с требованиями ГОСТ 8.326-89 «Государственная система обеспечения единства измерений».

Преобразователи сигналов

Выходной интерфейс датчиков должен быть согласован с интерфейсом модулей УСО.

Точность датчиков согласовывается с требованиями подсистем АСУ.

Разрядность АЦП при преобразовании сигналов с датчиков – не менее 12 бит.

В модулях ввода аналоговых сигналов должна быть предусмотрена диагностика параметров измерений цепей, в модулях вывода – диагностика неисправности выходных каналов.

Между датчиком и цифровой частью устройства должна быть обеспечена гальваническая развязка. Ввод дискретной информации должен обеспечиваться в виде «сухих» контактов.

Дискретные входы должны иметь блокировку от «дребезга» контактов.

Счетчики электрической энергии

В измерительной системе АСКУЭ должны использоваться микропроцессорные счетчики с развитыми функциональными возможностями.

Для связи с промышленными контроллерами должны использоваться цифровые интерфейсы RS458.

Метрологические характеристики коммерческих счетчиков электрической энергии должны соответствовать ГОСТ 30206-94 и ГОСТ 26035-83. Счетчики должны обеспечивать реверсивный учет для ИИК, где возможны перетоки электроэнергии в двух направлениях.

Должна обеспечиваться возможность автономной работы системы. Сеть счетчиков разбивается на сегменты, подключаемые к отдельным УСПД.

Приборы контроля показателей качества электроэнергии

Приборы контроля качества электроэнергии должны быть внесены в госреестр как средство измерения параметров качества электроэнергии.

1.4.3. *Требования к промышленным контроллерам*

Сбор и интеллектуальная обработка информации, передаваемой на ДП (достоверизация, суммирование ТИ, формирование обобщенных ТС).

Дистанционное управление коммутационным оборудованием с рабочего места оперативного персонала энергообъекта.

Сбор и передача ретроспективной информации (регистраторы дискретных и аналоговых событий, интегральные значения параметров).

Информационный обмен и совместимость:

– с подсистемой РЗА;

– с верхним уровнем АСДУ ПЭС;

– с верхним уровнем АСДУ ЦДП Московского РДУ.

Поддержка стандартных открытых протоколов – МЭК 61850, МЭК 60870-5-101, МЭК 60870-5-103, МЭК 60870-5-104, MODBUS, Profibus, Ethernet.

Обеспечение привязки всей первичной информации с точностью не хуже 10 мс – для нормального режима, и не хуже 1 мс – для аварийного режима.

Наличие средств самодиагностики, а также средств общесистемной диагностики для включения в систему АСУ ТП подстанции.

1.4.4. *Требования к регистраторам аварийных процессов*

Должна быть предусмотрена возможность регистрации следующих событий:

– выход аналогового параметра за допустимые пределы и возврат в норму;

– сигнализация функционирования защит и автоматики с фиксацией сработавших ступеней;

– сигнализация и работа технологических защит;

– изменение состояния объектов управления.

Для передачи данных должны использоваться открытые протоколы.

Все регистрируемые события должны быть с меткой времени.

Регистраторы должны быть аттестованы как средство измерения, обеспечивать сохранение полезной информации в интервалах между обращениями к данным по удаленной связи.

Регистраторы должны быть масштабируемыми по видам интерфейсов для сопряжения с каналами передачи данных.

Диапазон записи максимально-возможного значения тока – не менее 30-40 значений номинального, а максимально-возможного напряжения – не менее 3 значений номинального.

Погрешность записи параметров не должна превышать 0,5 %.

2. ТРЕБОВАНИЯ К СПОСОБАМ И СРЕДСТВАМ ИНФОРМАЦИОННОГО ОБМЕНА

Информационные связи между подсистемами АСУ ТП и вышестоящими иерархическими системами должны быть выполнены путем организации основных цифровых каналов достаточной емкости и резервных каналов связи, организованных по выделенной линии.

Средствами АСУ ТП должна обеспечиваться возможность подготовки информации, используемой вышестоящими системами, и передачи ее как в режиме циклического выполнения, так и по запросу.

Должны использоваться открытые протоколы: МЭК 870-5-101; МЭК 870-5-103; МЭК 870-5-104; МЭК 61850; ModBUS; Profibus, NetDDE; OPC; SQL.

Промышленные сети типа RS485 – скорость передачи не менее 9600 Бит/с. Среда передачи – экранированный кабель типа «витая пара» или оптоволоконный кабель. Топология сети – «шина» или «звезда».

Локальные вычислительные сети на базе сети Ethernet – скорость 10-100 Мбит/с. Среда передачи – экранированный кабель типа «витая пара» или оптоволоконный кабель.

2.1. Требования к центральным вычислительным ресурсам

2.1.1. *Требования к техническому обеспечению*

Модульный принцип построения.

Использование в качестве серверов и рабочих станций IBM PC совместимых промышленных компьютеров.

Серверы должны иметь резервируемую схему функционирования с резервным хранением информации и автоматическим переключением.

Отказ отдельных модулей комплекса ЦВР не должен приводить к отказу системы. Должна применяться система мониторинга, диагностики и тестирования вычислительных средств.

2.1.2. *Требования к программному обеспечению*

Информационная совместимость устройств различных производителей.

Обеспечение устойчивого функционирования задач технологического управления.

Возможность развития и модификации технологических задач управления.

Осуществление контроля достоверности получаемых данных.

Реализация протоколов функционирования ЛВС подстанции, в том числе Ethernet.

Реализация протоколов информационного обмена с верхними уровнями управления.

Возможность удаленного администрирования.

Возможность реализации технологий клиент-сервер.

2.1.3. *Требования к информационно-управляющей подсистеме (SCADA)*

Управление коммутационной аппаратурой.

Отображение положения коммутационной аппаратуры.

Интеграция с устройствами МП РЗА.

Мониторинг текущего режима, состояния главной схемы и собственных нужд. Контроль состояния основного и вспомогательного оборудования.

Управление режимами (напряжением, реактивной мощностью).

Предупредительная и аварийная сигнализация.

Сбор и первичная обработка дискретной информации и аналоговой информации.

Регистрация текущих событий.

Регистрация аварийных событий.

Информационный обмен со смежными подсистемами и иерархическими системами верхнего уровня.

2.1.4. *Требования к подсистеме дистанционного управления*

Резервная система управления на подстанции.

Сбор телеинформации в необходимом объеме, передача ее на верхние уровни управления и интеграция в АСДУ.

Управление коммутационной аппаратурой.

Сбор и обработка дискретной информации.

Сбор и обработка аналоговой информации.

Регистрация аварийных событий.

Регистрация текущих событий.

Мониторинг текущего режима, состояния главной схемы.

Информационный обмен со смежными подсистемами и верхними уровнями управления.

2.1.5. ***Требования к подсистеме мониторинга и диагностики основного технологического оборудования***

Мониторинг, диагностика и учёт ресурсов основного технологического оборудования (коммутационной аппаратуры, трансформаторов и РПН, изоляции оборудования).

Гибкое энергосберегающее управление системами охлаждения трансформаторов, диагностика эффективности охлаждения, состояния и ресурса электродвигателей охладителей.

Информационно-справочное обеспечение эксплуатационных работ.

Документирование профилактических и ремонтно-восстановительных работ.

Контроль выполнения операций по вводу и выводу основного оборудования в ремонт.

Измерение температуры окружающего воздуха и контроль температуры масла.

Расчет допустимого времени и кратности перегрузки трансформаторов.

2.1.6. ***Требования к подсистеме контроля параметров качества электроэнергии***

Непрерывный контроль ПКЭ согласно ГОСТ 13109-97.

Сигнализация выхода за уставки показателей качества электроэнергии.

Выполнение функции измерений:

– установившихся отклонений напряжения;

– несимметрии напряжений, искажение синусоидальности, длительности и глубины провала напряжения;

– значения и отклонения частоты;

– действующих значений тока и напряжения;

– фазовых углов;

– активной, реактивной и полной мощности.

Выполнение функций статистической обработки измерений.

Хранение информации.

2.1.7. ***Требования к подсистеме коммерческого (технического) учёта электроэнергии***

Автоматическое измерение мощности и приращений активной и реактивной энергии на 30-ти минутных интервалах.

Расчет баланса электроэнергии подстанции.

Сопровождение измерений статусом о состоянии средств измерений.

Запись графика нагрузки.

Обработка данных за расчётный период.

Самодиагностика и ведение журнала событий.

Контроль достоверности измерительной информации.

Формирование архива измеренных величин.

Контроль работоспособности программно-технических средств.

Формирование отчетной документации по учету электроэнергии и передача в вышестоящие системы.

Таблица 2

Состав сигналов АСУ ТП (на примере ПС Говорово)

Источники/ приемники сигналов	**Аналоговая информация (входные сигналы)**		**Дискретная информация (входные сигналы)**		**Команды управления (выходные сигналы)**	**Количество сигналов от устройств**	**Количество сигналов в % от общего числа сигналов**
	Сигналы	**Данные**	**Сигналы**	**Данные**	**Сигналы**		
Электромеханические устройства (сигналы, передаваемые через шкафы RTU)	22		605		99	726	6,23
Микропроцессорные устройства РЗА		744		8580	210	9534	81,84
Средства ТИ, ТС, ТУ	138	66	132		226	562	4,82
Средства коммерческого учета (счетчики)	576					576	4,94
Средства технического учета		216				216	1,85
Средства контроля ПКЭ	36					36	0,31
Всего:	772	1026	737	8580	535	11650	100

2.1.8. ***Требования к подсистеме видеонаблюдения***

Подсистема выполняет функцию видеонаблюдения для обеспечения охраны и безопасности:

– визуальный контроль за периметром подстанции и помещениями на предмет несанкционированного допуска посторонних лиц, возгораний;

– визуальный контроль за состоянием электротехнического оборудования, выполнением ремонтно-профилактических работ и оперативных переключений.

Таблица 3

Сравнительный анализ применения устройств

Критерии сравнения	ABB	Siemens
1	2	3
Организационные моменты	Центр технической поддержки в России – консультации по любым техническим вопросам, наличие и доступность методик выбора уставок, описаний и схем, простота в обслуживании и быстрая замена устройств РЗА в случае выхода их из строя	Центр технической поддержки отсутствует – сложность в получении консультаций, менее доступные технические описания, методики выбора уставок РЗА, длительный процесс получения консультаций по вопросам проектирования
АСУ ТП	Протоколы связи и сетевые архитектуры: Терминалы защит: REL – SPA, LON RET – SPA, LON, МЭК 60870-103 RED – LON SPAC 800 – SPA SPAC 810 – SPA, МЭК 60870-103 Контроллеры: REC 561 – LON RTU 211 – RP570 SPOC – SPA RTU 560 – МЭК 60870-101, 103, 104, Modbus, DNP3	Протоколы связи и сетевые архитектуры: Терминалы защит: 7 SJ, 7SA, 7SD, 7UT, 6MD – IEC 61850, IEC 60870-5-103, Profibus – FMS/DP, Modbus, DNP 3 Контроллеры: RTU – IEC 60870-5-101, 103, 104, Modbus, Profibus, DNP3
АСУ ТП	MicroScada – связь с устройствами и системами РЗА, УСО и ТМ: IEC 870-5-101, IEC 870-5-103, IEC 870-5-104, Modbus, SPA, LON, RP570, ABB alpha – соединение с центрами управления верхнего уровня:	Scada (Sicam PAS и WIN CC) – связь с устройствами и системами РЗА, УСО и ТМ: IEC 61850, IEC 60870-5-103 (Master), IEC 60870-5-101 (Master), Profibus – FMS/DP, DNP V3.0 Modbus, OPC Client
	OPC, IEC 60870-5-101, Unicon (Гранит, Компас…), DDE, SQL. Выводы: – низкая скорость передачи данных ModBus – 9600 бит/с, LON – 1,25 Мбит/с; – использование нестандартизированных протоколов обмена	– соединение с центрами управления верхнего уровня: OPC server, IEC 60870-5-101 (Slave), IEC 60870-5-104 (Slave), DNP V3. Выводы: – скорость передачи данных 10 Мбит – Profibus и 100 Мбит/с – Fast Ethernet;

Окончание таблицы 3

1	2	3
	данными приводит к сложности интеграции в АСУ ТП при использовании системы Scada других производителей; – возможно использование только УСО производства ABB; – наличие в терминалах только одного порта связи	– поддержка открытых протоколов связи устройств релейной защиты и системы управления, таких, как МЭК 61850; – взаимосвязь любых устройств возможна не только на физическом, но и на системном уровне; – разнообразие интерфейсов для обмена данными, наличие двух портов связи
Устройства РЗА	– использование закрытых протоколов; – наличие гибкой и «быстрой» логики в терминалах, что дает возможность более гибкого параметрирования – возможность выполнения любых	– использование стандартных открытых протоколов; – свободная логика есть, но менее гибкая и «медленная», что ограничивает ее использование для организации защитных функций;
	требуемых функций ввиду отсутствия связей по умолчанию. Но в связи с этим возрастает сложность проектирования. Терминалы имеют стандартный набор функций для защиты определенного объекта, но можно добавить функции и смоделировать с помощью логических блоков; – отсутствие функций управления в ряде терминалов; – наличие отдельных модулей дискретных входов/выходов; – возможность использования на присоединениях с несколькими выключателями. Регистрация аварийных процессов с дискретностью 1мс	– универсальность терминалов защит – разнообразные защитные функции могут быть включены в один модуль, что позволяет выполнить защиту любого присоединения с помощью одного терминала – любой из терминалов можно использовать для защиты, управления и мониторинга; – сложность добавления при необходимости дискретных входов/выходов, низкие пороги срабатывания. Ограниченное количество входов тока и напряжения, что приводит к невозможности использования одного терминала на присоединениях с несколькими выключателями Регистрация аварийных процессов с дискретность 1,25 мс.

СЕКЦИЯ № 1
ТЕПЛОЭНЕРГЕТИКА

Руководители секции: ***Седлов Анатолий Степанович***
д-р техн. наук, профессор
Кузеванов Вячеслав Семенович
д-р техн. наук, профессор

ЭРГОНОМИКА ИНФОРМАЦИОННОГО ОБЕСПЕЧЕНИЯ ОПЕРАТОРА ЭНЕРГОБЛОКА ТЭЦ

Е.А. Болонова – аспирантка
кафедры АСУ ТП «МЭИ (ТУ)»

Проблематику вопроса эргономики труда оператора энергоблока можно рассматривать с нескольких точек зрения. Первая из них – наиболее распространенная – эргономика рабочего места. Достаточно часто в последние годы обращают внимание на эргономику подачи информации. И незаслуженно редко упоминается эргономика информационного обеспечения, то есть оптимальность информационного потока [1].

Поскольку существует принципиальная возможность использования системного подхода практически в любой решаемой человеком задаче, энергоблок рассматривается как техническая система, и, соответственно, для решения задачи оптимизации информационного потока применяется все многообразие инструментов и методов, предоставляемых теорией систем и системного анализа (ТССА) [2].

В большинстве случаев практического применения системного анализа для исследования свойств и последующего оптимального управления системой можно выделить следующие основные этапы:

1. Содержательная постановка задачи.
2. Построение модели изучаемой системы.
3. Отыскание решения задачи с помощью модели.
4. Проверка решения с помощью модели.
5. Подстройка решения под внешние условия.
6. Осуществление решения.

1. СОДЕРЖАТЕЛЬНАЯ ПОСТАНОВКА ЗАДАЧИ

Уже упоминалось, что в постановке задачи системного анализа обязательно участие двух сторон: заказчика и исполнителя данного системного проекта. При этом участие заказчика не ограничивается финансированием работы – от него требуется произвести анализ системы, которой он управляет, сформулировать цели и оговорить возможные варианты действий. Конечно же, на этом этапе должны быть установлены и зафиксированы понятия эффективности деятельности системы.

Ясно, что исполнитель-разработчик не всегда может, да и не должен иметь профессиональные знания именно тех процессов, которые имеют место в системе или, по крайней мере, являются главными. Заказчик должен знать, что надо сделать, а исполнитель – специалист в области системного анализа – как это сделать.

В нашем случае цель системного анализа: оптимизировать информационные потоки, идущие к оператору энергоблока. Обязательно: обеспечить полноту и достаточность информации, поступающей к оператору для принятия им решения в критической ситуации. Желательно: параллельно с оптимальным информационным потоком предоставлять оператору рекомендации, облегчающие процесс принятия решения.

2 ПОСТРОЕНИЕ МОДЕЛИ ИЗУЧАЕМОЙ СИСТЕМЫ

В некоторых случаях модель оптимизируемой системы уже существует, что значительно облегчает выполнение поставленной задачи. Но в общем случае имеет место достаточно сложная и одновременно весьма распространенная ситуация: интуитивно все вроде бы понятно, но при попытках формализовать задачу возникает «сплошной туман». В такой ситуации существенно помочь может хорошо разработанное семейство методологий IDEF, являющееся государственным стандартом в США [3].

Особенностью рассматриваемого семейства методологий является, во-первых, уникальная способность «задавать вопросы» (подробно описывает методики получения информации у специалистов предприятия – интервьюирование, анкетирование, итерационные опросы и т.д.) в процессе моделирования, а во-вторых, неразрывная связь графических средств (нотации), методологии и, наконец, технологии.

В семейство методологий IDEF входят несколько стандартов, среди которых, с точки зрения автора, наиболее эффективной при исследовании системы будет методология IDEF0.

Основные элементы и понятия IDEF0

Графический язык IDEF0 удивительно прост и гармоничен (рис. 1).

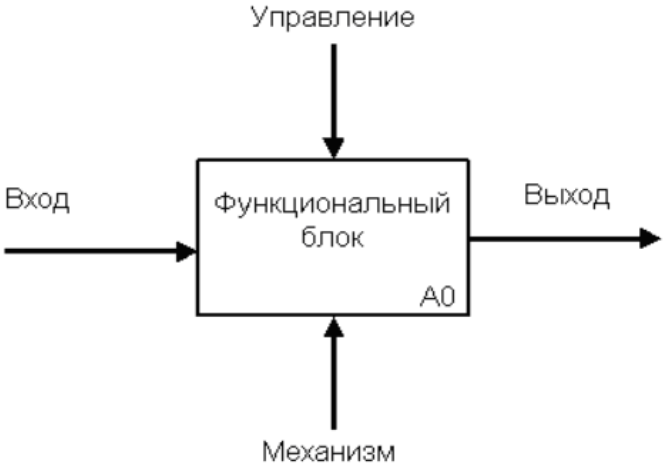


Рис. 1. Основа нотации методологии IDEF0

В основе методологии лежат четыре основных понятия:

Первым из них является понятие *функционального блока*. Функциональный блок графически изображается в виде прямоугольника и олицетворяет собой некоторую конкретную функцию в рамках рассматриваемой системы.

Вторым «китом» методологии IDEF0 является понятие *интерфейсной дуги*. Графическим отображением интерфейсной дуги является однонаправленная стрелка.

Третьим основным понятием стандарта IDEF0 является *декомпозиция*. Принцип декомпозиции применяется при разбиении сложного процесса на составляющие его функции. В процессе декомпозиции функциональный блок, который в контекстной диаграмме отображает систему как единое целое, подвергается детализации на другой диаграмме.

Последним из понятий IDEF0 является *глоссарий*. Для каждого из элементов IDEF0: диаграмм, функциональных блоков, интерфейсных дуг – существующий стандарт подразумевает создание и поддержание набора соответствующих определений, ключевых слов, повествовательных изложений и т.д., которые характеризуют объект, отображенный данным элементом.

Дисциплина групповой работы над разработкой IDEF0-модели

Стандарт IDEF0 содержит набор процедур, позволяющих разрабатывать и согласовывать модель большой группой людей, принадлежащих к разным областям деятельности моделируемой системы.

Обычно процесс разработки является итеративным и состоит из следующих условных этапов (рис. 2):

Рис. 2. Процесс построения IDEF0-модели

Создание черновика модели группой специалистов, относящихся к различным сферам деятельности предприятия. Это динамический процесс, в течение которого авторы опрашивают компетентных лиц о структуре различных процессов.

Распространение черновика для рассмотрения, согласований и комментариев. При этом каждая из диаграмм черновой модели письменно критикуется и комментируется, а затем передается автору. Автор соглашается с критикой или отвергает её и вновь возвращает откорректированный черновик для дальнейшего рассмотрения.

Официальное утверждение модели. Утверждение согласованной модели происходит руководителем рабочей группы в том случае, если у авторов модели и читателей отсутствуют разногласия по поводу ее адекватности.

Наглядность графического языка IDEF0 делает модель вполне читаемой и для лиц, которые не принимали участия в проекте ее создания, а также эффективной для проведения показов и презентаций. В дальнейшем, на базе построенной модели могут быть организованы новые проекты, нацеленные на производство изменений на предприятии (в системе).

3. ОТЫСКАНИЕ РЕШЕНИЯ С ПОМОЩЬЮ МОДЕЛИ

После построения функциональной модели энергоблока становится возможным построение информационной модели, то есть выделения отслеживаемых параметров системы, распределение информационных потоков между операторами, создание базы данных (в идеальном случае – базы знаний) для управления информационными потоками [4, 5].

Каждому из выявленных параметров энергоблока A_i для конкретного режима работы оборудования j необходимо поставить в соответствие его значимость – весовой коэффициент P_{ij}, принадлежащий интервалу от 0 до 1. Здесь 0 соответствует формулировке «совершенно незначим», а 1 – «максимально значим». Предполагается использовать для этих целей метод экспертных оценок.

В результате для каждого режима работы энергоблока j можно будет разбить все множество параметров системы на три подмножества:

A_{ij} / $0 < P_{ij} < 0{,}4$ – параметры не нуждаются в постоянном контроле.

A_{ij} / $0{,}4 < P_{ij} < 0{,}7$ – параметры нуждаются в периодическом контроле и их значения должны предоставляться оператору по требованию.

A_{ij} / $0{,}7 < P_{ij} < 1$ – параметры нуждаются в постоянном контроле со стороны оператора.

После построения этих трех подмножеств уже можно будет говорить о методах представления информации оператору, частоте обновления информации и других подобных вопросах.

С помощью метода экспертных оценок можно также поставить в соответствие множеству параметров системы множество интервалов их допустимых значений при различных режимах работы энергоблока. В этом случае при выходе значения параметра из заданного интервала для оператора будет выводиться

дополнительная информация – звуковые и цветовые сигналы с сообщениями о нарушениях, рекомендации по действиям в данной ситуации.

4. ОСУЩЕСТВЛЕНИЕ РЕШЕНИЯ

Современные ПТК обладают достаточно широкими возможностями представления информации оператору с максимальной эффективностью. Они обеспечивают автоматическое управление оборудованием энергоблоков, позволяют выводить информацию в виде мнемосхем, графиков, текстовых и звуковых сообщений на дисплеи операторских станций, использующиеся также для дистанционного управления.

Разработку эргономики информационного обеспечения оператора предполагается осуществлять на одном из наиболее популярных ПТК в российской энергетике – ПТК «КВИНТ» [6].

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. *Леонова А.К.*, *Чернышова А.Н.* Психология труда и организационная психология. – М.: Радикс, 1995. – 432 с.

2. *Хомяков Д.М.*, *Хомяков П.М.* Основы системного анализа. – М.: Мех.-мат. ф-т. МГУ, 1996. – 107 с.

3. www.idefinfo.ru – электронный ресурс, тексты стандартов IDEF.

4. *Кофман А.* Введение в теорию нечетких множеств. – М.: Радио и связь, 1982. – 254 с.

5. *Орловский С.А.* Проблемы принятия решений при нечеткой исходной информации. – М.: Радио и связь, 1981. – 342 с.

6. *Курносов Н.М.*, *Певзнер В.В.*, *Уланов А.Г.* Программно-технический комплекс «Квинт» // Теплоэнергетика. – 1993. – № 10. – С.14-17.

УЧЕТ ОСОБЕННОСТЕЙ РЕЖИМОВ РАБОТЫ ЭНЕРГОБЛОКОВ ПГУ ПРИ РЕШЕНИИ ЗАДАЧИ ОПТИМИЗАЦИИ РАБОТЫ ТЭЦ

В.О. Болонов – аспирант
кафедры АСУ ТП «МЭИ (ТУ)»

В настоящее время в России основная доля электрической и тепловой энергии вырабатывается тепловыми электрическими станциями. Большая часть оборудования электростанций эксплуатируется уже много лет и является морально устаревшим, при этом, естественным образом, на многих станциях не обеспечиваются требуемые экономические, экологические и особенно надежностные показатели эксплуатации станций. Поэтому на данном этапе развития энергетики необходима существенная модернизация и замена используемого оборудования. Одним из перспективных направлений является внедрение парогазовых технологий.

Парогазовые установки (ПГУ) позволяют значительно увеличить эффективность ТЭЦ, работающих на природном газе, объединив в одной установке (ПГУ) высокотемпературный подвод (в ГТУ) и низкотемпературный отвод тепла (в конденсаторе паровой турбины). КПД лучших современных ПГУ составляет 55-58 % по выработке электроэнергии.

Примером высокотехнологичной бинарной установки является ПГУ-450 Северо-Западной ТЭЦ.

В отличие от традиционных паротурбинных энергоблоков ПГУ имеют большее разнообразие режимов работы, а также являются более маневренным энергетическим оборудованием.

При разработке АСУ ТП станций, в которых присутствуют ПГУ, необходимо использовать методику, учитывающую перечисленные особенности для решения задачи оптимизации работы ТЭЦ.

Одной из главных задач эксплуатации ТЭЦ является оптимизация режимов ее работы. В рамках этой задачи наиболее актуальным является вопрос решения проблемы оптимального распределения электрической и тепловой нагрузки между агрегатами станции. Как правило, требуется минимизировать три критерия оптимальности: экономичность, надежность и экологичность [1, 2]. Однако при работе в составе ТЭЦ ПГУ важно также учитывать критерий маневренности как условие выбора оборудования для набора и сброса нагрузки станции согласно заданному графику нагрузок.

$$\left.\begin{aligned} F_1(x) &= \sum_{j=1}^{n} f_{1j} \rightarrow \underset{x}{\text{opt}} \\ F_2(x) &= \sum_{j=1}^{n} f_{2j} \rightarrow \underset{x}{\text{opt}} \\ F_3(x) &= \sum_{j=1}^{n} f_{3j} \rightarrow \underset{x}{\text{opt}} \\ F_4(x) &= \sum_{j=1}^{n} f_{4j} \rightarrow \underset{x}{\text{opt}} \end{aligned}\right\} \qquad (1)$$

где x – вектор всех оптимизируемых параметров (электрические и тепловые нагрузки каждого агрегата, а также другие параметры); $F_1(x)$, $F_2(x)$, $F_3(x)$, $F_4(x)$ – критерии оптимальности по расходу топлива (экономичности), надежности, экологии и маневренности; f_{1j}, f_{2j}, f_{3j} – энергетические характеристики j-го энергоблока (станции), отражающие свой расход топлива, средний ущерб из-за ненадежности работы (из-за аварийных простоев и отказов) и количество выбросов вредных веществ в окружающую среду; f_{4j} – маневренные характеристики оборудования.

Критерий маневренности $F_4(x)$ можно представить в виде ограничения:

$$\sum_{j=1}^{m} W_j \geq W_c, \qquad (2)$$

где W_j – скорости нагружения (разгружения) оборудования ТЭЦ, участвующего в наборе и сбросе нагрузки; W_c – скорость нагружения (разгружения), заданная суточным графиком для рассматриваемой ТЭЦ; m – число агрегатов, участвующих в наборе и сбросе нагрузки.

При этом накладываются ограничения на диапазоны изменения оптимизируемых параметров (электрическая и тепловая нагрузки каждого агрегата станции).

$$\sum_{j=1}^{n} N_j = N_\Sigma, \quad \sum_{j=1}^{n} Q_j = Q_\Sigma, \tag{3}$$

$$N_j^{\min} \le N_j \le N_j^{\max}, \quad Q_j^{\min} \le Q_j \le Q_j^{\max}, \quad j = 1, 2,..., n, \tag{4}$$

При решении поставленной задачи на практике, как правило, возникает еще ряд дополнительных ограничений, связанных с особенностями эксплуатации конкретной станции. Также требуется учитывать работу водогрейных котлов.

Наиболее востребованной и важной составляющей критерия оптимальности с точки зрения эффективности работы станции обычно является экономическая составляющая, которая характеризуется суммарным расходом топлива на станцию. Поэтому важную роль для решения оптимизационной задачи в поставленном виде играют расходные характеристики оборудования ТЭЦ.

Следует отметить, что диапазоны изменения электрической нагрузки также зависят и от значения тепловой нагрузки, образуя при этом область определения нагрузок для конкретного режима агрегата.

В табл. 1 показана матрица возможных режимов работы ПГУ на примере блока ПГУ-450Т Северо-Западной ТЭЦ Санкт-Петербурга [3, 4].

Таблица 1

Матрица возможных режимов работы ПГУ-450Т

Относительная электрическая нагрузка ГТУ, %	Положение диафрагмы (D, %) и состав теплофикационной установки							
	ПТ стоит	D-0	D-100	D-0	D-100	D-0	D-100	D-100
	В работе							
	ПСВ-3 ПСВ-4	ПСГ-1 ПСГ-2 ПСВ-3 ПСВ-4	ПСГ-1 ПСГ-2 ПСВ-3 ПСВ-4	ПСГ-1 ПСГ-2 ПСВ-3	ПСГ-1 ПСГ-2 ПСВ-3	ПСГ-1 ПСГ-2	ПСГ-1 ПСГ-2	
	Температура наружного воздуха, °С							
	-40…40	-40…40	-40…40	-40…40	-40…40	-40…40	-40…40	-40…40
Базовая (100)								
60								
40								
20								
10								
	А	Б	В	Г	Д	Е	И	К

Столбцы табл. 1 характеризуют величину отпускаемой тепловой нагрузки от максимального значения (*А*) до нуля (*К*) при различном сочетании работающих подогревателей сетевой воды и режимах работы паровой турбины.

Следует отметить, что на показатели работы газовых турбин существенно влияет температура наружного воздуха.

Таким образом, расходную характеристику ПГУ можно представить в виде:

$$B = f(t_в, N, Q, n_{реж}), \quad (5)$$

где $t_в$ – температура наружного воздуха; N – электрическая нагрузка блока; Q – тепловая нагрузка блока; $n_{реж}$ – номер режима, определяющего режим работы ПГУ (состав теплофикационной установки, режим работы паровой турбины и количество работающих газовых турбин).

Примеры расходных характеристик, полученные путем аппроксимации данных [3] квадратичными зависимостями по электрической и тепловой нагрузке (расхождение зависимостей – не более 5 %), даны на рис. 2

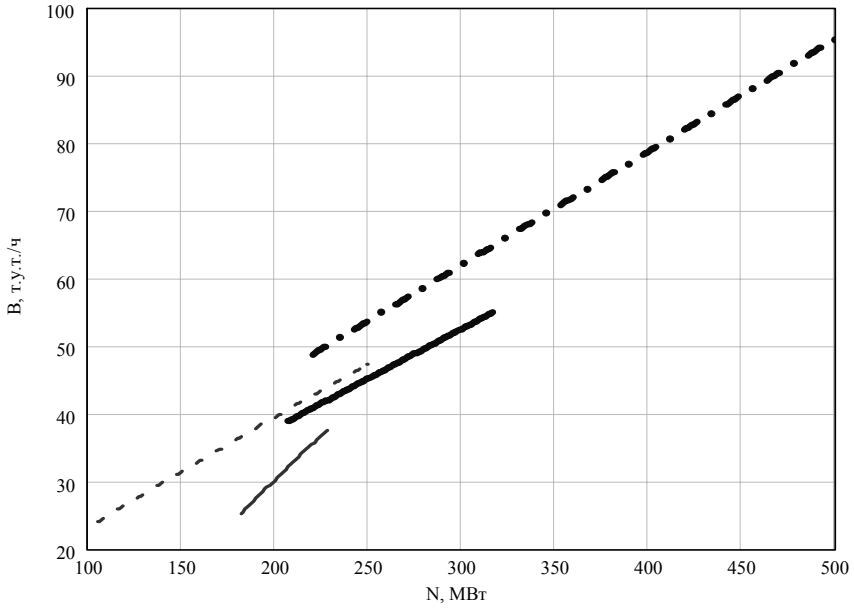


Рис. 2. Расходные характеристики ПГУ-450Т для температуры наружного воздуха – 2,2 °С: тонкие линии – в работе 1 ГТ, толстые – 2 ГТ; сплошные линии – теплофикационные режимы для Q = 150 Гкал/ч, пунктирные – конденсационные режимы

Не показан режим при отключенной паровой турбине, так как в этом режиме электрическая и тепловая нагрузки однозначно связаны друг с другом.

Для эффективного применения методов оптимизации необходимо корректно записать целевую функцию [5] с учетом различных ограничений, поэтому при записи расходной характеристики ПГУ необходимо учитывать область определения параметров каждого из режимов работы.

Данную задачу можно решить, задав функции штрафа по электрической и тепловой нагрузкам, которые бы возрастали с отдалением от границ определения ближайшего режима работы ПГУ.

При таком задании расходной характеристики результатом процедуры оптимизации будет распределение нагрузок только для заранее выбранного режима работы ПГУ. Соответственно, для других режимов необходимо повторно выполнять оптимизацию, что существенно увеличивает трудоемкость расчетов.

Для более эффективного решения задачи можно производить выбор числа работающих ГТ, исходя из экономического критерия с учетом областей определения N и Q при определении расходной характеристики.

В этом случае значения расходных характеристик необходимо сравнивать совместно со штрафными функциями для учета областей возможности применения режимов.

Среди наиболее эффективных методов решения поставленной задачи можно выделить генетические алгоритмы, а также метод динамического программирования, так как они наиболее полно исследуют область определения целевой функции. Однако при большой размерности задачи и при учете различных режимов работы оборудования, метод динамического программирования требует значительных вычислительных затрат, что существенно ограничивает его применение.

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. *Веников В.А.*, *Журавлев В. Г.*, *Филиппова Г.А.* Оптимизация режимов электростанций и энергосистем. – М.: Энергоатомиздат, 1990. – 464 с.

2. *Аракелян Э.К*, *Старшинов В.А.* Повышение экономичности и маневренности оборудования тепловых электростанций. – М.: МЭИ, 1995. – 312 с.

3. *Дьяков. А.Ф.*, *Березинец П.А.*, *Грибов В.Б.*, Теплофикационная парогазовая установка Северо-Западной ТЭЦ Санкт-Петербурга. Статические характеристики. Электрические станции. – 1996. – № 12. – С. 9-16.

4. *Цанев С.В.* Газотурбинные и парогазовые установки тепловых электростанций: Учеб. пособие / *С.В. Цанев*, *В.Д. Буров* и др. – М.: МЭИ, 2002. – 580 с.

5. *Андрющенко А.И.*, *Аминов Р.З.* Оптимизация режимов работы и параметров тепловых электростанций. – М.: Высшая школа. 1983. – 255 с.

ПОСТАНОВКА ЗАДАЧИ ОПТИМИЗАЦИИ РАБОТЫ ТЭЦ С ОПТИМИЗАЦИЕЙ РЕЖИМНЫХ ПАРАМЕТРОВ ЭНЕРГОБЛОКОВ В УСЛОВИЯХ ПЕРЕМЕННЫХ ГРАФИКОВ ЭНЕРГОПОТРЕБЛЕНИЯ

Д.Ю. Цыпулев – аспирант
кафедры АСУ ТП «МЭИ (ТУ)»

В последние годы в энергетике значительно увеличилась доля коммунально-бытовых потребителей с резкопеременным характером электропотребления. Также наблюдается старение вырабатывающих мощностей российской энергосистемы, что приводит к дефициту высокоманевренных агрегатов.

В этих условиях проблема рационального внутрисистемного и внутристанционного оперативного управления режимами работы энергооборудования становится одной из главных задач АСУ на ТЭЦ [1, 2].

Оптимизация режимов работы электростанций и оборудования – традиционно одна из сложных научных задач, обусловленная неопределенностью исходной информации, многовариантностью, трудностью учета реального технического состояния оборудования и т.д. Тем не менее, в настоящее время

разработаны и используются в практике эксплуатации различные модели и программные комплексы на их основе для внутристанционной оптимизации режимов работы оборудования, в том числе и в многокритериальной постановке задачи [2, 3].

Однако в большинстве работ практическое решение задачи распределения нагрузок рассматривается при заданных значениях тепловых нагрузок, при этом не учитывается выработка тепла водогрейными котлами, а также оптимизация режимных параметров самих энергоблоков.

Задача распределения электрической и тепловой нагрузки между оборудованием ТЭЦ в общем случае имеет вид [2]:

$$\left.\begin{aligned} F_1(x) &= \sum_{j=1}^{n} B_j(n_{реж}, p_j, q_j, \Pi_k(p_j, q_j)) \to \min_x \\ F_2(x) &= \sum_{j=1}^{n} f_{\text{j}}(n_{реж}, p_j, q_j, \Pi_k(p_j, q_j)) \to \min_x \\ F_3(x) &= \sum_{j=1}^{n} G_{\text{j}}(n_{реж}, p_j, q_j) \to \min_x \end{aligned}\right\} \quad (1)$$

при условиях:

$$\sum_{j=1}^{n} p_j = P_\Sigma, \quad \sum_{j=1}^{n} q_j = Q_\Sigma, \quad p_j^{\min} \le p_j \le p_j^{\max}, \quad q_j^{\min} \le q_j \le q_j^{\max}, \quad j = 1, 2, ..., n, \quad (2)$$

где $F_1(x), F_2(x), F_3(x)$ – критерии оптимальности по расходу топлива, надежности и экологии; $B_j(n_{реж}, p_j, q_j, \Pi_k(p_j, q_j))$ – расходные характеристики j-го энергоблока (станции); $f_{\text{j}}(n_{реж}, p_j, q_j, \Pi_k(p_j, q_j))$ – надежностные характеристики блоков; $G_{\text{j}}(n_{реж}, p_j, q_j)$ – экологические характеристики агрегатов; $n_{реж}$ – режим работы энергоблока (конденсационный, теплофикационные); p_j, q_j – электрическая и тепловая мощности j-го блока; P_Σ, Q_Σ – суммарные требуемые – электрическая и тепловая мощности, заданные для всей системы; $p_j^{\min}$, $p_j^{\max}$, $q_j^{\min}$, $q_j^{\max}$ – допустимые пределы нагрузки; $x = \{p, q\} = \{x_1,...,x_n\}$; $p = \{p_1,..., p_n\}$; $q = \{q_1,...,q_n\}$; $\Pi_k(p_j, q_j)$ – комплекс режимных параметров энергоблока, зависящих от нагрузок агрегата (в общем случае, требующих подбора оптимальных значений).

Таким образом, мы получили трехкритериальную задачу статической оптимизации (1) с рядом ограничений (2), включающую в себя подзадачу оптимизации режимных параметров энергоблока.

Также, в зависимости от конкретной постановки задачи, на реальной ТЭЦ могут вводиться дополнительные ограничения, обусловленные особенностями данной станции (ограничение по суммарному объему сжигаемого газа, возможность работы энергоблоков на различном топливе и в различных режимах, наличие водогрейных котлов и др.).

Для достижения эффективных результатов решения поставленной задачи (1) очень важно решение подзадачи оптимизации комплекса режимных параметров каждого энергоблока, входящего в состав ТЭЦ, так как его результаты являются основой для исходной информации распределения нагрузок по станции.

Ниже приведено рассмотрение влияния параметров блока на примере давления острого пара на расходную характеристику паротурбинного энергоблока (экономичность работы блока) [4, 5].

В результате экспериментальных и расчетных исследований режима СКР [5] для энергоблока Т-250 ТЭЦ-25 были построены расходные характеристики блока для различных режимов регулирования нагрузки. На рис. 1 представлено сравнение удельных расходных характеристик блока при тепловой нагрузке 140 Гкал/ч.

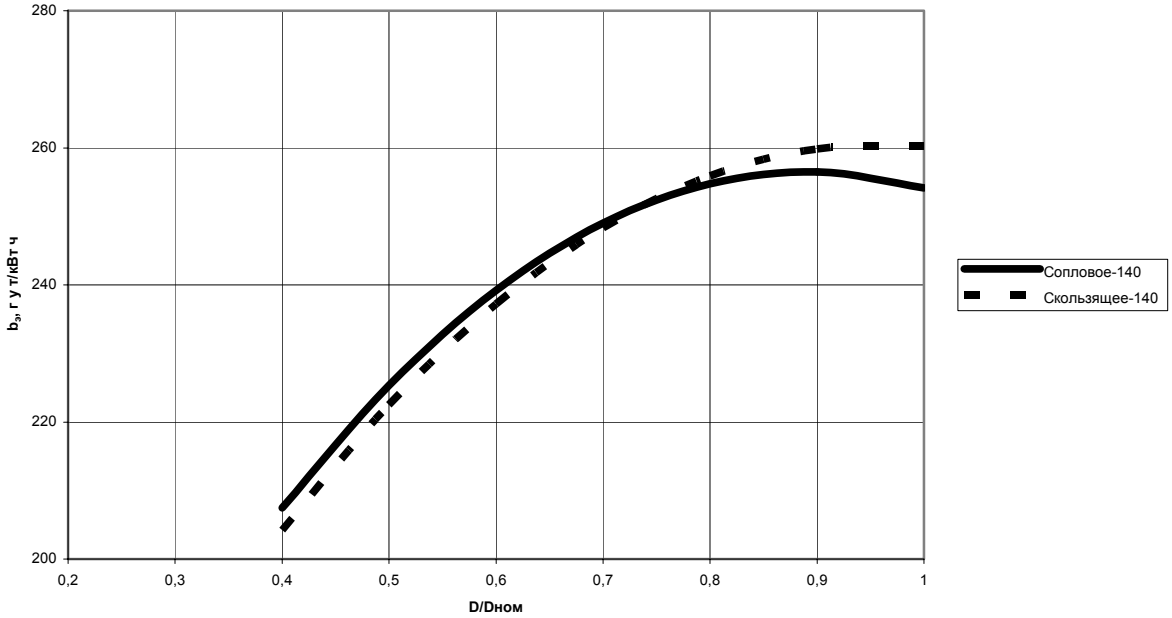


Рис. 1. Сравнение эффективности режимов регулирования нагрузки для энергоблока Т-250

Как видно из графика, применение скользящего регулирования эффективно на относительных нагрузках до 0,73 (расход пара на турбину). Следует отметить, что эффективность применения режима СКР также зависит от значения тепловой нагрузки блока.

Таким образом, при решении задачи оптимального распределения электрической и тепловой нагрузки между оборудованием ТЭЦ необходимо учитывать возможность работы блока в режимах с различным регулированием нагрузки, то есть необходимо сначала построить обобщенную (оптимальную) расходную характеристику (использование комбинированного регулирования), которая бы учитывала переход блока из одного режима в другой в зависимости от его электрической и тепловой нагрузки, исходя из минимума критерия оптимальности (например, минимум расхода топлива на блок).

Данную характеристику можно получить, используя метод динамического программирования, а также используя логическое задание функции расходной характеристики. На рис. 2 показан пример расходной характеристики энергоблока Т-250 ТЭЦ-25 для оптимизации давления острого пара в зависимости от электрической нагрузки при тепловой нагрузке 140 Гкал/ч.

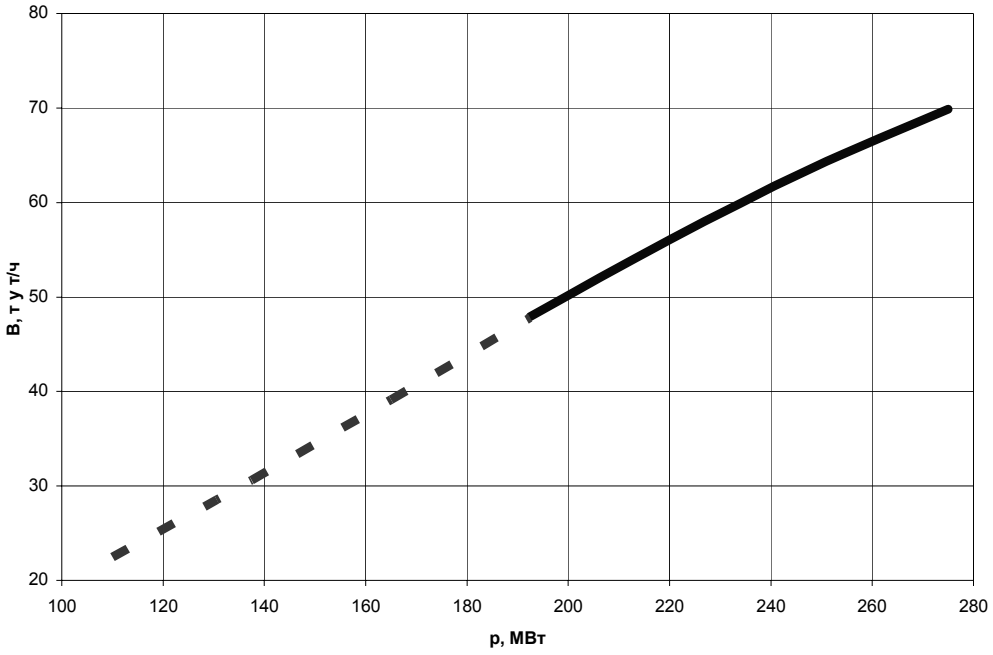


Рис. 2. Обобщенная расходная характеристика энергоблока Т-250 при оптимизации давления острого пара в зависимости от нагрузки

Характеристика представляет собой участки полинома второго порядка по электрической и тепловой нагрузке.

Также при решении данной задачи необходимо учитывать области определения расходных характеристик для каждого способа регулирования.

В общем случае, при экономическом критерии оптимальности, имея зависимости влияния режимных параметров на расходные характеристики блока, можно найти оптимальное значение каждого параметра для определенного сочетания электрической и тепловой нагрузки блока. В результате получим эквивалентную характеристику блока, зависящую только от его нагрузок.

При создании алгоритмов и программы оптимизации режимов работы электростанции весьма важным является обоснованный выбор математического метода поиска экстремума сформированной целевой функции.

Существует множество методов поиска экстремума, которые широко приводятся в литературе для решения поставленной задачи, однако многие из них критичны по отношению к виду целевой функции.

Например, метод множителей Лагранжа эффективен только для дифференцируемых расходных характеристик, заданных в довольно простом виде. В общем же случае эти функции могут иметь разрывы, обусловленные работой энергоустановок в различных режимах при разных нагрузках.

В настоящее время для решения практических задач оптимизации распределения нагрузок на ТЭЦ широко используются методы направленного поиска, а также методы, основанные на генетических алгоритмах. Однако стоит отметить, что методы направленного поиска не очень эффективны при поиске глобального минимума, а также в условиях сильной пологости целевой функции.

В качестве основы представленного алгоритма для решения задачи (1) предлагается применить метод динамического программирования, как довольно эффективный метод применительно к задачам оптимизации со сложным видом целевой функции, обусловленным выбором режимных параметров блока.

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. *Аракелян Э.К.*, *Старшинов В.А.* Повышение экономичности и маневренности оборудования тепловых электростанций. – М.: МЭИ, 1995. – 312 с.

2. *Веников В.А.*, *Журавлев В.Г.*, *Филиппова Г.А.* Оптимизация режимов электростанций и энергосистем. – М.: Энергоатомиздат, 1990. – 464 с.

3. *Аракелян Э.К.*, *Бурначян Г.А.*, *Минасян С.А.* Влияние режимных факторов и технического состояния на реальные энергетические характеристики энергоблока К-200-130 // Изв. вузов. Энергетика. – 1983. – № 1. – С. 57-62.

4. *Аракелян Э.К.* Методика выбора оптимальных параметров и режимов работы оборудования энергоблоков на частичных нагрузках // М.: Теплоэнергетика. – 2002. – № 4. – Стр. 67-69.

5. *Аракелян Э.К.*, *Цыпин А.В.* Выбор оптимальных параметров эксплуатации теплофикационного энергоблока 250 МВт в режиме скользящего регулирования давления при работе на пониженных нагрузках. Труды международной научной конференции CONTROL-2005. – М.: МЭИ, 2005. – Стр. 12-15.

ДИАГНОСТИКА НАРУШЕНИЙ ВХР БАРАБАННЫХ КОТЛОВ СВД

Б.М. Ларин – д-р техн. наук, профессор
Ивановского государственного энергетического университета
Н.А. Еремина – канд. техн. наук, доцент
Ивановского государственного энергетического университета
Ю.Ю. Тихомирова – аспирантка
Ивановского государственного энергетического университета

Нарушения норм качества теплоносителя энергоблоков с барабанными котлами СВД связаны, прежде всего, с присосами охлаждающей воды в конденсаторах турбин, с нарушением качества добавочной воды или режима дозирования аммиака. В этих условиях химконтроль должен обеспечивать надежное и своевременное получение информации о нормируемых параметрах ВХР путем прямого измерения или косвенного (расчетного) определения соответствующих показателей [1, 2].

Согласно правилам технической эксплуатации в разных точках пароводяного тракта энергоблока контролируются показатели:

а) удельная электропроводность прямой пробы (χ) или Н-катионированной пробы (χ_H), pH, аммиак (NH_3), натрий (Na^+), жесткость, щелочность;

б) железо, медь, кислород и др.

При этом первая группа (а) характеризует названные выше и, как правило, быстротекущие нарушения ВХР конденсатно-питательного тракта (КПТ), и только первые три показателя (χ, χ_H, pH) измеряются автоматическими промышленными приборами с высокой разрешающей способностью. Другие показатели либо не отличаются высокой точностью или надежностью измерения в области предельно разбавленных растворов, какими являются конденсат и питательная вода энергоблоков, либо определяются методами ручного химического анализа. И то и другое снижает в целом оперативность и надежность химического контроля качества питательной воды энергетических котлов и создает значительные препятствия в разработке и внедрении систем химико-технологического мониторинга (СХТМ) водно-химического режима на ТЭС с барабанными котлами. Опыт подтверждает, что надежность работы энергетического оборудования, в том числе поверхностей нагрева, находится на высоком уровне именно на тех ТЭС, где больше внимания уделяется внедрению СХТМ и поддержанию ВХР на должном уровне [3].

Для решения задач автоматизированного химконтроля за качеством конденсата и питательной воды был разработан метод косвенного определения ионных примесей водного теплоносителя энергоблока СВД. Этот метод позволяет рассчитывать концентрации нормируемых примесей (аммиака, натрия, углекислоты, щелочности) по измеренным значениям штатных показателей (рис. 1) [4, 5].

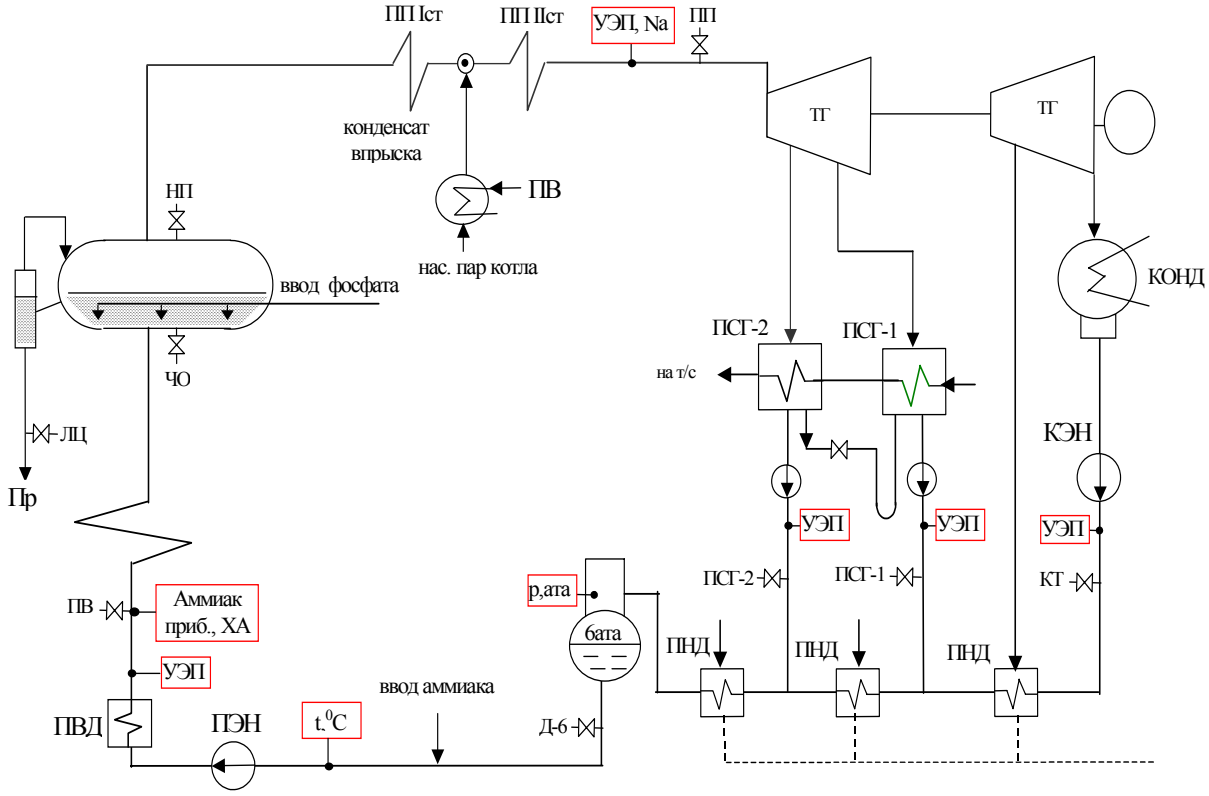


Рис. 1. Принципиальная схема химконтроля за ВХР барабанного котла СВД

Входными данными для математической модели ионных равновесий примесей конденсата и питательной воды являются результаты измерений приборов автоматизированного химконтроля (АХК), то есть результаты измерений удельной электропроводности исходной и Н-катионированной пробы, а также измерение pH и температуры пробы.

Выходными данными являются расчетные значения концентраций аммиака, натрия, хлоридов, а также значение общей щелочности (рис. 2).

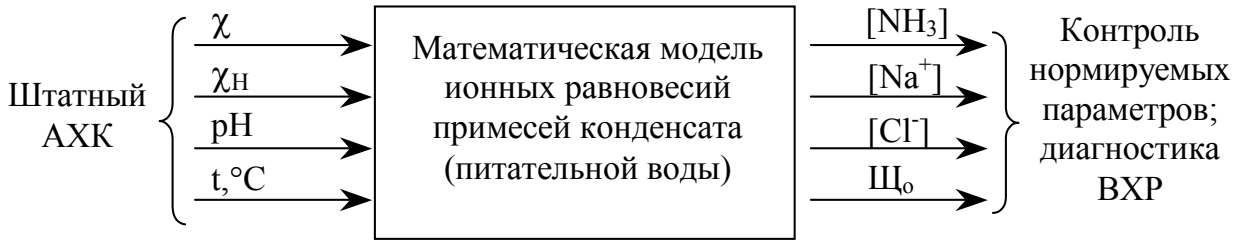


Рис. 2. Принципиальная схема реализации математической модели ионных равновесий вод типа конденсата

Для реализации метода определения качества конденсата и питательной воды была разработана измерительная система (рис. 3). Ввод данных на ЭВМ может осуществляться непосредственно с приборов или в ручном режиме.

Испытание метода косвенных измерений показателей качества конденсата и питательной воды барабанных и прямоточных котлов производилось на котлах ТП-87 Ивановской ТЭЦ-3 и блоках 300 МВт Костромской ГРЭС.

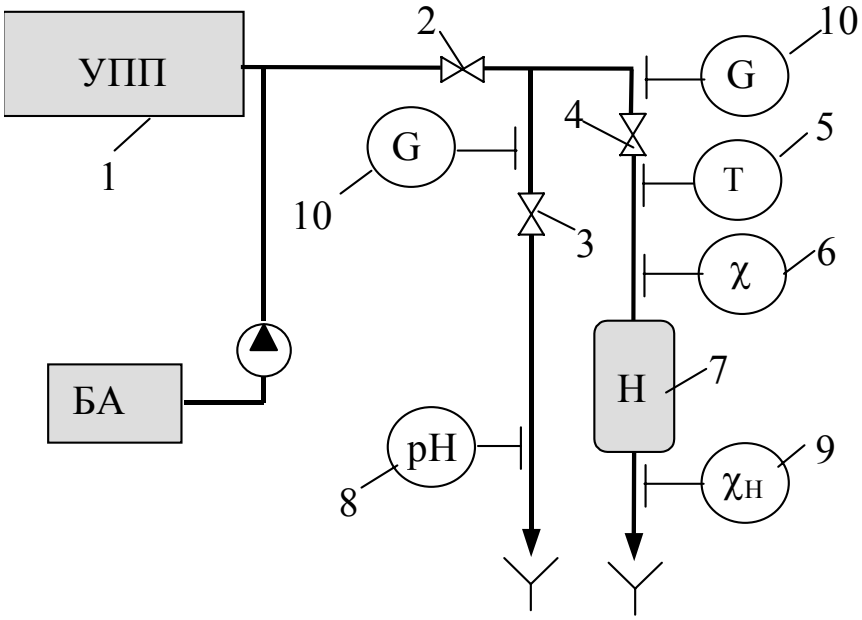


Рис. 3. Принципиальная схема приборного комплекса

1 – типовое устройство подготовки пробы; 2, 3, 4 – клапаны переключения потоков проб; 5 – температурный датчик; 6, 9 – кондуктометр; 7 – Н-катионитная колонка; 8 – pH-метр; 10 – расходомер

Анализ данных показал, что расчетные и измеренные концентрации аммиака хорошо коррелируются (табл. 1).

Разработанная авторами математическая модель [4, 5] учитывает фактическую температуру пробы и практически все основные ионогенные примеси конденсата и питательной воды, адекватно отражает отклонения в состоянии ВХР. При этом есть возможность диагностики нарушений ВХР энергоблока, в том числе присосов охлаждающей воды в конденсаторе турбины, передозировки аммиака в питательную воду, попадания сетевой воды через основной и пиковый бойлера; кроме того, модель позволяет отличать нарушения ВХР от некоторых нарушений в устройствах подготовки пробы.

Таблица 1

Результаты расчета и измерений pH и электропроводности в конденсате турбины и питательной воде барабанного котла и конденсата турбины энергоблока 300 МВт (при имитации присосов охлаждающей воды в конденсаторе турбины и при дозировке аммиака в питательную воду)

Дозирование реагентов в пробу	ΔC, мкг/дм^3	pH	χ, мкСм/см	$\chi_н$, мкСм/см	Расчетные значения			
					$[Na^+]^{усл}$, мкг/дм^3	[Cl$^-$], мкг/дм^3	$[NH_3]$, мкг/дм^3	$Щ_{фф}$, мкг-экв/дм^3
Дозировка NaCl	0	8,88	1,400	0,350	21	65	105	14
	10	8,88	1,440	0,450	35	80	105	15
	40	8,86	1,590	0,600	70	120	100	15
Дозировка NaCl	0	8,94	5,740	0,710	117	176	555	17
	100	8,96	6,560	1,400	214	322	578	17
Дозировка NH_4OH	0	9,17	1,640	0,300	21	24	111	5
	50	9,23	2,130	0,320	22	25	157	7
	200	9,37	3,780	0,330	23	26	348	12
Дозировка NH_4OH	0	9,17	7,660	0,770	118	174	908	24
	250	9,20	9,260	0,770	121	183	1180	28
Дозировка NaCl	0	7,09	0,440	0,254	40	43	27	2,12
	20	7,20	0,504	0,400	54	64	27	2,06
	40	6,73	0,686	0,962	80	110	23	1,71
Дозировка NH_4OH	0	6,83	0,440	0,175	33	22	39	3,02
	20	7,80	0,704	0,180	45	28	61	4,62
	50	8,11	0,909	0,162	29	20	91	4,43
	250	9,03	2,790	0,172	21	27	294	9,24

Разработанный алгоритм поиска нарушений ВХР КПТ предлагается строить, прежде всего обращая внимание на контроль возможных нарушений в измерительной системе (проверка на приемлемость) и с учетом известных наработок и РД. Блок-схема алгоритма приведена на рис. 4.

Измерительная система (рис. 3) и вышеописанный метод положены в основу при создании анализатора примесей конденсата и питательной воды АПК-051, который освоен НПП «Техноприбор» (г. Москва, Россия).

Первый опыт внедрения элементов СХТМ и разработок авторов реализован в 2004 году на Ивановской ТЭЦ-3 (рис. 5).

В настоящее время для контроля за качеством котловой воды барабанных котлов применяются как ручные, так и приборные методы. Автоматический контроль ведется лишь за величиной pH и электропроводностью (в солевых отсеках).

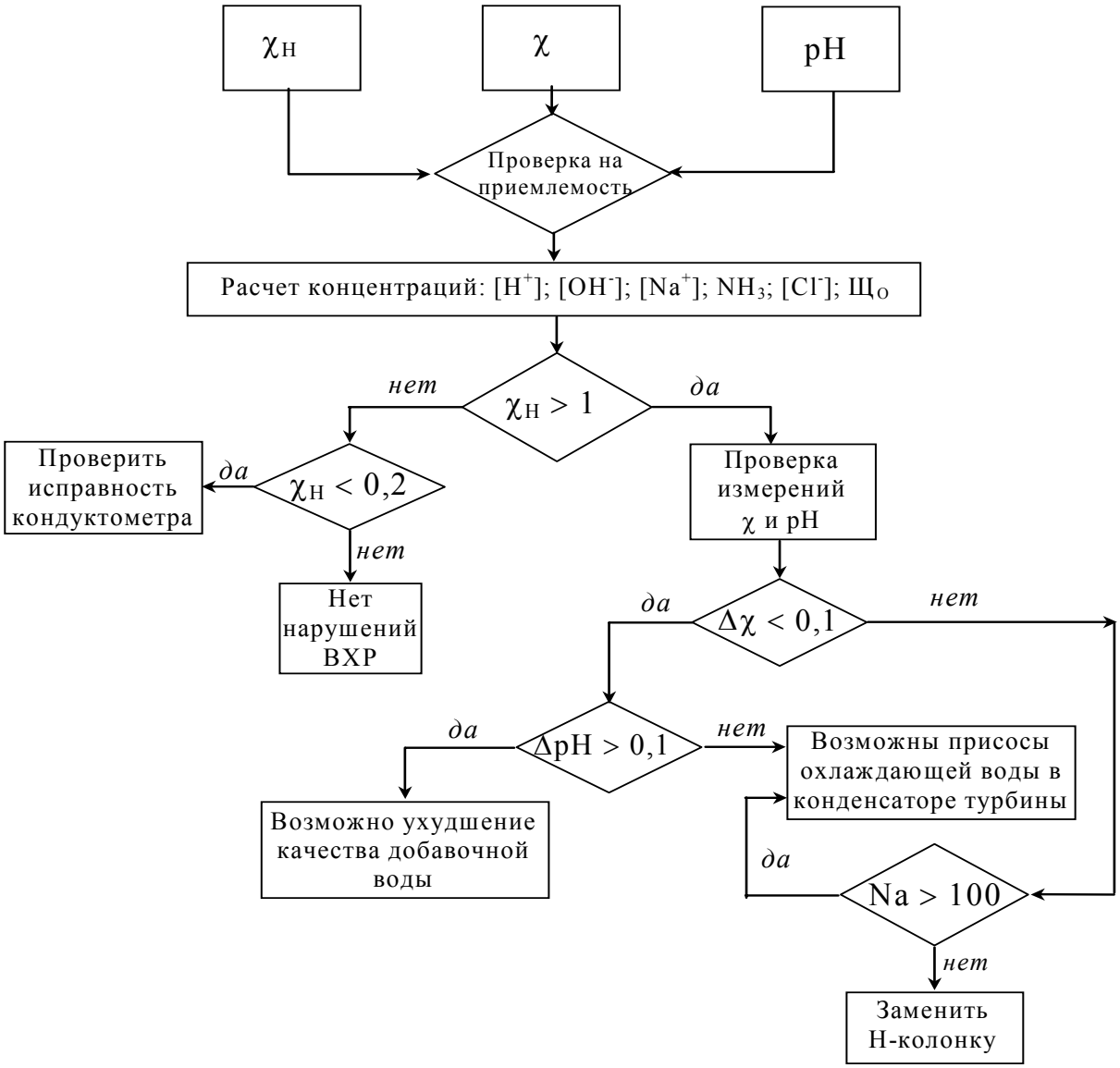


Рис. 4. Алгоритм поиска причины нарушений качества конденсата турбины

К недостаткам схемы автоматического дозирования фосфатов можно отнести отсутствие обратной связи от регулируемого параметра (то есть концентрации фосфатов в котловой воде). Поэтому при такой разомкнутой схеме регулирования наблюдаются достаточно широкие колебания фосфатов как в чистом, так и в солевом отсеках.

В соответствии с изложенным сотрудниками кафедры ХХТЭ ИГЭУ был проведен анализ состояния режимов фосфатирования барабанных котлов ряда ТЭС с определением соотношения χ-PO_4^{3-} (рис. 6), а также предпринята попытка разработки метода количественного контроля избытка фосфатов по измерению удельной электропроводности и pH охлажденной пробы котловой воды.

Из представленных на рис. 6 графиков видно, что на разных котлах, равно как и на одном котле, в разное время отсутствует однозначная зависимость концентрации фосфатов от удельной электропроводности, что практически исключает возможность использования простых эмпирических зависимостей χ-PO_4^{3-}.

Эта разница может быть объяснена различной концентрацией солевых примесей и аммиака, содержащихся в питательной и котловой воде, условиями подачи фосфатов в барабан котла, а также условиями эксплуатации котла.

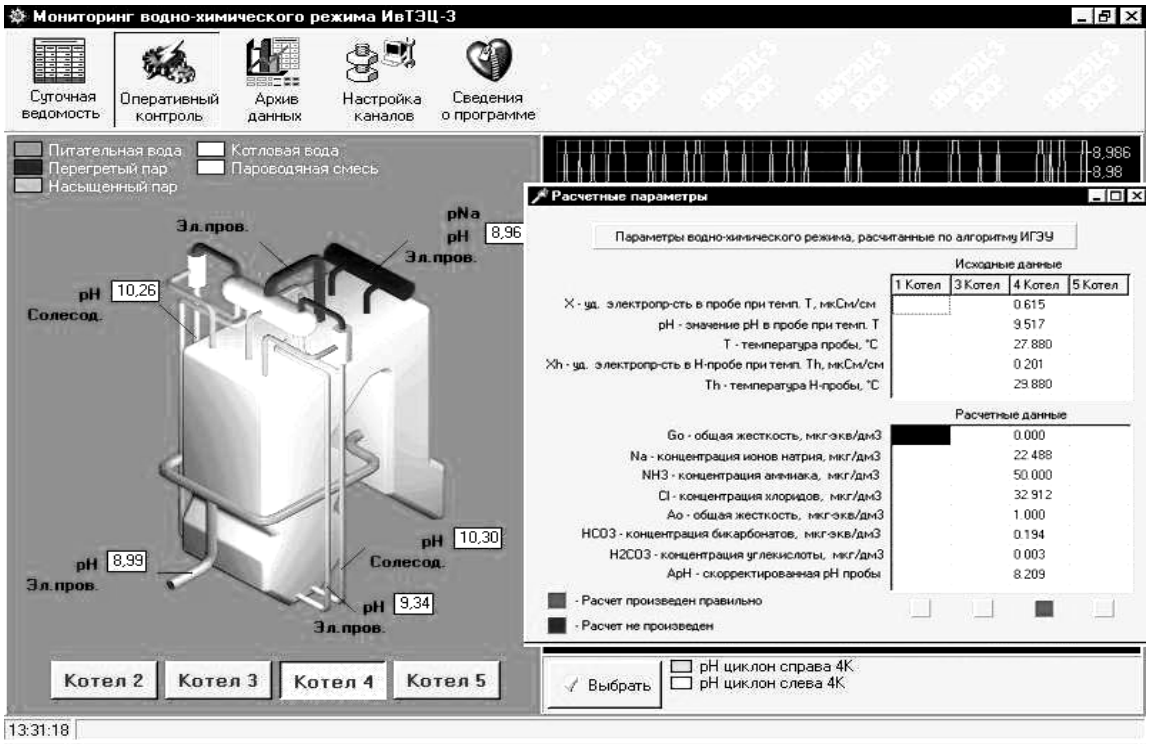


Рис. 5. Экранная форма представления результатов химконтроля ВХР барабанного котла на Ивановской ТЭЦ-3

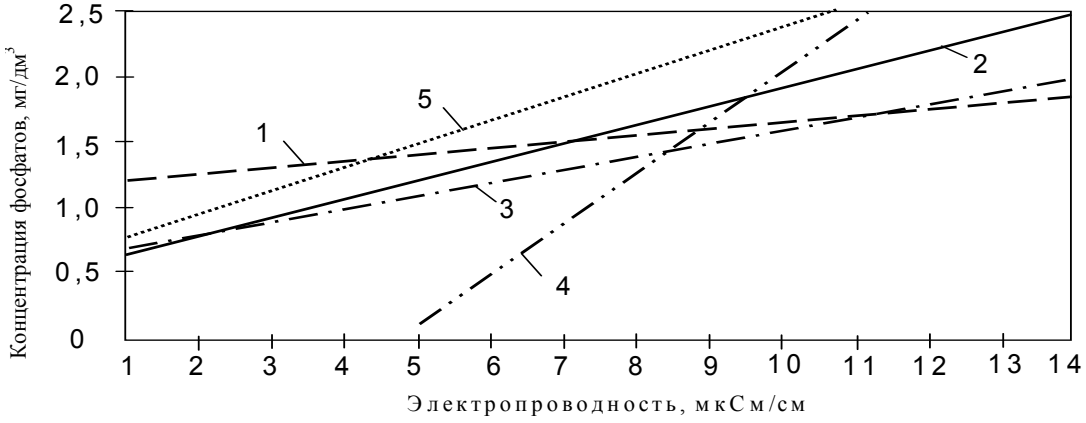


Рис. 6. График зависимости фосфатов от электропроводности котловой воды для ряда ТЭЦ:

1 – данные ВТИ по ТЭЦ-26; 2 – данные авторов по ТЭЦ-26; 3 – данные авторов по Саранской ТЭЦ-2; 4 – данные МЭИ по Петрозаводской ТЭЦ; 5 – данные авторов по Ивановской ТЭЦ-3

Для получения количественного соотношения фосфатов и удельной электропроводности котловой воды авторами составлена и решена математическая модель ионных равновесий котловой воды, которая является развитием разработанной ранее модели ионных равновесий для питательной воды.

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. Общие технологические требования к системам химико-технологического мониторинга водно-химического режима тепловых электростанций (РД 153-34.1-37.532.4-2001).

2. *Назаренко П.Н.*, *Самаренко В.Н.*, *Квасова О.Ф.*, *Невский С.В.* Опыт построения системы химико-технологического мониторинга паровых котлов ТГМ-96 с последующей интеграцией ее в АСУ ТП // Теплоэнергетика. – 2001. – № 4.

3. *Паули В.К.* Экспертная система контроля и оценки условий эксплуатации котлоагрегатов ТЭС // Теплоэнергетика. – 1997. – № 5. – С. 38-43.

4. *Ларин Б.М.*, *Еремина Н.А.* Расчет минерализации и концентрации аммиака и углекислоты в водах типа конденсата // Теплоэнергетика. – 2000. – № 7. – С. 10-14.

5. *Ларин Б.М.*, *Бушуев Е.Н.*, *Козюлина Е.В.* Повышение информативности мониторинга водного режима конденсатно-питательного тракта энергоблоков // Теплоэнергетика. – 2003. – № 7. – С. 2-8.

ПОВЫШЕНИЕ ЭФФЕКТИВНОСТИ ВАКУУМСОЗДАЮЩИХ СИСТЕМ ТЕПЛОЭНЕРГЕТИЧЕСКИХ УСТАНОВОК

Д.А. Козлов – аспирант
Волгоградского государственного технического университета
В.М. Ящук – канд. техн. наук, доцент
Волгоградского государственного технического университета

Жидкостно-газопаровые струйные аппараты (ЖГПСА) широко применяются в различных теплоэнергетических установках для поддержания вакуума в конденсаторах паровых турбин и в деаэраторах воды тепловых электростанций.

По конструктивному признаку ЖГПСА можно разделить на аппараты с конической и цилиндрической камерами смешения, а также на бездиффузорные и с диффузором.

Высокую эффективность показали бездиффузорные ЖГПСА с удлиненной цилиндрической камерой смешения ЭВ-7-1000 ВТИ [1], заменившие менее экономичные водовоздушные эжекторы марки ЭВ-4-1400 ЛМЗ.

Конструкция эжектора ЭВ-7-1000 ВТИ представлена на рис. 1.

Аппарат имеет водяную камеру, из которой вода поступает к 7 рабочим соплам, образующим с установленными с ними соосно трубами струйные эжекторы. В общую приемную камеру эжекторов, под действием создаваемого жидкостными струями разрежения, засасывается паровоздушная смесь из конденсатора. Смешение жидкостного и паровоздушного потоков происходит в трубах, после чего смесь попадает в общую сливную трубу.

Работа эжекторов может осуществляться в двух режимах – дозвуковом и сверхзвуковом.

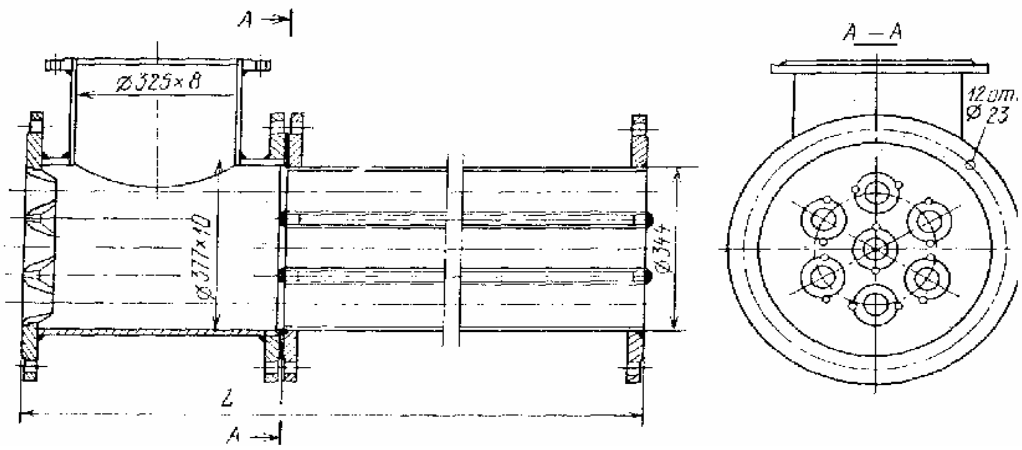


Рис. 1. Семиканальный водовоздушный эжектор ЭВ-7-1000 ВТИ

При малых значениях давлений, что характерно для конденсационных установок, ЖГПСА работают в сверхзвуковом режиме. Сверхзвуковая скорость в движущемся потоке возникает в том случае, когда местное значение давления не превышает определенной величины, зависящей от объемной расходной концентрации газа и жидкости. Однако при низких давлениях всасывания в условиях работы конденсатора изотермический КПД составляет всего 5-10 %.

Эффективность работы ЖГПСА, оцениваемая изотермическим КПД, рассчитываемым из условий сжатия газа от давления p_g до p_m:

$$\eta_{is} = g\rho_l \frac{G_g R_g T_l \ln\left(p_m / p_g\right)}{G_l\left(p_l - p_m\right)},$$

где G_g и G_l – массовый расход газовой и жидкой фаз; ρ_l, ρ_g, ρ_m – плотности жидкой, газовой фазы и газожидкостной смеси; R_g – универсальная газовая постоянная; T_l – температура жидкой фазы; g – ускорение свободного падения.

Исследования прошлых лет [2] показали эффективность использования эжекторов ЭВ-7-1000 ВТИ на практике. Максимально эффективным для них является дозвуковой режим работы, при котором величина η_{is} может достигать 40 % и выше.

Водовоздушные эжекторы, работающие на современных ГРЭС, ТЭС, АЭС, как правило, рассчитаны по эмпирическим методикам и, вследствие недостаточной точности, требуют корректировки.

В литературе [3] приводятся сравнительные характеристики расчета жидкостно-газовых струйных аппаратов по различным методикам (рис. 2), иллюстрирующие зависимость давления газового потока на входе в аппарат $p_{g,0}$ от массового коэффициента эжекции K_M, при заданных давлениях жидкостного потока на входе камеры смешения $p_{l,0}$, давления смеси на выходе из камеры смешения $p_{m,3}$ и определенного соотношения площадей струи и трубки камеры смешения $A_{g,1}$/ $A_{l,1}$.

Видно, что расхождение результатов расчетов значительно, и существенным образом зависит от K_M. Следовательно, ни одна из методик расчета не может быть предпочтительна и требуется дальнейшее их совершенствование, позволяющее повысить точность расчета и конкретизировать область их возможного использования.

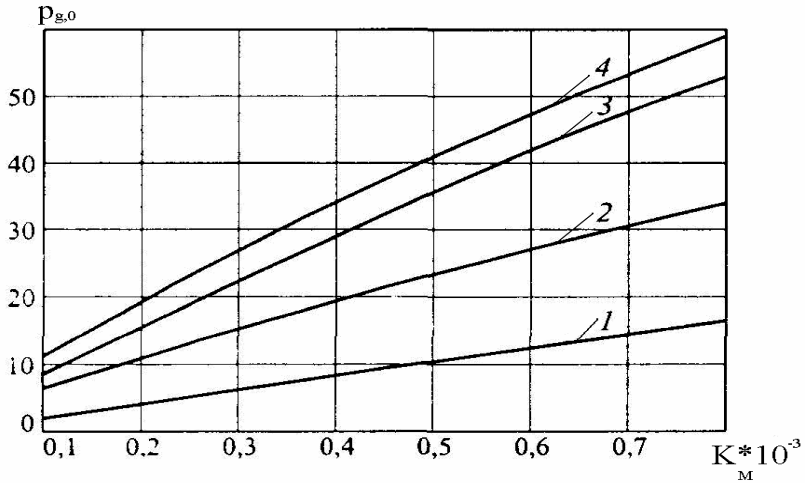


Рис. 2. Сравнение результатов расчета характеристик водовоздушного эжектора ($p_{l,0}$ = 746 кПа; $p_{m,3}$ = 132 кПа; $A_{g,1}/ A_{l,1}$ = 4,9):

1 – по Ю.Н. Васильеву; 2 – по М.И. Баженову; 3 – по Н.М. Зингеру; 4 – по Л.Д. Берману, Г.И. Ефимочкину

Повышение эффективности работы ЖГПСА при создании вакуума в теплоэнергетических установках дает существенный экономический эффект, поэтому встает задача совершенствования их конструкции и оптимизации режима работы.

С этой целью в Волгоградском государственном техническом университете проводятся исследования, направленные на изучение процессов, протекающих в ЖГПСА, обобщение теоретических и экспериментальных результатов и уточнение методик их расчета.

Один из элементов этих исследований – математическое моделирование гидродинамики и тепломассообмена в ЖГПСА.

Моделирование выполняется с помощью компьютерной программы Flow-3D, позволяющей учесть основные конструктивные особенности аппарата, в котором исследуется течение и физические свойства потоков.

Выполненные расчеты позволили выявить следующие недостатки конструкции эжектора ЭВ-7-1000 ВТИ:

– расстояние между срезом жидкостного сопла и входом в камеру смешения слишком велико, в результате чего увеличиваются потери энергии, так как эжекция начинается при входе струи в камеру смешения;

– эжектируемая парогазовая смесь оказывает влияние на жидкостные струи, нарушая их осесимметричность, а на их поверхности под действием возмущений образуются волны, в результате чего снижается эффективность процесса эжекции и нарушается равномерность распределения парогазовой смеси между камерами смешения.

Также было установлено, что недостаточная жесткость конструкции эжектора ЭВ-7-1000 ВТИ способствует усилению вибраций, что особенно проявляется при последовательной работе нескольких аппаратов.

В результате проведенных исследований были разработаны конструктивные усовершенствования эжекторов, подобных ЭВ-7-1000 ВТИ, способствующие повышению эффективности их работы.

На рис. 3 показана конструктивная схема усовершенствованного аппарата.

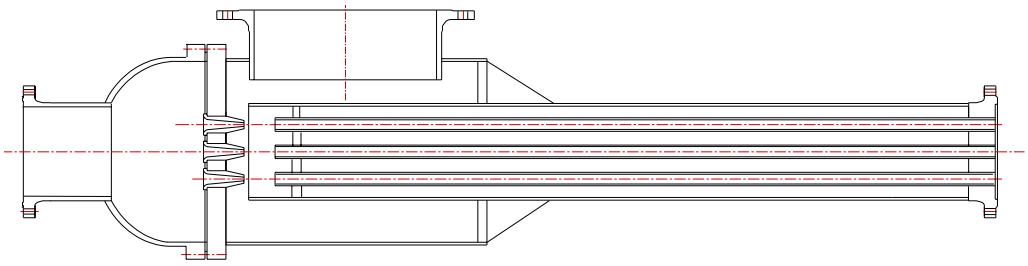


Рис. 3. Конструктивная схема водовоздушного эжектора

Анализ результатов расчетов картины течения и основных технологических параметров для аппарата данной конструкции позволил установить, что для получения максимальной эффективности в дозвуковом режиме необходимо, чтобы:

– срез сопла отстоял от входа в цилиндрическую камеру смешения не более 5 диаметров струи;

– обеспечивался осесимметричный подвод парогазового потока к входу в камеру смешения;

– отношение диаметра трубок камеры смешения было не более чем в пять раз больше диаметра струи.

Кроме того, установлено, что:

– предпочтительным является вертикальное расположение аппарата;

– необходимо обеспечить максимальную жесткость трубок за счет установки дополнительных перегородок;

– эффективным методом управления режимом работы аппарата может быть изменение температурных условий в камере смешения, обеспечиваемое размещением трубок камеры смешения внутри герметичного кожуха, через который прокачивается теплоноситель (хладоагент).

Практическая реализация предложенных усовершенствований позволяет повысить эффективность работы ЖГПСА данной конструкции и тем самым повысить эффективность всей энергетической установки.

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. *Соколов Е.Я.* Струйные аппараты / *Е.Я. Соколов*, *Н.М. Зингер*. – 3-е изд., перераб. – М.: Энергоатомиздат, 1989. – 352 с.

2. *Ефимочкин Г.И.* Конструкция и расчет водоструйных эжекторов с удлиненной камерой смешения / *Г.И. Ефимочкин* // Теплоэнергетика. – 1982. – № 12. – С. 48-51.

3. *Цегельский В.Г.* Двухфазные струйные аппараты / *В.Г. Цегельский*.– М.: МГТУ им. Н.Э. Баумана, 2003. – 408 с.

РАЗРАБОТКА АЛГОРИТМА УПРАВЛЕНИЯ КОТЕЛЬНЫМ АГРЕГАТОМ ПО ЭФФЕКТИВНОСТИ ЕГО РАБОТЫ

В.С. Кузеванов – д-р техн. наук, профессор,
директор филиала «МЭИ (ТУ)» в г. Волжском
Н.А. Грошев – начальник смены цеха ТАИ
ВПП филиала «Волгоградская генерация» ОАО «ЮГК ТГК-8»
А.С. Филюшкин – инженер АСУ ТП цеха ТАИ
ВПП филиала «Волгоградская генерация» ОАО «ЮГК ТГК-8»

В настоящий момент остро стоит проблема экономии топлива при неизменной тенденции роста числа потребителей, что приводит к необходимости поиска различных методов, обеспечивающих увеличение эффективности производства электрической энергии и тепла. Одним из таких решений является метод повышения коэффициента полезного действия энергетического блока, составной частью которого является котельный агрегат. Существующие системы автоматического регулирования непригодны для решения данной проблемы. Именно поэтому представляется необходимой разработка новых алгоритмов регулирования, способствующих уменьшению материальных затрат при неизменной производительности имеющегося оборудования.

Основной задачей является разработка системы контроля и управления, основанной на обобщенном показателе эффективности работы котлоагрегата, а в частности, введение нового технологического параметра. На рис. 1 представлено варьирование КПД котельного агрегата.

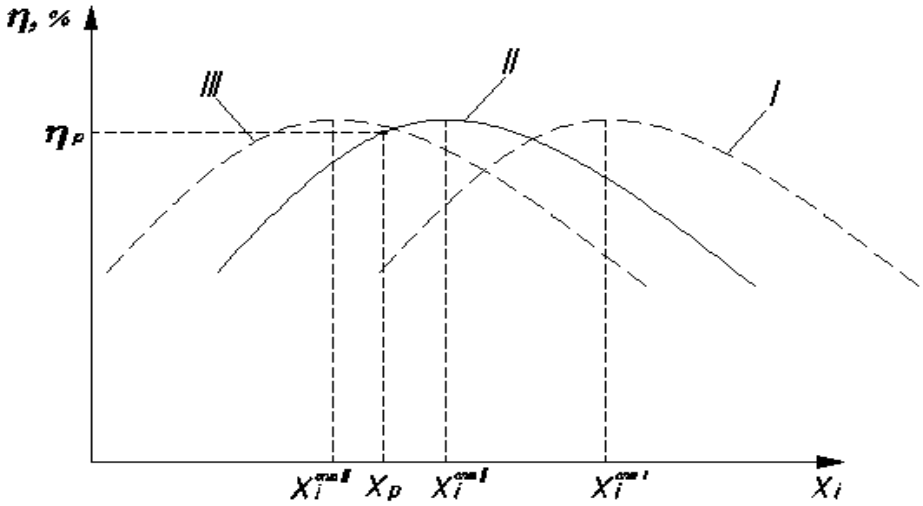


Рис. 1. Варьирование КПД котельного агрегата

Для достижения поставленной цели в качестве объекта управления выбран барабанный котел ТГМ-84Б.

В ходе исследования объекта составлена структурная модель, из которой были исключены слабо влияющие на обобщенный критерий связи и добавлены новые каналы, обеспечивающие поиск и контроль данного критерия.

Для определения показателя эффективности выбраны следующие каналы: расход топливовоздушной смеси (X_1) – температура пара на выходе из котлоагрегата (Y_1), расход топливовоздушной смеси (X_1) – расход перегретого пара (Y_5), расход топливовоздушной смеси (X_1) – давление перегретого пара (Y_6) ($i(Y_6)$ – энтальпия перегретого пара), расход питательной воды (X_2) – расход перегретого пара (Y_5).

На основании данных входных и выходных параметров была разработана структура математической модели барабанного котла (рис. 2) и разработан алгоритм вычисления обобщенного показателя эффективности (ЭО), который имеет вид:

$$\text{КПД} = \frac{Y_1 \cdot Y_5 \cdot i(Y_6)}{\int X_1(t) h_1 1(t-\tau) d\tau \cdot \int X_2(t) h_2\ 5(t-\tau) d\tau \cdot i(Y_6)}. \qquad (1)$$

Для идентификации модели объекта управления был проведен ряд пассивных и активных экспериментов по выбранным каналам.

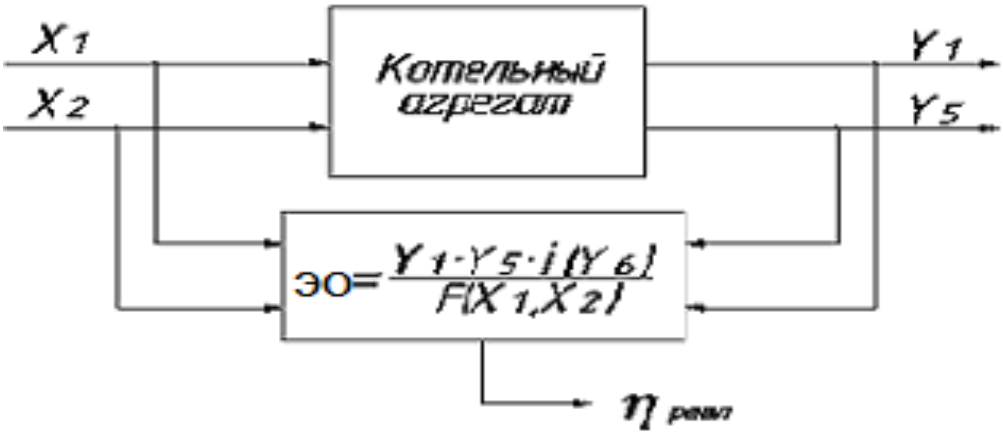


Рис. 2. Вычисление эффективности работы

При проведении активных экспериментов наносилось искусственное возмущение регулярной формы по входной координате и регистрировалось изменение выходного параметра. Переходный процесс аппроксимировался решением линейного дифференциального уравнения с постоянными коэффициентами.

В пассивных экспериментах фиксировалось естественное движение объекта в процессе его нормального функционирования. Полученные реализации массивов данных входных и выходных сигналов обработаны статическими методами. По результатам обработки получены параметры передаточных функций объекта и проверена адекватность математической модели.

Результаты активного и пассивного эксперимента, а также проверка на адекватность для канала расход топливовоздушной смеси (X_1) – температура пара на выходе из котлоагрегата (Y_1) для примера сведены в таблицу 1 и таблицу 2 соответственно.

Методика оценки и прогнозирования эффективности управления основана на использовании минимизации статистического критерия – функции риска

(математического ожидания функции потерь). Применение статистического критерия делает необходимым производить имитацию процесса управления в условиях случайных возмущений.

Для этих целей наиболее целесообразным является метод статистического моделирования на цифровой вычислительной технике. Метод заключается в том, что все функции времени моделируются как случайные процессы с заданными характеристиками.

Таблица 1

Результаты активного и пассивного экспериментов

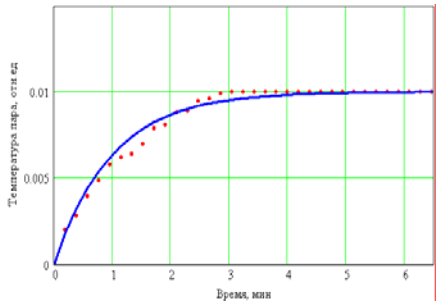
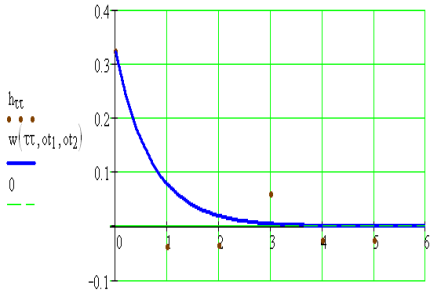
Передаточная функция	Вид передаточной функции	Вид кривой разгона и импульсной характеристики
W_{11} активный	$W_{11}(p)=\dfrac{0.23\cdot e^{-1.6p}}{0.99\cdot p+1}$	
W_{11} пассивный	$W_{11}(p)=\dfrac{0.23\cdot e^{-1.7p}}{0.71\cdot p+1}$	

Таблица 2

Результаты проверки адекватности математической модели

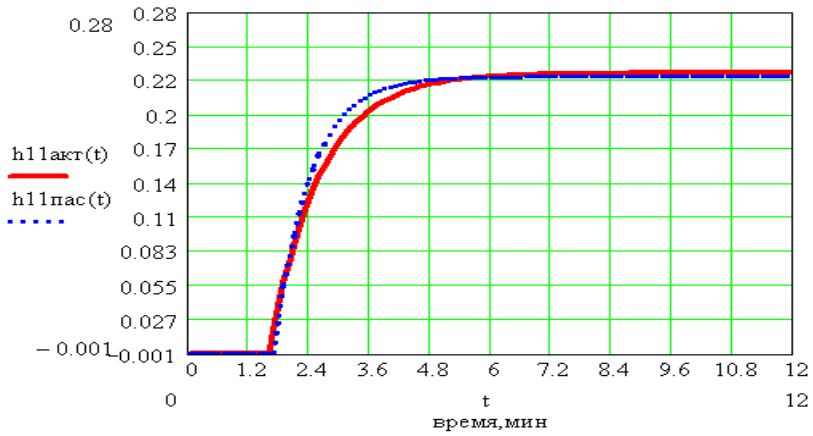
Передаточная функция по каналу	Вид разгонных характеристик
$X_1 - Y_1$	

Схема имитации процесса управления, при котором это может быть, представлена на рис. 3.

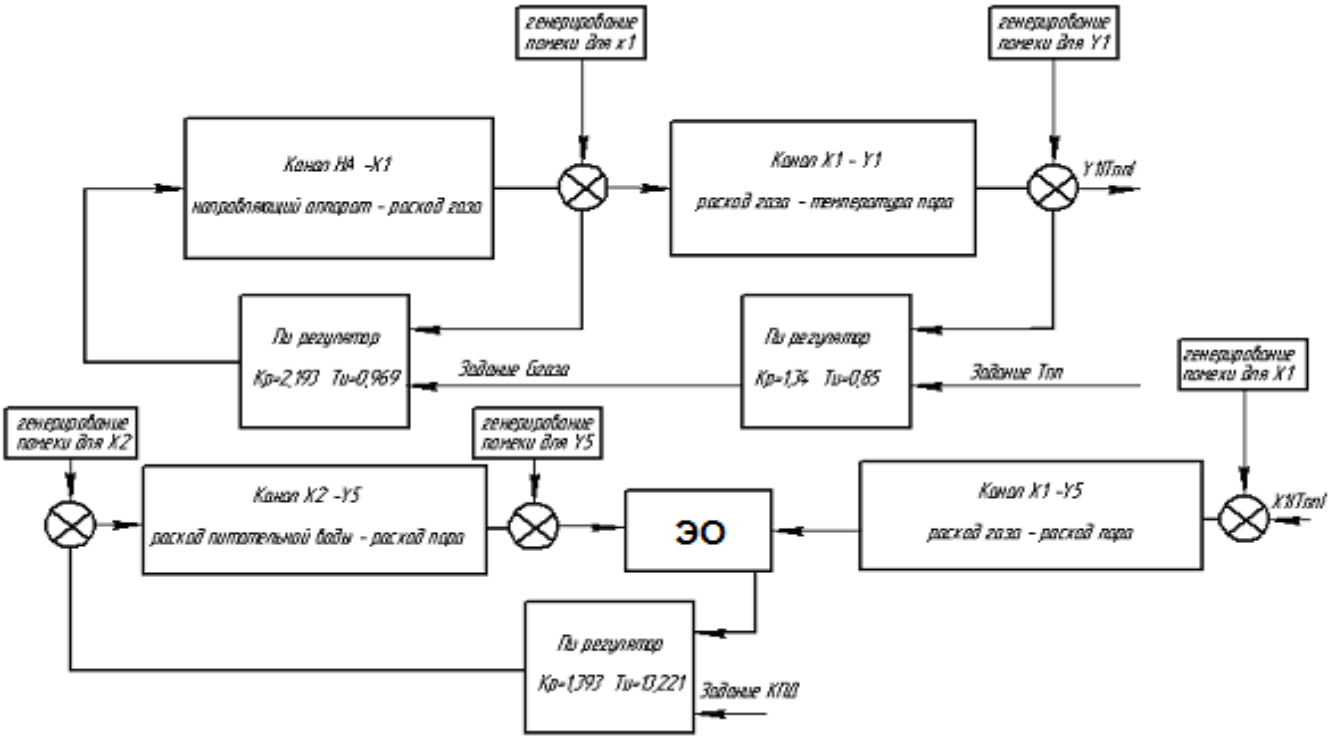


Рис. 3. Детализированная структурная схема моделирования процесса управления коэффициентом полезного действия по каналам $X_1 - Y_5$, $X_2 - Y_5$, $X_1 - Y_1$

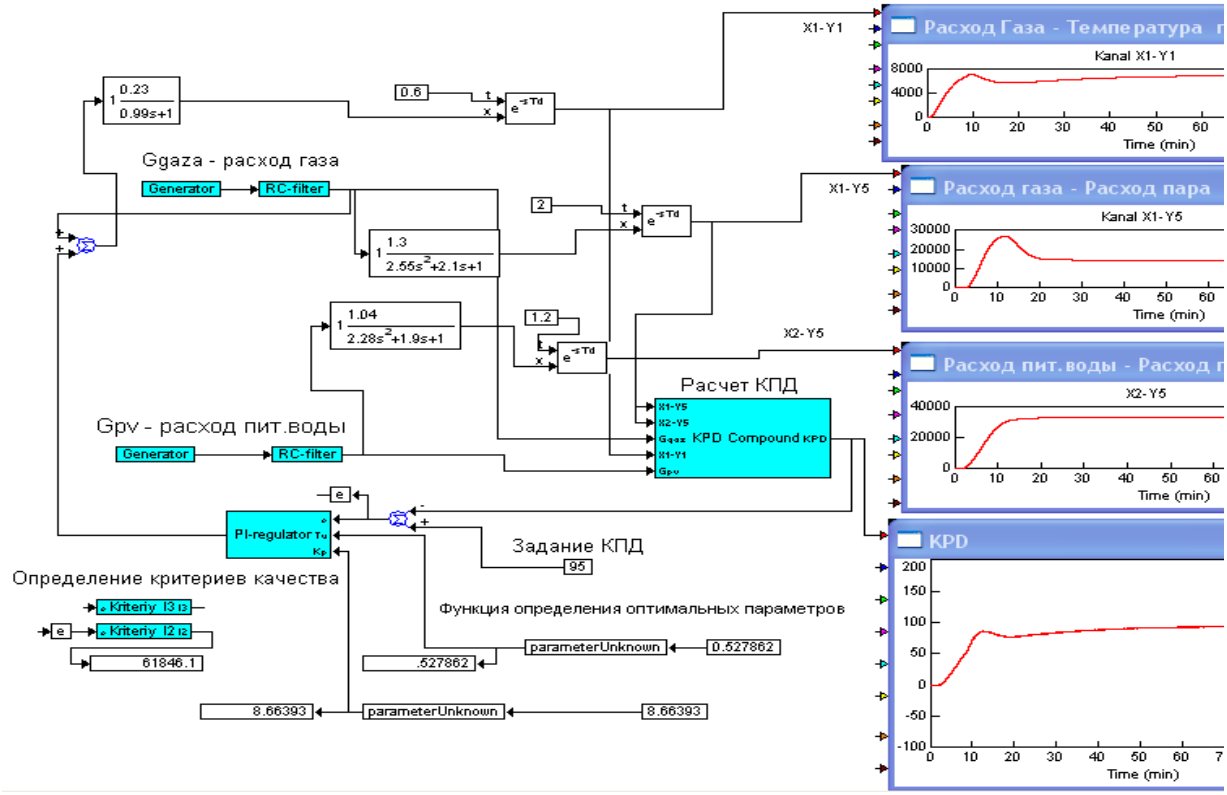


Рис. 4. Реализация алгоритма управления по эффективности работы

С помощью полученных моделей разработаны алгоритмы управления по выбранным каналам, работоспособность алгоритмов исследована имитационными методами в среде Mathcad и Vissim. Пример реализации алгоритма управления в среде Vissim приведен на рис. 4.

В настоящий момент ведутся работы по созданию виртуального и реального приборов, отображающих эффективность работы котельного агрегата. В дальнейшем планируется разработка системы автоматического управления, поддерживающая на должном уровне обобщенный показатель эффективности работы. Данная система должна применяться не для одного агрегата, а для группы котлов на станциях с поперечными связями, что позволит при изменении тепловой и электрической нагрузки воздействовать именно на тот агрегат, на котором потери будут ниже.

ОПЫТ ИЗУЧЕНИЯ ЯЗЫКОВ МЭК 61131-3 В ВУЗЕ НА ПРИМЕРЕ ИСПОЛЬЗОВАНИЯ ПАКЕТА CODESYS ФИРМЫ 3S

И.Е. Грязнов – канд. техн. наук, доцент
Волгоградского государственного технического университета

Один из предметов, который я преподаю, это «Микропроцессорные средства автоматизации». В рамках этого предмета рассматриваются наши отечественные контроллеры ЗАО «Волмаг» КР-300. Проводятся лабораторные работы по изучению языков программирования данного контроллера, языка ФАБЛ (язык функциональных блоков) и языка ПРОТЕКСТ (процедурный текст). Язык ФАБЛ – это инструмент для работы, в основном, с непрерывными процессами, а ПРОТЕКСТ – для работы с логикой. По окончании семестра я получаю определенную статистику. Она говорит, что для среднего студента изучение данных языков и выполнение лабораторных работ с их применением достаточно необычно.

Связано это, наверное, с тем, что под словом «программирование» понимается написание программ для компьютера, и у студента возникают определенные ассоциации. При написании технологических программ для контроллера старые, имеющиеся у студента ассоциации не работают. Термин «программирование» здесь трансформируется в «проектирование», со всеми вытекающими последствиями.

Несколько позже появились мысли дать пакет CoDeSys и на нем обучать языкам МЭК. Я стал проводить лабораторные и семестровые работы на CoDeSys. Лабораторные работы, которые я давал, включали проект на одном из языков, а семестровые – этот же проект на всех языках пакета. В качестве проекта давались замкнутые системы регулирования. Моделирование объектов производилось средствами пакета на одном из стандартных языков.

Такие схемы достаточно интересны для студентов, так как они заставляют работать творчески. В каждом проекте есть блоки, которых нет в чистом виде в библиотеках CoDeSys. Их надо создавать.

Это звенья запаздывания, интегродифференцирующие звенья. Когда задачи подобного рода выполняются, можно с уверенностью сказать, что студенты освоили пакет и стандартные языки в рамках этого пакета.

После окончания работы с CoDeSys я провел эксперимент. Желающим студентам раздал другие пакеты – Concept, IsaGRAF, Multiprog, OpenPCS, 4Control и даже Step7. И получил интересный результат. Те работы, которые я раздал, делались самостоятельно, почти без труда. Тот багаж, который они получили при работе с CoDeSys, достаточен при работе практически с любым пакетом стандарта МЭК.

По моему мнению, специалист, получивший подготовку на пакете такого уровня, как CoDeSys, самодостаточен. Если вдруг в своей практической инженерной работе он столкнется с решением задач на контроллерах других фирм, например, OMRON, FANUC, то он не почувствует себя дискомфортно.

Исходя из вышесказанного, можно сделать следующее предложение: специалист в области автоматизации должен изучать ассемблер, Паскаль и СИ. Далее можно остановиться на пакете CoDeSys и на нем изучать стандартные языки. После этого желательно студенту дать анализ десятка основных пакетов, работающих с использованием МЭК 61131-3 – их особенности, функциональные отличия, расхождения со стандартом. К сожалению, такого анализа я пока не встречал.

Было бы конечно интересно дать такой же анализ основных семейств контроллеров, работающих с данными пакетами.

Для того, чтобы сложилось более ясное представление о теме разговора, рассмотрим кратко языки, включенные в третью часть данного стандарта:

1. IL (Instruction List – Список команд) – текстовый язык низкого уровня, синтаксически похожий на ассемблер. На его основе можно создавать оптимальные по быстродействию программные единицы, поэтому он применяется при создании компактных компонентов, требующих тщательной проработки. Программа на языке IL имеет примерно следующий вид:

```
CAL Fp (MODE:=Triangle, BASE:=TRUE, PERIOD:=t#2s, AMPLITUDE:=100)
LD Fp.Out
INT_TO_REAL
ST Out_Gen_1
```

2. ST (Structured Text – Структурированный текст) – текстовый язык высокого уровня, синтаксически представляющий собой несколько адаптированный язык Паскаль. На его основе можно создавать гибкие процедуры обработки данных. Язык ST является основным для программирования шагов и транзакций языка SFC. Программа на языке ST имеет примерно следующий вид:

```
Fp (MODE:=Triangle, BASE:=TRUE, PERIOD:=t#2s, AMPLITUDE:=100);
Out_Gen_1 := INT_TO_REAL (Fp.OUT);
Filter1.In := Out_Gen_1 – Out_Filter_1;
Filter1 (Tm :=100, RESET := FALSE);
Out_Filter_1 := Filter1.Out;
```

Variable1 := SQRT (Out_Filter_1);

3. LD (Ladder Diagram – Релейные диаграммы) – графический язык, являющийся стандартизованным вариантом класса языков релейно-контактных схем. Логические выражения на этом языке описываются в виде реле, которые широко применялись в области автоматизации в 60-х годах. Стандартом МЭК 61131-3 предусмотрено использование не только базовых элементов программирования («контакт» и «катушка»), но и любых других функциональных блоков. Программа на языке LD имеет примерно следующий вид:

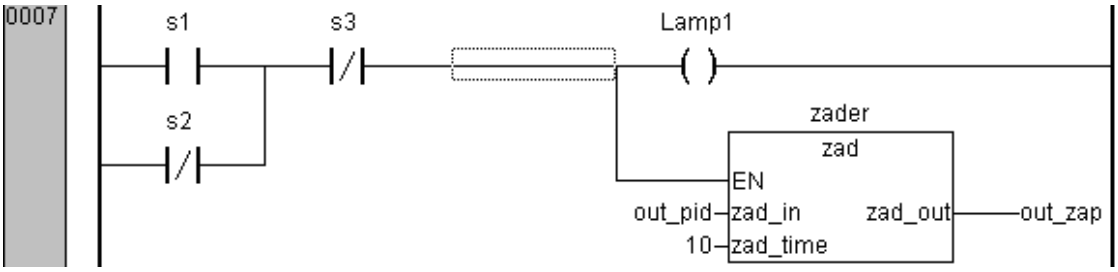


Рис. 1.

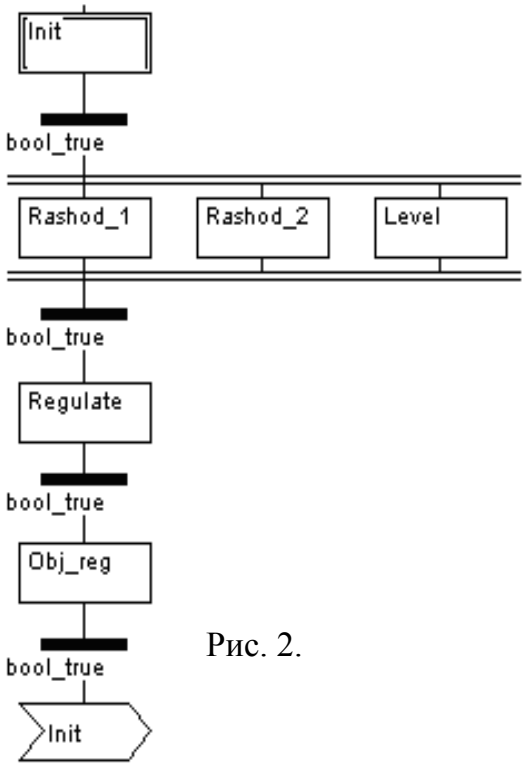


Рис. 2.

4. SFC (Sequential Function Chart – Последовательные функциональные схемы) – графический язык, позволяющий описать алгоритм в виде набора связанных пар «шаг-переход». Шаг представляет собой набор операций над переменными, а переход – набор логических условных выражений, определяющий передачу управления к следующей паре «шаг-переход». Внешний вид SFC-диаграммы напоминает блок-схему алгоритма. SFC имеет возможность распараллеливания алгоритма, но не имеет средств для описания шагов и переходов, которые могут быть выражены только средствами других языков стандарта. Основным достоинством SFC является высокая выразительность графического представления алгоритма. Вид программы на языке SFC показан на рис. 2.

5. FBD (Functional Block Diagram – Диаграммы функциональных блоков) – графический язык, по своей сути похожий на LD, но вместо реле использующий функциональные блоки. FBD-схемы очень четко отражают взаимосвязь входов и выходов диаграммы, используя технологию инкапсуляции алгоритмов обработки данных. Все программирование сводится к «склеиванию» готовых компонентов.

Программа на языке FBD имеет примерно следующий вид:

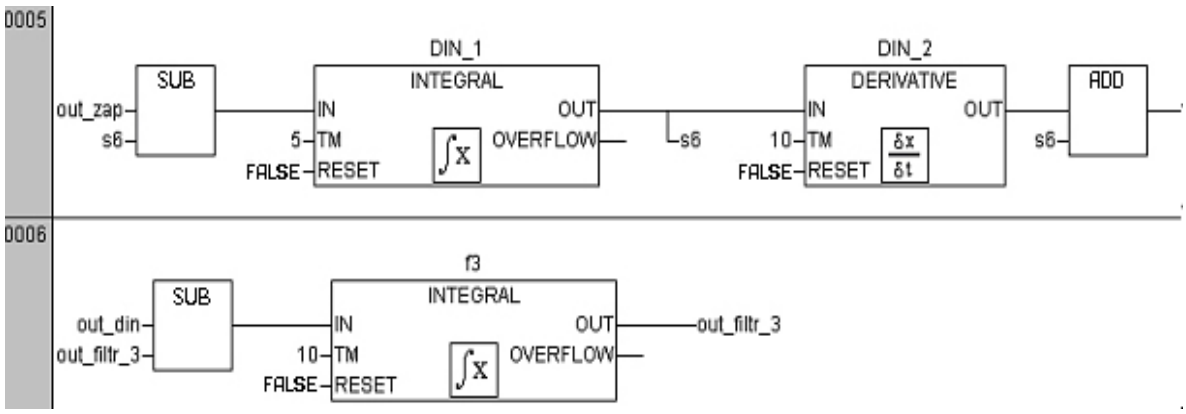


Рис. 3.

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. *Петров И.В.* Программируемые контроллеры. Стандартные языки и приёмы прикладного проектирования / *И.В. Петров*; под ред. проф. *В.П. Дьяконова*. – М.: СОЛОН-Пресс, 2004. – 256 с.

2. Руководство пользователя по программированию ПЛК в CoDeSys V2.3. – Смоленск: ПК «Пролог», 2004. – 423 с.

3. *Христенсен Дж.Х.* Знакомство со стандартом на языки программирования PLC: IEC 1131-3 (МЭК 1131-3) [Электронный ресурс] / *Дж.Х. Христенсен*. – [2004]. – Режим доступа: http://www.asutp.ru/?p=600256.html.

СЕКЦИЯ № 2
ЭЛЕКТРОЭНЕРГЕТИКА И ЭЛЕКТРОТЕХНИКА

Руководители секции: ***Шилин Александр Николаевич***
д-р техн. наук, профессор
Васильев Петр Дмитриевич
канд. техн. наук, доцент

ПРИМЕНЕНИЕ МЕТОДОВ ГРАДИЕНТНОГО И СЛУЧАЙНОГО ПОИСКА ДЛЯ ОРИЕНТАЦИИ СОЛНЕЧНОЙ БАТАРЕИ

Е.В. Капля – канд. физ.-мат. наук, доцент
филиала «МЭИ (ТУ)» в г. Волжском
К.Б. Мироненко – студент
филиала «МЭИ (ТУ)» в г. Волжском

Солнечные батареи оснащают механизмами поворота. Наземные электростанции используют поворотные механизмы с одной степенью свободы [1]. В городских условиях для оптимального поглощения рассеянного света целесообразно применять механизмы с двумя степенями свободы. Эскиз проекта, осуществляемого в ВФ МЭИ, показан на рис. 1.

Энергия электромагнитного излучения Q, поглощаемая солнечной батареей за время t, равна:

$$Q(t) = \int_0^t \Phi(\tau)dt\,, \tag{1}$$

где $\Phi(\tau)$ – поглощаемый световой поток.

$$\Phi(\tau) = \int_0^\infty \Phi_\lambda(\lambda, \tau)d\lambda\,, \tag{2}$$

где $\Phi_\lambda(\lambda, \tau)$ – спектральная плотность поглощаемого светового потока.

$$\Phi_\lambda(\lambda, \tau) = \iint_s E_\lambda(\alpha, \beta, x, y, \lambda, \tau)\cdot\eta(x, y, \lambda)\,ds\,, \tag{3}$$

где α – угол между вектором нормали к светочувствительной поверхности и вертикалью $\alpha \in$ [–90°; 90°]; β – угол поворота вокруг вертикальной оси $\beta \in$ [–90°; 90°]; (x, y) – координаты точек в плоскости светочувствительной поверхности; $E_\lambda(\alpha, \beta, x, y, \lambda, \tau)$ – спектральная плотность энергетической освещённости в точке (x, y) поверхности в момент времени τ; $\eta(x, y, \lambda)$ – спектральный коэффициент поглощения излучения; $ds = dx\cdot dy$ – элемент площади поверхности.

Управляемыми параметрами являются углы α и β. Оптимальная ориентация светочувствительной поверхности соответствует максимуму средней освещённости в каждый момент времени τ.

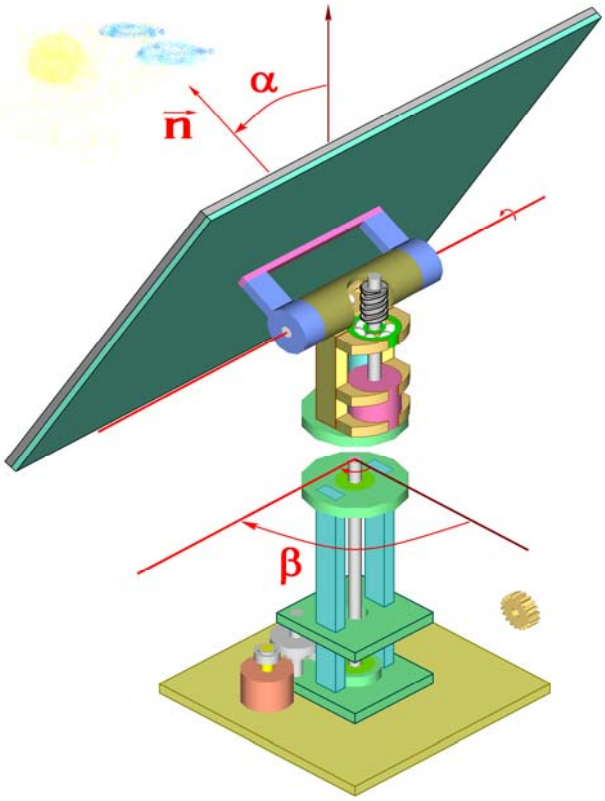


Рис. 1. Самоориентирующаяся солнечная батарея

Поиск оптимального положения (α_*, β_*) можно проводить, используя регулярные методы [2]: градиентный метод, метод Гаусса-Зайделя или метод наискорейшего спуска.

Применение метода градиентного поиска предполагает вычисление градиента и перемещение в направлении градиента. Градиент освещённости в положении (α_s, β_s) равен:

$$\mathrm{grad}\big(E(\alpha_s, \beta_s)\big) = \vec{e}_\alpha \cdot \frac{\partial}{\partial \alpha} E(\alpha, \beta)\bigg|_{\alpha_s, \beta_s} + \vec{e}_\beta \cdot \frac{\partial}{\partial \beta} E(\alpha, \beta)\bigg|_{\alpha_s, \beta_s}. \qquad (4)$$

Углы на (s + 1)-м шаге связаны с углами на s-м шаге рекуррентными выражениями:

$$\alpha_{s+1} = \alpha_s + \gamma \cdot \frac{\partial}{\partial \alpha} E(\alpha_s, \beta_s), \qquad \beta_{s+1} = \beta_s + \gamma \cdot \frac{\partial}{\partial \beta} E(\alpha_s, \beta_s), \qquad (5)$$

где γ – малый параметр – шаг градиентного поиска.

Производные по углам можно найти, повернув светочувствительную поверхность на малые углы $+\Delta\alpha$, $-\Delta\alpha$, $+\Delta\beta$, $-\Delta\beta$:

$$\alpha_{s+1} = \alpha_s + \gamma \cdot \frac{E(\alpha_s + \Delta\alpha, \beta_s) - E(\alpha_s - \Delta\alpha, \beta_s)}{2 \cdot \Delta\alpha}, \quad (6)$$

$$\beta_{s+1} = \beta_s + \gamma \cdot \frac{E(\alpha_s, \beta_s + \Delta\beta) - E(\alpha_s, \beta_s - \Delta\beta)}{2 \cdot \Delta\beta}. \quad (7)$$

Для применения (6) и (7) необходимо указать значения α_0 и β_0.

Метод градиентного поиска даёт идеальный путь к экстремуму, если зависимость $E(\alpha, \beta)$ имеет один максимум и линии уровня имеют выпуклую форму.

Предмет с белой или зеркальной поверхностью, расположенный вблизи солнечной батареи, может создавать на её светочувствительном слое значительный поток отражённых лучей. Деревья или строения могут затенять установку. В результате рассеяния света на окружающих предметах поверхность $E(\alpha, \beta)$ может иметь несколько локальных максимумов. Метод градиентного поиска позволяет из фиксированной начальной точки поиска (α_0, β_0) достигнуть одного из них. Глобальный максимум, соответствующий оптимальному положению батареи, возможно, не будет обнаружен.

Введение элемента случайности в схему поиска оптимального положения светочувствительной поверхности даёт возможность найти из одной опорной точки несколько экстремумов.

Метод парных проб предполагает на каждом шаге случайный выбор направления поиска экстремума. Пусть величина угла φ, определяющего направление поиска, выбирается по закону равной вероятности из полуинтервала $[0, \pi)$: $\varphi_s = \pi \cdot \mathrm{rnd}\,(1)$.

Смещение точки на шаге s равно:

$$\Delta\alpha_s = \gamma_s \cdot \cos(\varphi_s), \qquad \Delta\beta_s = \gamma_s \cdot \sin(\varphi_s). \quad (8)$$

Изменение координат точки представляется формулой:

$$\begin{bmatrix} \alpha_{s+1} \\ \beta_{s+1} \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} \alpha_s \\ \beta_s \end{bmatrix} + p_s \cdot \begin{bmatrix} \Delta\alpha_s \\ \Delta\beta_s \end{bmatrix}, \quad (9)$$

где

$$p_s = \begin{cases} 1, & F(\alpha_s - \Delta\alpha_s, \beta_s - \Delta\beta_s) \le F(\alpha_s + \Delta\alpha_s, \beta_s + \Delta\beta_s) > F(\alpha_s, \beta_s) \\ -1, & F(\alpha_s + \Delta\alpha_s, \beta_s + \Delta\beta_s) \le F(\alpha_s - \Delta\alpha_s, \beta_s - \Delta\beta_s) > F(\alpha_s, \beta_s) \\ 0, & F(\alpha_s - \Delta\alpha_s, \beta_s - \Delta\beta_s) \le F(\alpha_s, \beta_s) \ge F(\alpha_s + \Delta\alpha_s, \beta_s + \Delta\beta_s) \end{cases} \quad 10)$$

Траектории градиентного и случайного поиска максимума освещённости E представлены на рис. 2 и 3.

Вблизи седловых точек поверхности $E(\alpha, \beta)$ случайный поиск с шагом $\gamma = 10 \div 20$ эффективней градиентного, поскольку позволяет приблизиться к главному максимуму.

При уменьшении шага траектория случайного поиска приближается к градиентной траектории и вероятность перехода с одного склона на другой уменьшается.

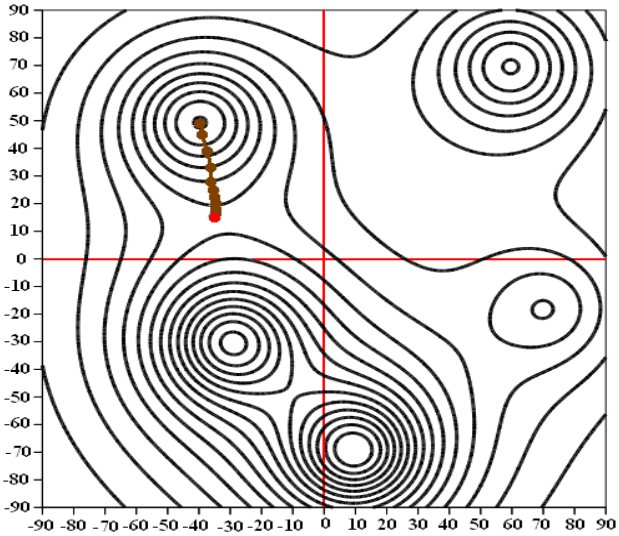


Рис. 2. Траектория градиентного поиска
$\alpha_0 = 30$, $\beta_0 = 20$, $\gamma = 1$, $s = 0, 1, \ldots, 14$

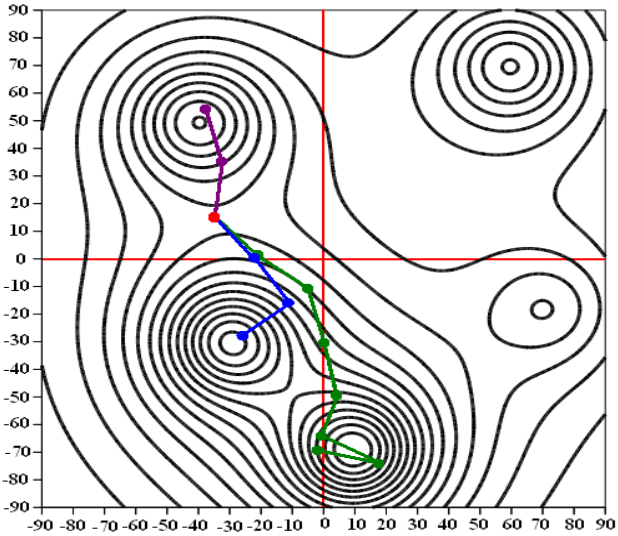


Рис. 3. Траектории случайного поиска
$\alpha_0 = 30$, $\beta_0 = 20$, $\gamma = 20$, $s = 0, 1, \ldots, 7$

Поворот батареи целесообразно осуществлять двумя шаговыми двигателями. Шаговые двигатели обеспечивают высокую угловую точность механизма.

Энергетические затраты, требуемые для поворота подвижных частей, должны компенсироваться энергетическим выигрышем при работе в оптимальном положении. Частое включение режима поиска оптимальных углов (α_*, β_*) энергетически не выгодно.

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. *B. Griffith*, *M. Deru*, *P. Torcellini*, and *P. Ellis*. Analysis of the energy performance of the Chesapeake bay foundation's Philip Merrill Environmental Center.// National Renewable Energy Laboratory, April 2005.

2. *Воронов А.А.*, *Титов В.К.*, *Новогранов Б.Н.* Основы теории автоматического регулирования и управления. – М., 1977.

ПОВЫШЕНИЕ ЭНЕРГЕТИЧЕСКИХ ПОКАЗАТЕЛЕЙ ТЕХНОЛОГИЧЕСКОГО ОБОРУДОВАНИЯ С УПРАВЛЯЕМЫМИ ЭЛЕКТРОПРИВОДАМИ

А.В. Исаев **–** канд. техн. наук, доцент
Волгоградского государственного технического университета

АКТУАЛЬНОСТЬ

В последнее время все возрастающие производственные мощности, предъявляющие высокие требования к качеству организации и управления технологическими процессами, обуславливают повышение требований к качеству

управления используемых в них систем электроприводов и их энергетических характеристик. Это связано с тем, что доля влияния мощных электроприводов на качество электроэнергии и ее потребление в технологическом цикле производственного процесса довольно значительна – на долю электроприводов приходится до 70 % всей вырабатываемой электроэнергии. В связи с этим одним из перспективных путей снижения энергозатрат, уменьшения влияния технологического оборудования на питающую сеть является использование систем регулируемых электроприводов.

ТЕХНОЛОГИЧЕСКИЕ ПРОЦЕССЫ С УПРАВЛЯЕМЫМ ЭЛЕКТРОПРИВОДОМ

Большая дифференцированность современных технологических процессов обуславливает широкий спектр систем управления используемых в них электроприводов. Так, для крановых установок при выборе системы управления следует учитывать следующие особенности их работы [1]: широкий диапазон изменения моментов сопротивления, необходимость реверсирования, ограничение момента в элементах механизмов, обеспечение работы на пониженных скоростях и ограничение ускорений. На рис. 1 представлены механические характеристики электропривода механизмов подъема крановой установки. Отличительной особенностью характеристик является повышенное требование к их жесткости.

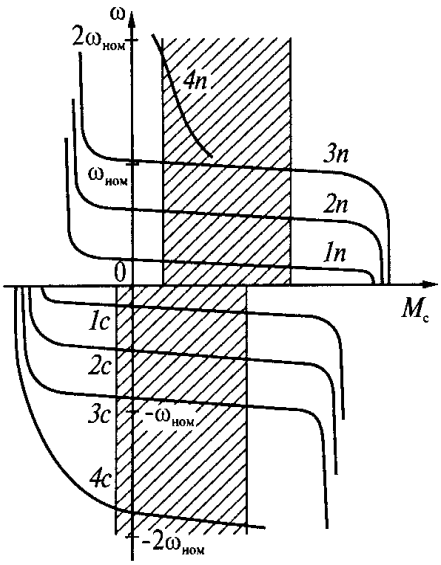


Рис. 1. Требуемые механические характеристики электропривода крановой установки

1n (*1c*) – характеристика для подъема (спуска) груза с пониженной скоростью (выбор слабины канатов, повышения точности установки груза); *2*, *3* – характеристики привода на промежуточных скоростях; *4n* (*4c*) – характеристика для подъема (спуска) груза на повышенной скорости (увеличение производительности крановой установки)

Это гарантирует минимизацию влияния динамических моментов на режим работы крановой установки.

Аналогичные требования к механическим характеристикам предъявляются в системах ленточных транспортирующих установок (ленточные транспортеры, эскалаторы и т.д.), а также в системах водоснабжения. Для подобных систем, в отличие от крановых установок, где изменения поднимаемого груза (нагрузки электропривода) в процессе его транспортировки незначительны (рис. 2) [1], характер изменения нагрузки является слабо предсказуемым и резко переменным.

Последнее приводит к ряду дополнительных требований к системам управления используемых в них электроприводов, связанных с оптимизацией переходных электромеханических процессов.

Одним из критериев качества управления любой управляющей системы является выведение объекта управления в тот или иной необходимый режим его работы с заранее заданными параметрами и минимальными потерями.

КПД двигателя, согласно формуле [3], рекомендуемой для практических расчетов:

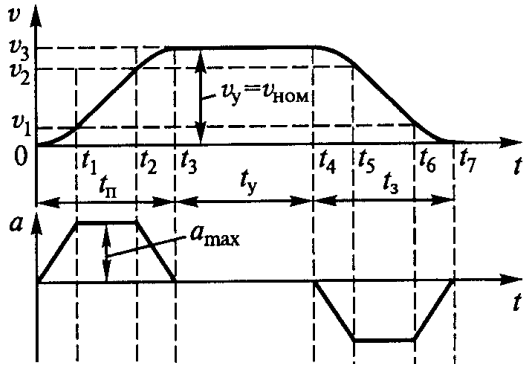


Рис. 2. Оптимальная диаграмма подъема груза:
v – скорость подъема груза ($_{-y}$ – установившийся режим);
a – ускорение подъема груза

$$\eta = \frac{1}{1 + \left(\frac{1}{\eta_н} - 1\right) \cdot \left(\frac{\alpha \cdot (1+\alpha)}{\beta} + \beta\right)}, \qquad (1)$$

где $\alpha = \frac{\Delta P_0}{\Delta P_{пер}} = \frac{\Delta P_0}{P_н \frac{1-\eta_н}{\eta_н}}$ – коэффициент потерь, представляющих собой отношение постоянных потерь (ΔP_0) к переменным ($\Delta P_{пер}$) при номинальной нагрузке; $\beta = \frac{P_2}{P_{2н}}$ – степень нагрузки, определяемая соотношением мощности на валу двигателя (P_2) к своему номинальному значению ($P_{2н}$); $\eta_н$ – номинальное значение КПД электродвигателя.

На рисунках представлена зависимость КПД (рис. 3) и коэффициента мощности (рис. 5) двигателей основного исполнения АО2-72-2 (3000 об/мин) и АО2-72-2 (750 об/мин) номинальной мощностью 30 кВТ от нагрузки на валу в % от номинальной мощности.

Представленные кривые иллюстрируют тот факт, что работа электродвигателей с малой степенью загрузки, характеризуемая малым КПД и высокими значениями линейных токов (малый коэффициент мощности), энергетически невыгодна.

Следовательно, для электроприводов, работающих в стационарных режимах или режимах с незначительно изменяющейся нагрузкой, оптимизация энергопотребления в большей степени определяется обоснованным выбором мощности электропривода и числа ступеней управления (вариантов изменения числа пар полюсов; числа коммутируемых секций добавочного сопротивления в цепи ротора).

Для систем электроприводов, работающих с резкопеременными нагрузками, большое влияние начинают оказывать переходные процессы, протекающие в электродвигателе.

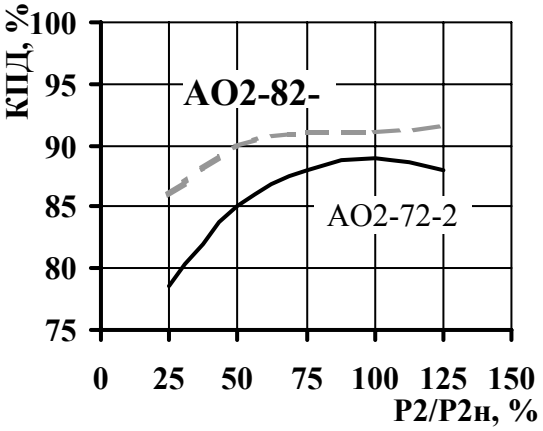


Рис. 3. КПД двигателей общего исполнения

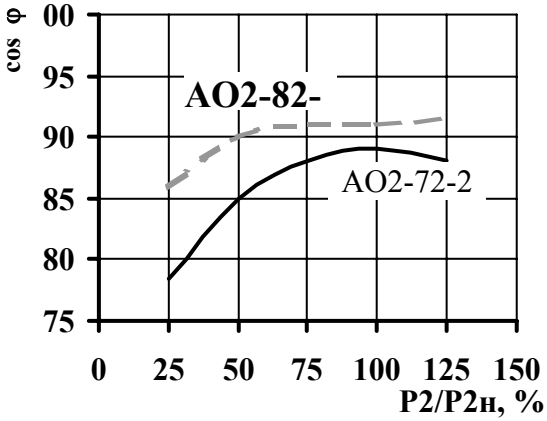


Рис. 4. Коэффициент мощности двигателей общего исполнения

Примером подобного технологического процесса может служить система водоснабжения, режим работы которой характеризуется большими перепадами разбора воды. В данном случае увеличение энергетических характеристик возможно за счет деления всей необходимой (пиковой) мощности на ряд ступеней, то есть использование не одного, а нескольких рабочих электродвигателей. Тем самым обеспечивается номинальный режим их работы.

Недостатком подобного управления суммарной мощностью электропривода является возникновение переходных режимов при пуске и останове вспомогательных двигателей (рис. 5) [4], сопровождающееся искажениями, вносимыми в питающую сеть, возникновением больших динамических нагрузок на обмотки электродвигателя и ударными нагрузками в сопряженном с электродвигателями технологическом оборудовании.

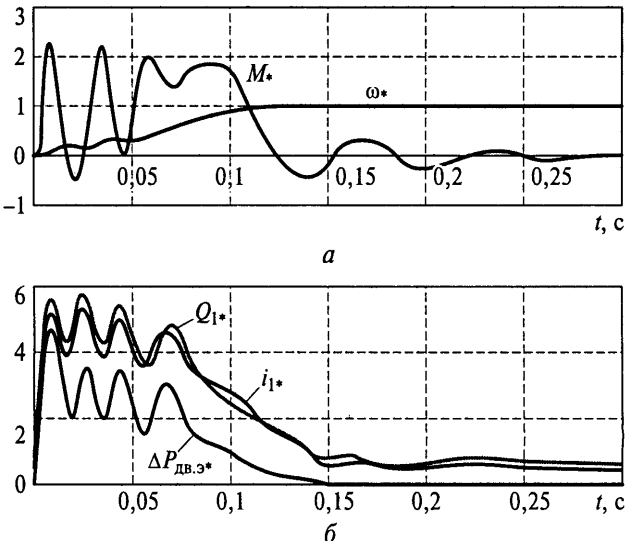


Рис. 5. Переходные процессы АД (типа 4А132М6) с короткозамкнутым ротором при прямом пуске ($Mc = 0$):

а) временные характеристики развиваемого двигателем момента M и скорости ω (в относительных величинах);

б) временные характеристики электрических потерь $\Delta P_{дв.э}$, реактивной мощности Q_1 и тока статора i_1

Для приведенной в качестве примера системы водоснабжения пуск и останов двигателей сопровождается значительными гидроударами, снижение воздействия которых на систему требует установки дополнительного оборудования (дополнительных емкостей).

Одним из принципиальных путей минимизации подобных негативных воздействий является плавное регулирование скорости электропривода. Как говорилось ранее, основными составляющими потребляемой электрической машиной энергии являются энергетические затраты на формирование электромагнитного поля машины и энергозатраты, определяющие процесс электромеханического преобразования. Следовательно, увеличение КПД двигателя достигается пропорциональным регулированием потребляемой им электроэнергии.

Наиболее перспективным вариантом управления асинхронным двигателем является управление изменением частоты тока статора.

Согласно основному закону частотного регулирования (М.П. Костенко) [2]:

$$\frac{U_{11}}{U_{12}} = \left(\frac{f_{11}}{f_{12}}\right)\sqrt{\frac{M_{C1}}{M_{C2}}},$$

где U_{1k}, f_{1k} – k-тые значения напряжения на статоре двигателя и частота тока статора; $M_{C\,k}$ – k-тое значение момента сопротивления на валу; управление частотой двигателя требует, для сохранения перегрузочной способности двигателя, одновременного изменения подаваемого на статор напряжения.

Изменение частоты f_{1k} осуществляется с помощью автономных инверторов напряжения АИН (f_{1k} и U_{1k} = var) и тока АИТ (f_{1k} и i_{1k} = var), и непосредственных преобразователей частоты НПЧ.

ЗАКЛЮЧЕНИЕ

В статье дан обзор способов управления электроприводом при различных режимах нагрузки. Приведен качественный анализ энергопотребления данных систем, который позволяет сделать вывод о том, что увеличение эффективности управления электроприводом ведет к росту эффективности энергопотребления.

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. *Соколова Е.М.* Электрическое и электромеханическое оборудование: Общепромышленные механизмы и бытовая техника: Учеб. пособие для сред. проф. образования. – 3-е изд., стер. – М.: Издательский центр «Академия», 2005. – 224 с.

2. *Костенко М.П.*, *Пиотровский Л.М.* Электрические машины. В 2-х ч. Ч.2 – Машины переменного тока: Учебник для студентов высш. техн. учеб. заведений. Изд. 3-е, перераб. и доп. – Л.: Энергия, 1972. – 648 с.

3. *Лихачев В.Л.* Электродвигатели асинхронные – М.: СОЛОМОН-Р, 2002. – 304 с.

4. Энергосберегающий асинхронный элетропривод: Учеб. пособие для студ. высш. учебн. заведений / *И.Я. Браславский*, *З.Ш. Ишматов*, *В.Н. Поляков*. Под ред. *И.Я. Браславского*. – М.: Издательский центр «Академия», 2004. – 25 с.

ФУНКЦИОНАЛЬНАЯ ЗАВИСИМОСТЬ СИЛЫ ВЗАИМОДЕЙСТВИЯ ДВУХ СООСНЫХ КОЛЬЦЕВЫХ ПРОВОДНИКОВ С ТОКОМ ОТ РАДИУСОВ И РАССТОЯНИЯ

Е.В. Капля – канд. физ.-мат. наук, доцент
филиала «МЭИ (ТУ)» в г. Волжском
А.В. Круглов – студент
филиала «МЭИ (ТУ)» в г. Волжском

Существующие системы электромагнитной подвески основаны на взаимодействии обмоток, по которым протекает электрический ток. Каждую обмотку можно приближённо представить набором кольцевых проводников. Принцип суперпозиции позволяет свести задачу расчёта характеристик магнитного поля и силы взаимодействия обмоток к задаче для двух кольцевых проводников. Отталкивание колец наблюдается в случае противоположного направления токов.

Магнитная индукция, созданная электрическим током I, протекающим по проводнику, образующему контур L, определяется законом Био-Савара-Лапласа:

$$\vec{B} = \frac{\mu \cdot \mu_0}{4 \cdot \pi} \cdot \int_L \frac{I \cdot \left[d\vec{L} \times \vec{r} \right]}{r^3}, \qquad (1)$$

где $\mu \equiv \mu(\vec{r}, t)$ – относительная магнитная проницаемость среды; $\mu_0 = 1{,}25664 \cdot 10^{-6}$ Гн/м – магнитная постоянная; $d\vec{L}$ – дифференциал длины дуги контура L; $\vec{r}$ – вектор, направленный из начала вектора $d\vec{L}$ в точку, в которой определяется $\vec{B}$.

Введём цилиндрическую систему координат и прямоугольную Декартову систему координат как показано на рис. 1. Пусть начало координат находится в центре кольца радиуса R_1, ось Oz направлена вертикально вверх и проходит через центры колец. Кольца расположены в горизонтальных плоскостях.

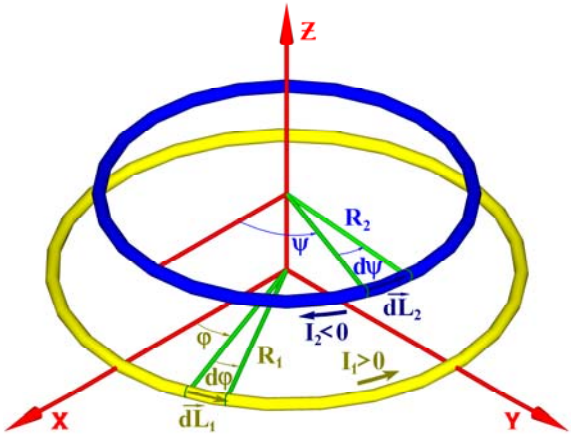


Рис. 1. Геометрия задачи

Рассматривая в качестве источника магнитного поля кольцо радиуса R_1, можно принять:

$$d\vec{L}_1 \equiv d\vec{L}_1(R_1,\varphi) = \begin{bmatrix} -R_1 \cdot \sin(\varphi) \\ R_1 \cdot \cos(\varphi) \\ 0 \end{bmatrix} \cdot d\varphi. \quad (2)$$

Для точек, расположенных на втором кольце R_2:

$$\vec{r} \equiv \vec{r}(R_1, R_2, \varphi, \psi, z) = \begin{bmatrix} R_2 \cdot \cos(\psi) - R_1 \cdot \cos(\varphi) \\ R_2 \cdot \sin(\psi) - R_1 \cdot \sin(\varphi) \\ z \end{bmatrix}, \quad (3)$$

$$r \equiv |\vec{r}| = \sqrt{(R_2 \cdot \cos(\psi) - R_1 \cdot \cos(\varphi))^2 + (R_2 \cdot \sin(\psi) - R_1 \cdot \sin(\varphi))^2 + z^2}. \quad (4)$$

После математических упрощений (4) принимает вид:

$$r = \sqrt{R_1^2 + R_2^2 + z^2 - 2 \cdot R_1 \cdot R_2 \cdot \cos(\psi - \varphi)}. \quad (5)$$

Компоненты векторного произведения в интеграле (1) равны:

$$\left[d\vec{L}_1 \times \vec{r}\right]_x = R_1 \cdot \cos(\varphi) \cdot z, \quad (6)$$

$$\left[d\vec{L}_1 \times \vec{r}\right]_y = R_1 \cdot \sin(\varphi) \cdot z, \quad (7)$$

$$\left[d\vec{L}_1 \times \vec{r}\right]_z = -R_1 \cdot [\cos(\varphi) \cdot (R_2 \cdot \cos(\psi) - R_1 \cdot \cos(\varphi)) + \\ + \sin(\varphi) \cdot (R_2 \cdot \sin(\psi) - R_1 \cdot \sin(\varphi))]. \quad (8)$$

Компоненты вектора магнитной индукции поля, созданного кольцом R_1 в точках кольца R_2, определяются интегралами:

$$B_x(R_1, R_2, \psi) = \alpha \cdot \int_0^{2\pi} \frac{\left[d\vec{L}_1 \times \vec{r}\right]_x}{r^3} d\varphi, \quad (9)$$

$$B_y(R_1, R_2, \psi) = \alpha \cdot \int_0^{2\pi} \frac{\left[d\vec{L}_1 \times \vec{r}\right]_y}{r^3} d\varphi, \quad (10)$$

$$B_z(R_1, R_2, \psi) = \alpha \cdot \int_0^{2\pi} \frac{\left[d\vec{L}_1 \times \vec{r}\right]_z}{r^3} d\varphi, \quad (11)$$

где $\alpha = \dfrac{\mu \cdot \mu_0}{4 \cdot \pi} \cdot I_1$.

Элементарная сила, действующая на элемент длины $d\vec{L}_2$ дуги кольца R_2 со стороны магнитного поля, созданного кольцом R_1, определяется формулой Ампера:

$$d\vec{F}(R_1, R_2, \psi) = I_2 \cdot \left[d\vec{L}_2 \times \begin{bmatrix} B_x(R_1, R_2, \psi) \\ B_y(R_1, R_2, \psi) \\ B_z(R_1, R_2, \psi) \end{bmatrix} \right]. \quad (12)$$

Дифференциал длины дуги второго кольца равен:

$$d\vec{L}_2 \equiv d\vec{L}_2(R_2, \psi) = \begin{bmatrix} -R_2 \cdot \sin(\psi) \\ R_2 \cdot \cos(\psi) \\ 0 \end{bmatrix} \cdot d\psi. \quad (13)$$

После подстановки (13) в векторное произведение (12) получаем:

$$d\vec{F} = I_2 \cdot R_2 \cdot \begin{bmatrix} B_z \cdot \cos(\psi) \\ B_z \cdot \sin(\psi) \\ -B_y \cdot \sin(\psi) - B_x \cdot \cos(\psi) \end{bmatrix} \cdot d\psi. \quad (14)$$

Общая сила, действующая на кольцо R_2 со стороны кольца R_1, равна:

$$\vec{F} \equiv \begin{bmatrix} F_x \\ F_y \\ F_z \end{bmatrix} = I_2 \cdot R_2 \cdot \begin{bmatrix} \int_0^{2\pi} B_z \cdot \cos(\psi)\, d\psi \\ \int_0^{2\pi} B_z \cdot \sin(\psi)\, d\psi \\ -\int_0^{2\pi} \left(B_y \cdot \sin(\psi) + B_x \cdot \cos(\psi)\right) d\psi \end{bmatrix}. \quad (15)$$

Вертикальная компонента силы (подъёмная сила) равна:

$$F_z = -I_2 \cdot R_2 \cdot \int_0^{2\pi} \left[B_y \cdot \sin(\psi) + B_x \cdot \cos(\psi)\right] d\psi. \quad (16)$$

Подынтегральную функцию в формуле (16) можно представить в виде:

$$B_y \cdot \sin(\psi) + B_x \cdot \cos(\psi) = \frac{\mu \cdot \mu_0}{4 \cdot \pi} \cdot I_1 \cdot R_1 \cdot z \cdot S(\psi, R_1, R_2, z), \quad (17)$$

где

$$S(\psi, R_1, R_2, z) = \int_0^{2\pi} \frac{\sin(\varphi) \cdot \sin(\psi) + \cos(\varphi) \cdot \cos(\psi)}{\left[(R_2 \cdot \cos(\psi) - R_1 \cdot \cos(\varphi))^2 + (R_2 \cdot \sin(\psi) - R_1 \cdot \sin(\varphi))^2 + z^2\right]^{3/2}} d\varphi$$

В результате тригонометрических преобразований:

$$S(\psi, R_1, R_2, z) = \int_0^{2\pi} \frac{\cos(\psi - \varphi)}{\left[R_1^2 + R_2^2 + z^2 - 2 \cdot R_1 \cdot R_2 \cdot \cos(\psi - \varphi)\right]^{3/2}} d\varphi. \quad (18)$$

Формула (16) с учётом (17) и (18) принимает вид:

$$F_z(R_1, R_2, z) = -I_1 \cdot I_2 \cdot R_1 \cdot R_2 \cdot z \cdot \frac{\mu \cdot \mu_0}{4 \cdot \pi} \cdot G(R_1, R_2, z), \qquad (19)$$

где

$$G(R_1, R_2, z) = \int_0^{2\pi} \int_0^{2\pi} \frac{\cos(\psi - \varphi)}{\left[R_1^2 + R_2^2 + z^2 - 2 \cdot R_1 \cdot R_2 \cdot \cos(\psi - \varphi)\right]^{3/2}} d\varphi \, d\psi . \qquad (20)$$

Применив в интеграле (20) замену переменных:

$$\alpha = \cos(\psi - \varphi), \qquad d\varphi = \left[\frac{\partial}{\partial \alpha}(\psi - \arccos(\alpha))\right] \cdot d\alpha = \frac{1}{\sqrt{1 - \alpha^2}} \cdot d\alpha ,$$

получаем:

$$G(R_1, R_2, z) = \int_0^{2\pi} \int_{\cos(\psi)}^{\cos(\psi - 2\pi)} \frac{\alpha}{\sqrt{q^3 \cdot \left(\alpha - \frac{p}{q}\right)^3 \cdot (\alpha - 1) \cdot (\alpha + 1)}} d\alpha \, d\psi , \qquad (21)$$

где $p = R_1^2 + R_2^2 + z^2$, $q = 2 \cdot R_1 \cdot R_2$.

Интеграл (21) не является эллиптическим интегралом, так как содержит квадратный корень из многочлена, степень которого не превышает четвёртую.

Результаты расчётов подъёмной силы, действующей на второе кольцо, при $I_1 = 1A$, $I_2 = -1A$, $R_1 = 0{,}01$ м, $R_2 = 10; 9; 8; 7; 6; 5$ мм, представлены на рис. 2.

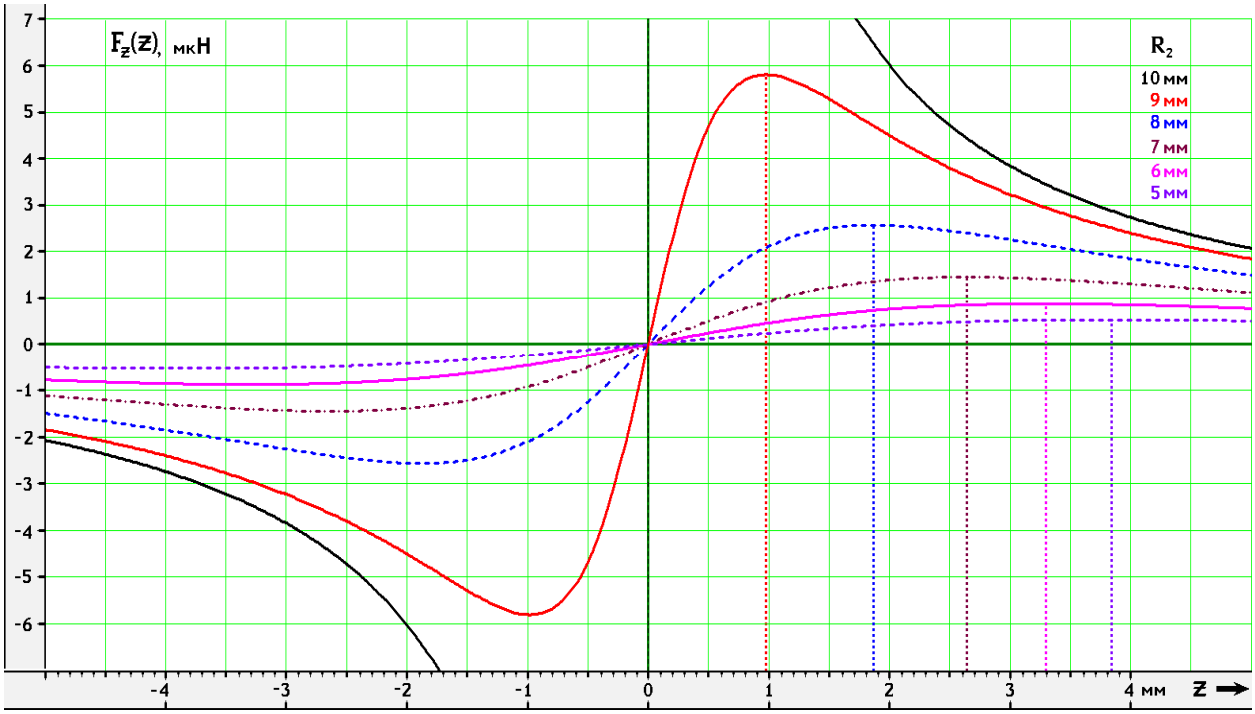


Рис. 2. Зависимость подъёмной силы от расстояния *z* между кольцами

Функция $F_z(R_1, R_2, z)$ обладает максимумом в точке z_m. Величина z_m пропорциональна токам I_1, I_2 и связана с R_1 и R_2 нелинейной зависимостью, получаемой в результате решения уравнения:

$$\frac{\partial}{\partial z} F_z(R_1, R_2, z) = 0. \qquad (22)$$

Когда величина F_z превышает силу земного притяжения, второе кольцо способно подняться в магнитном поле первого.

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. *Стрэттон Дж.А.* Теория электромагнетизма / Пер с англ. *Рабиновича М.С.* и *Харитонова В.М.* Под ред. *Рытова С.М.* – М.-Л., 1948.

2. *Ахиезер Н.И.* Элементы теории эллиптических функций. – М., 1970.

3. *Веселитский И.В.*, *Воронков В.С.*, *Денисов Г.Г.*, *Линьков Р.В.* Стабилизация вращением подвижного магнита в поле неподвижного // ЖТФ. – 2005. – Т. 75, вып. 3. – С. 88-93.

4. *Филатов В.В.* Об эффективности расталкивания электромагнитных катушек с учётом ограничений по прочности и уровню магнитного поля // ЖТФ. – 1997. – Т. 67, № 5. – С. 124-127.

УСЛОВИЯ ВОЗНИКНОВЕНИЯ РАДИАЦИОННОЙ НЕУСТОЙЧИВОСТИ В СТОЛБЕ ЭЛЕКТРИЧЕСКОЙ ДУГИ

Л.В. Хоперскова – ст. преподаватель кафедры «Электротехника» Волгоградского государственного технического университета

Нестабильность электрической дуги является характерной особенностью процессов, происходящих в электродуговой плазме. Поэтому при анализе явлений в таких устройствах электротехники, как генераторы газоразрядной плазмы, при горении дуги в электрической цепи важно учитывать динамику и устойчивость плазмы [1-4].

Для определения условий возникновения радиационной неустойчивости в качестве исходных рассмотрим систему нестационарных МГД-уравнений [3] в цилиндрической системе координат с учетом излучения плазмы и теплопроводности.

$$\frac{\partial \tilde{\rho}}{\partial t} + \rho_0 \frac{\partial (r\tilde{u})}{r\partial r} + \tilde{u}\frac{d\rho_0}{dr} + \rho_0 \frac{\partial \tilde{\omega}}{\partial z} + \rho_0 \frac{\partial \tilde{v}}{r\partial \varphi} = 0; \qquad (1)$$

$$\frac{\partial \tilde{u}}{\partial t} = -\frac{1}{\rho_0}\cdot\frac{\partial \tilde{\Pi}}{\partial r} - \frac{2V_A^2}{r}\cdot\frac{\tilde{B}_\varphi}{B_0} + \frac{V_A^2}{B_0 r}\cdot\frac{\partial \tilde{B}_r}{\partial \varphi}; \qquad (2)$$

$$\frac{\partial \tilde{v}}{\partial t} = -\frac{1}{\rho_0 r}\cdot\frac{\partial \tilde{\Pi}}{\partial \varphi} + \frac{V_A^2}{B_0 r}\cdot\frac{\partial \tilde{B}_\varphi}{\partial \varphi} + \frac{V_A^2}{B_0^2 r}\cdot\frac{\partial (B_0 r)}{\partial r}\cdot \tilde{B}_r; \qquad (3)$$

$$\frac{\partial \tilde{w}}{\partial t} = -\frac{1}{\rho_0}\frac{\partial \tilde{\Pi}}{\partial z} + \frac{V_A^2}{B_0 r}\frac{\partial \tilde{B}_z}{\partial \varphi}; \tag{4}$$

$$\frac{\partial \tilde{B}_r}{\partial t} = \frac{B_0}{r}\frac{\partial \tilde{u}}{\partial \varphi}; \tag{5}$$

$$\frac{\partial \tilde{B}_\varphi}{\partial t} + \rho_0 \tilde{u}\frac{d}{dr}\frac{B_0}{\rho_0} - \frac{B_0}{\rho_0}\frac{\partial \tilde{\rho}}{\partial t} = \frac{B_0}{r}\frac{\partial \tilde{v}}{\partial \varphi} + \frac{B_0}{r}\tilde{u}; \tag{6}$$

$$\frac{\partial \tilde{B}_z}{\partial t} = \frac{B_0}{r}\frac{\partial \tilde{w}}{\partial \varphi}; \tag{7}$$

$$\frac{\partial \tilde{p}}{\partial t} - c_s^2\frac{\partial \tilde{\rho}}{\partial t} + \left(\frac{dp_0}{dr} - c_s^2\frac{d\rho_0}{dr}\right) = (\gamma - 1)\left[-\tilde{\psi}\right]. \tag{8}$$

Возмущенные величины будем отмечать символом ~.

Здесь ρ – объемная плотность; u, v, w – соответственно радиальная, азимутальная z – компонента скорости; B_r, B_φ, B_z – радиальная, азимутальная, z-компонента магнитного поля; $\Pi = p + B^2/8\pi$ – полное давление; $V_A^2 = \frac{B_0^2}{4\pi\rho_0}$ – квадрат альфвеновской скорости; $c_s^2 = \gamma c_T^2 = \gamma\frac{p_0}{\rho_0}$ – квадрат адиабатической скорости звука; γ – показатель адиабаты; ψ – излучательная способность.

Будем считать, что величина ψ произвольно зависит от плотности ρ и температуры T, тогда для возмущения можно записать:

$$\tilde{\psi} = \delta_p\frac{\tilde{\rho}}{\rho_0} + \delta_T\frac{\tilde{T}}{T_0}, \tag{9}$$

где коэффициенты $\delta_p = \rho_0\left(\frac{\partial \psi}{\partial \rho}\right)_T$, $\delta_T = T_0\left(\frac{\partial \psi}{\partial T}\right)_p$ определяют закон излучения в данной модели. Предполагая, что для идеального газа выполняется $\frac{\tilde{\rho}}{\rho_0} = \frac{\tilde{T}}{T_0} + \frac{\tilde{\rho}}{\rho_0}$, можем исключить возмущение температуры.

Поскольку равновесные величины зависят только от радиальной координаты, то решение ищем в виде:

$$\tilde{f} = \tilde{f}(r)\exp(-i\omega t + ik_z z + im\varphi), \tag{10}$$

где ω – собственная частота волны; пространственную структуру возмущений в продольном и азимутальном направлениях определяют волновые числа k_z и $k_\varphi = m/r$.

Если ограничиться в уравнениях (1)-(8) рассмотрением возмущений вида $\frac{d\tilde{N}}{dr}=0$, $\frac{d\tilde{\varepsilon}}{dr}=0$ (или $\frac{d(r\tilde{\varepsilon})}{dr}=0$) в предельно коротковолновом случае, получим дисперсионное уравнение:

$$\omega^3 + i\Omega_1\omega^2 - k_z^2 c_s^2 \omega - i\Omega_2 k_z^2 c_s^2 = 0, \qquad (11)$$

где $\Omega_1 = \frac{\gamma-1}{p_0}\delta_T$, $\Omega_2 = \frac{\gamma-1}{\gamma p_0}\left(-\delta_p + \delta_T\right)$. Последние параметры как раз и характеризуют излучение. В приближении слабой диссипации из (11) следует:

$$\omega = kc_s + \frac{i}{2}\left(\Omega_2 - \Omega_1\right). \qquad (12)$$

Введем безразмерные частоты $\Omega_T = \Omega_1 r/c_s$, $\Omega_p = \Omega_2 r/c_s$. Важным параметром является разность $\Delta\Omega = \Omega_p - \Omega_T$, поскольку ее знаком определяется возможность развития тепловой неустойчивости [5].

Для оценок Ω_T и Ω_p рассмотрим воздух (*air*), аргон (Ar), кислород (O_2), азот (N_2), водород (H_2), углекислый газ (CO_2). При вычислениях воспользуемся функциями $\psi(\rho, T)$ из работы [4]. В зависимости от химического состава излучательная способность может иметь немонотонный характер, и в результате величины Ω_T, Ω_p, $\Delta\Omega$ могут быть как положительными, так и отрицательными в определенных областях температур и плотностей, а следовательно, в соответствующих радиальных зонах плазменной дуги.

Обсудим некоторые особенности поведения излучательных частот (рис. 1).

1. Для воздуха ψ монотонна и вблизи $T \cong$ 20 000 К частоты достигают максимальных значений (рис. 1, *а*). Величина $\Delta\Omega$ положительна, но не мала только в области $T \geq 15\cdot 10^3$ К.

2. Для молекулярного водорода немонотонность ψ выражена наиболее ярко (рис. 1, *б*). При $T \leq 17\cdot 10^3$ К частоты Ω_T, Ω_ρ положительны, а в области $T \geq 17\cdot 10^3$ К отрицательны. Сходное поведение обнаруживает $\Delta\Omega$. Причем по сравнению с остальными рассмотренными случаями у H_2 имеем максимальное значение излучательных частот.

3. В случае молекулярного кислорода все частоты получаются в целом положительными, достигая максимальных значений при $T \sim$ 20 000 К.

4. У аргона, за исключением небольших областей вблизи $T \sim$ 18 000 К и 26 000 К, частоты положительны, а $\Delta\Omega$ невелико и в целом меньше нуля.

5. Для азота имеем три четко разграниченные широкие области положительных и отрицательных значений Ω_T, Ω_ρ (рис. 1, *д*).

6. Монотонная зависимость ψ от T и ρ для углекислого газа приводит к $\Omega_T \geq 0$, $\Omega_\rho \geq 0$ (рис. 1, *е*).

На рис. 1 представлены результаты проведенных расчетов $\Omega_T, \Omega_\rho, \Delta\Omega$ для $r = 5$ мм и атмосферного давления p_{atm}. В случае $p < p_{atm}$ абсолютные значения параметров Ω_T, Ω_ρ увеличиваются.

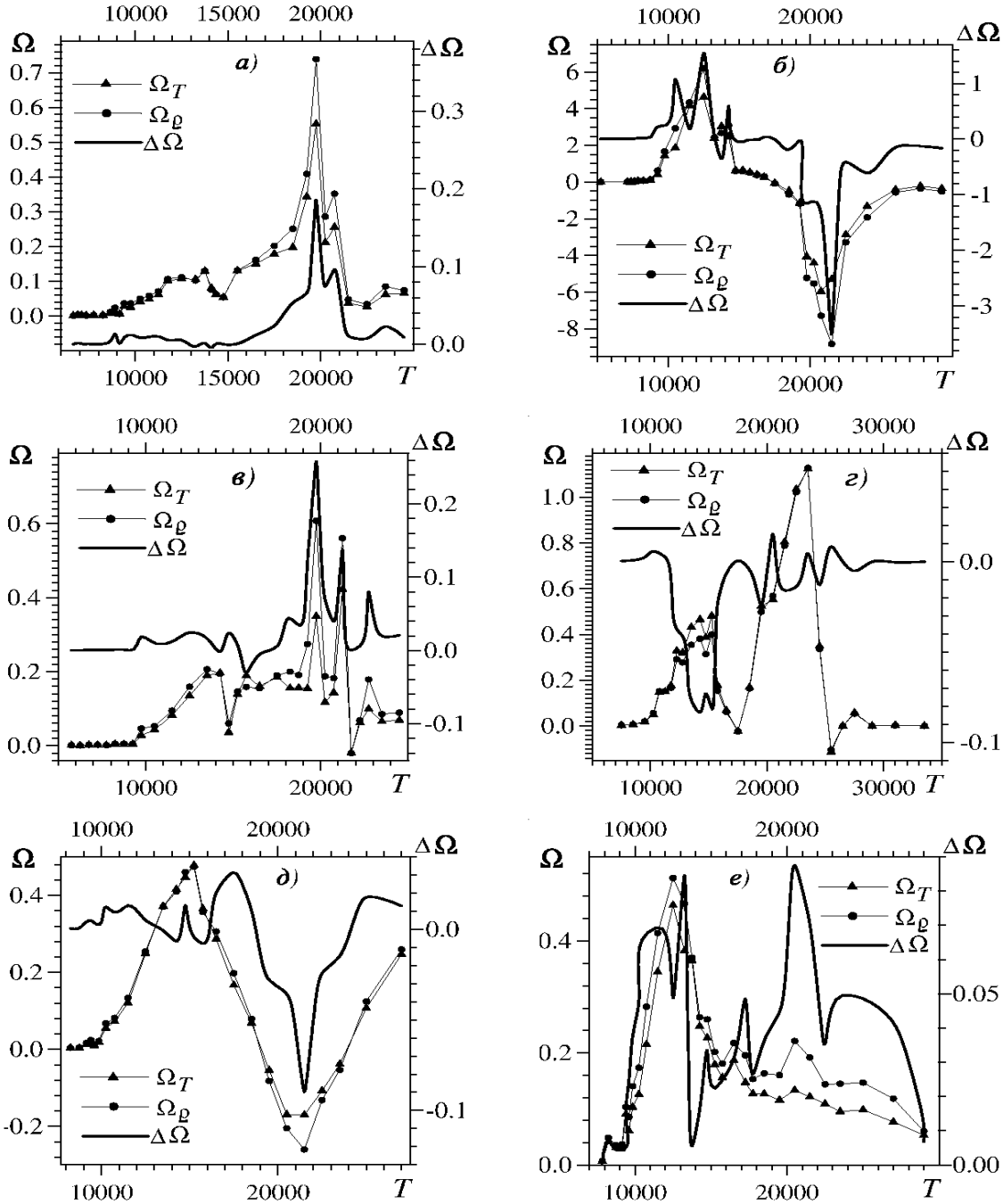


Рис. 1. Зависимости Ω_T, Ω_ρ (левая ось), $\Delta\Omega$ (правая ось) от температуры для различных газов:
а) воздух; б) H_2; в) O_2; г) аргон; д) N_2; е) CO_2

Как видим, для самых различных газов имеются области температур с $\Omega_T \sim \Omega_\rho \sim 1$, причем существуют достаточно широкие зоны развития радиационной неустойчивости, где $\Delta\Omega > 0$. Отметим, что в случае газовых смесей результат может заметно отличаться от химически однородной плазмы.

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. *Кадомцев Б.Б.* Гидромагнитная устойчивость плазмы // Сб.: Вопросы теории плазмы, т. 2. – М.: Атомиздат, 1963.

2. *Михайловский А.Б.* Неустойчивость плазмы в магнитных ловушках. – М.: Атомиздат, 1978.

3. *Трубников Б.А.* Теория плазмы. – М.: Энергоатомиздат, 1996.

4. Теория столба электрической дуги. Низкотемпературная плазма. Т. 1 / *В.С. Энгельшт*, *В.Ц. Гурович*, *Г.А. Десятков* и др. – Новосибирск: Наука. Сиб. отд-ние, 1990.

5. *Горбацкий В.Г.* Газодинамические неустойчивости в астрофизических системах. – СПб.: Изд-во С.-Петербургского университета, 1999.

ДИАГНОСТИКА И МОНИТОРИНГ РАБОТОСПОСОБНОСТИ ЭЛЕКТРИЧЕСКИХ СЕТЕЙ

Е.А. Бибин – генеральный директор ОАО «Волгоградэнерго»
Н.П. Хромов – канд. техн. наук, директор филиала ОАО «Волгоградэнерго», Камышинские электрические сети
С.П. Малюк – нач. связи филиала ОАО «Волгоградэнерго», Камышинские электрические сети
А.В. Коваленко – нач. участка филиала ОАО «Волгоградэнерго», Камышинские электрические сети

Электрические сети являются сложным механизмом, включающим в себя воздушные линии электропередач разного напряжения, трансформаторные подстанции с устройствами защиты и связи, средства диспетчерского управления, измерения и учета. Воздушные линии электропередач составляют более 70 % по объему финансовых затрат в этой системе. Надежность работы линий электропередач является основой экономического благосостояния не только Акционерных обществ энергетики, но и Российской Федерации. Задача создания простых и надежных средств прогнозирования и контроля аварийных ситуаций (включая гололедно-изморозевые отложения на ВЛ) не решена как в России, так и за рубежом. Основными трудностями создания надежных и недорогих информационно-измерительных систем для борьбы с авариями являются:

1. Экстремальные условия работы электрических сетей (высокий уровень радиопомех, высокие напряжения, токи утечки, воздействие влаги, мороза, солнца, тепла, ветра, гололеда, вибраций проводов).

2. Изменяющееся техническое состояние ВЛ в зависимости от времени эксплуатации.

3. Увеличение частоты появления экстремальных ситуаций (гололедно-ветровых, умышленные обрывы проводов).

Поэтому мониторинг работоспособности электрических сетей является первым и, пожалуй, главным этапом в общей системе диагностики неисправностей электрических сетей. Современные технические и программные средства автоматизации и диагностики позволяют достаточно быстро и недорого создать *систему мониторинга для диагностики неисправностей и прогнозирования аварийных ситуаций.*

Эта система должна состоять из сети автоматизированных рабочих мест диспетчеров (рис. 1), снабженных специальным программным обеспечением, которое позволяет не только выявить параметры аварийных ситуаций и выяснить основные причины и условия их возникновения, но и осуществить прогноз последствий от аварий и разработать оптимальные планы их ликвидации.

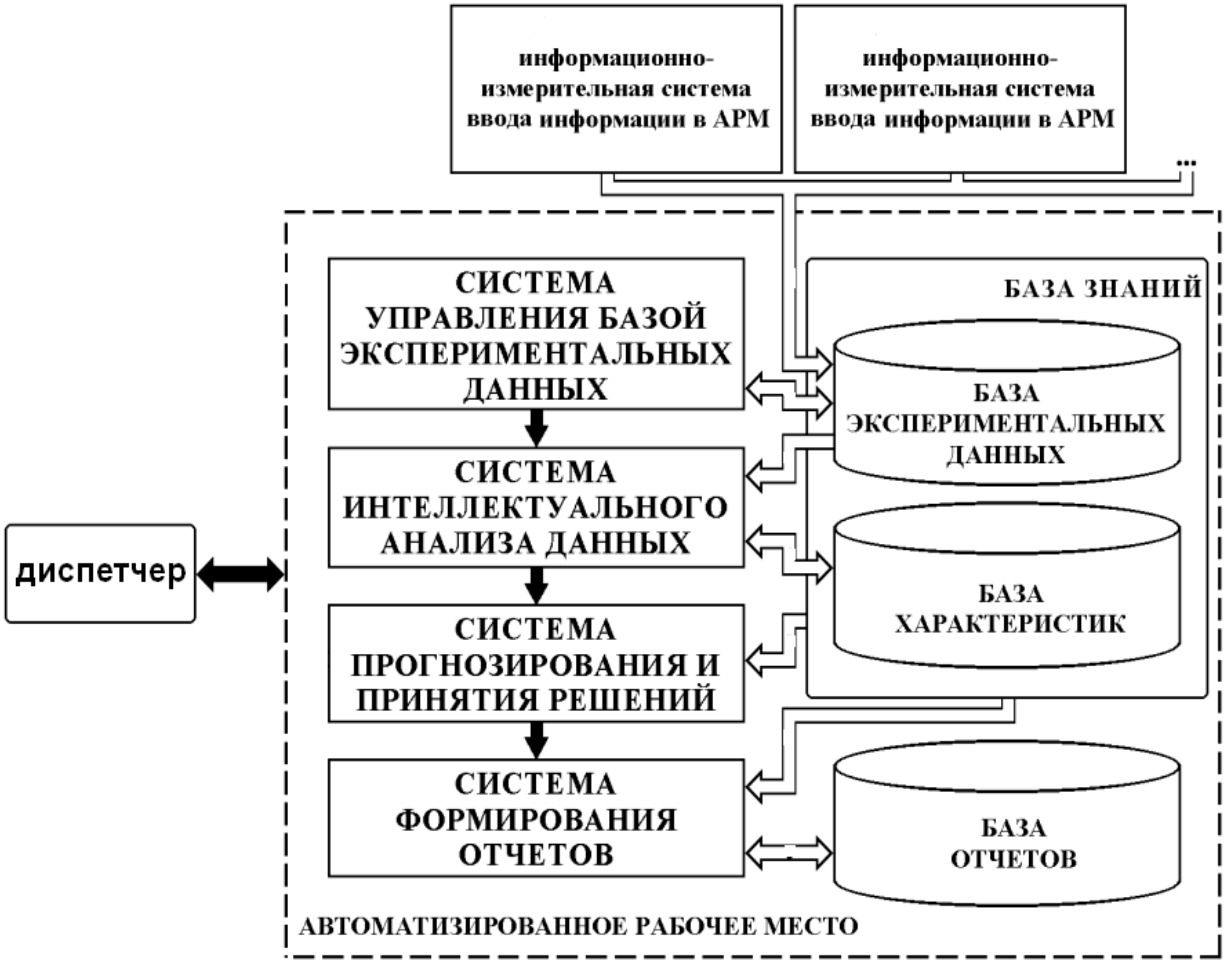
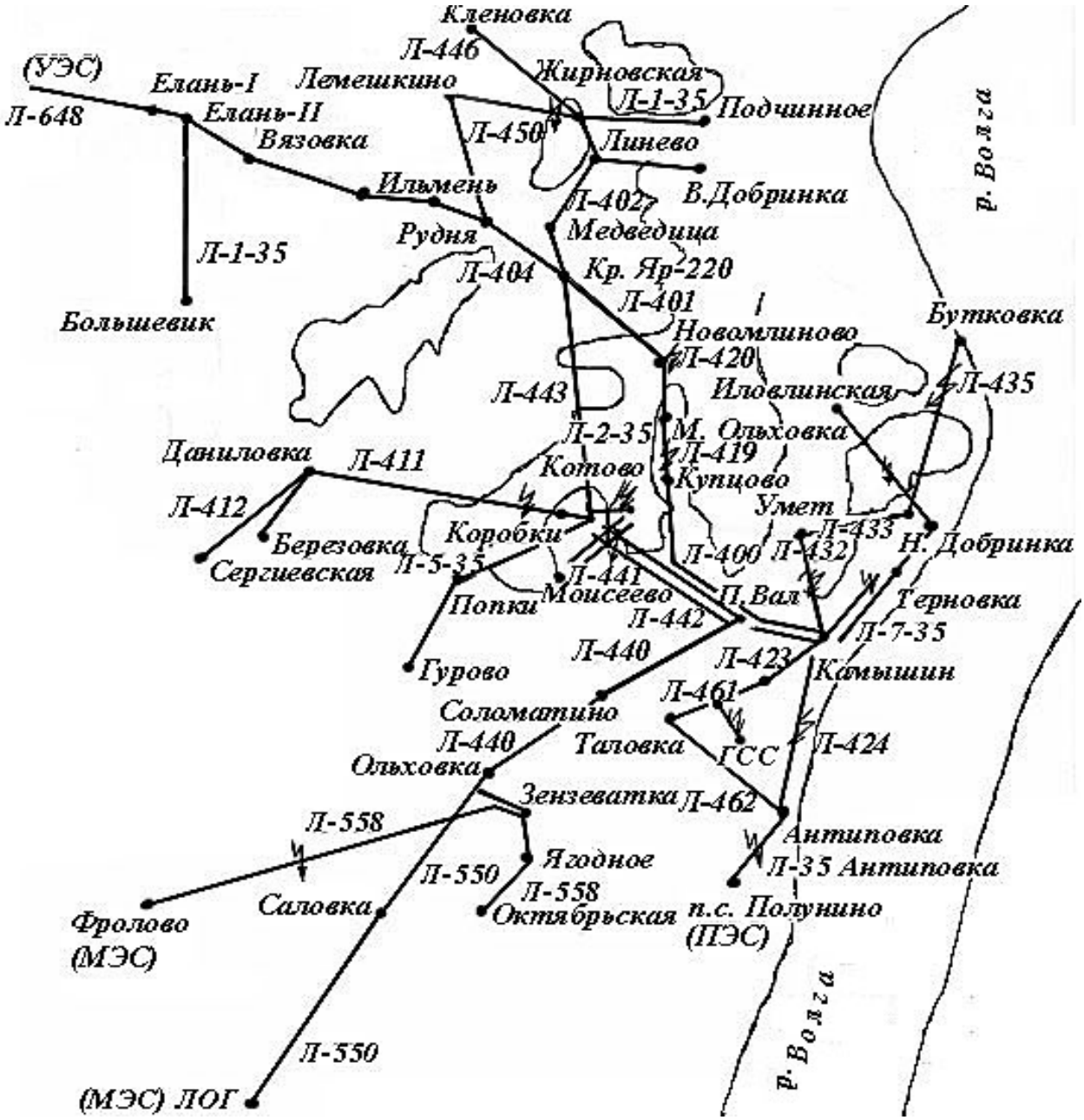


Рис. 1. Структура автоматизированного рабочего места диспетчера

Таким образом, структура пакета прикладных программ автоматизированного рабочего места диспетчера (ППП «ДИСПЕТЧЕР») прозрачна для руководства любого уровня и состоит из трех основных блоков:

1. ППП «Визуализация технологического процесса». Этот пакет позволяет в реальном масштабе времени отслеживать и хранить в *базе экспериментальных данных* (рис. 1) технические паспорта и текущее состояние оборудования, приборов, первичных преобразователей с отображением их географического местоположения (рис. 2).



Обозначения:

– ВЛ-110 кВ

– ВЛ-35 кВ

– Возвышенности до 400 м

– Места повреждения ВЛ

Рис. 2. Пример прорисовки системы визуализации диспетчерского места

2. ППП «Контроль. Диагностика. Прогноз». Этот пакет прикладных программ позволяет создавать, вести и эксплуатировать базу знаний, которая состоит из *базы характеристик* и базы экспериментальных данных, соединенных *базой отчетов и системой формирования отчетов* в единую экспертную систему (рис. 1).

3. ППП «ИИС». Этот пакет прикладных программ предназначен для ввода текущей информации в реальном масштабе времени с первичных преобразователей в базу экспериментальных данных автоматизированного рабочего места.

Система управления базой экспериментальных данных предназначена для ведения разработанной базы данных и обмена информацией с другими базами данных, в том числе с базами SCADA-систем (например, база TraceMode). *Система интеллектуального анализа данных* предназначена для вызова информации из базы экспериментальных данных, помещения их в различные программные средства и размещения полученных результатов в базу характеристик. Это, в основном, различные математические модели, построенные экспериментальными методами. *Система прогнозирования и принятия решений* предназначена для поиска необходимых знаний в *базе знаний*, оценки текущей ситуации и принятия оптимального решения в каждом конкретном случае. Результаты функционирования всех систем собираются системой формирования отчетов в единую экспертную систему с выдачей отчетов и рекомендаций.

АНАЛИЗ ЧИСЛЕННЫХ МЕТОДОВ РАСЧЕТА ДИНАМИЧЕСКИХ ЦЕПЕЙ

А.Н. Шилин – д-р техн. наук, профессор
Волгоградского государственного технического университета
О.А. Крутякова – соискатель
Волгоградского государственного технического университета

Существуют различные методы расчета динамических цепей, которые можно разделить на аналитические и численные. Аналитические методы позволяют получить решение в виде аналитических функций времени, которые удобны для анализа и соответственно выбора оптимальных параметров. К аналитическим методам относятся классический и операторный методы расчета.

Классический метод основан на решении дифференциальных уравнений. При решении задач классическим методом для определения постоянных интегрирования необходимо дополнительное решение систем алгебраических уравнений, причем нулевые начальные условия не приводят к упрощению решения. При вычислении корней характеристического уравнения также необходимо решение алгебраического уравнения, причем известно, что аналитически могут быть вычислены корни уравнений не выше третьей степени.

Кроме того, при использовании этого метода неизвестная функция не может быть вычислена независимо от остальных функций системы дифференциальных уравнений.

В операторном методе расчета электрических цепей, основанном на преобразовании Лапласа, операция сверки двух функций заменяется их произведением в области изображений, а начальные условия учитываются автоматически введением в схему замещения внутренних источников энергии, и при нулевых начальных условиях вычисления значительно упрощаются. Кроме того, при использовании этого метода каждая неизвестная функция может быть вычислена независимо от вычисления остальных неизвестных функций. Основным недостатком этого метода является трудоемкость операции перехода от изображения функции к ее оригиналу, а именно нахождение полюсов дробной рациональной функции изображения при максимальной степени выше третьей.

Среди численных методов широко известен метод дискретизации дифференциальных уравнений, который позволяет получить разностные уравнения путем замены непрерывного аргумента дискретным. Замена осуществляется с помощью прямой и обратной разности. Этот метод достаточно трудоемок, поскольку первоначально составляется система дифференциальных уравнений, а затем осуществляется ее дискретизация и решение. В настоящее время известны численные методы обратного преобразования Лапласа, однако алгоритмы, реализующие эти методы, являются довольно громоздкими, и поэтому при их использовании возможно появление значительных погрешностей.

Теоретической основой численного моделирования импульсных и цифровых устройств и систем является Z-преобразование (преобразование Лорана). Наиболее важным свойством Z-преобразования является возможность нахождения оригинала функции способом, не связанным с вычислением полюсов дробной рациональной функции изображения. Непосредственное разложение дробной рациональной функции в ряд Лорана позволяет по коэффициентам этого ряда определять значения оригинала в тактовые моменты времени. Операция разложения довольно легко реализуется с помощью компьютера.

Для моделирования динамических процессов в электрических цепях и системах разработан операторно-рекуррентный метод анализа, который основан на Z-преобразовании и использует основные его преимущества. А именно, для решения широкого круга задач осуществляется дискретизация входных воздействий и сигналов, а затем используется аппарат Z-преобразования. Операторно-дискретный метод позволяет получать разностные уравнения непосредственно по электрическим схемам замещения с ненулевыми начальными условиями.

Для разработки методик компьютерного анализа, основанных на использовании численных методов моделирования, проведем их сравнительный анализ на примере расчета переходного процесса в электрической цепи.

Задача

На рис. 1 изображена электрическая цепь, содержащая R, L, и C элементы и источник ЭДС.

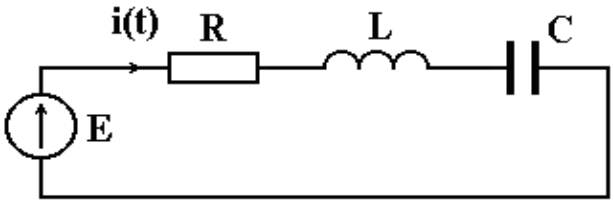


Рис. 1. Схема электрической цепи с последовательным соединением элементов

До коммутации ток равен i (0) = 0 и напряжение на конденсаторе u_c (0) = 0. При исследовании необходимо выбрать наиболее точный метод для определения тока в цепи, при воздействии единичного импульса на входе, по отношению к классическому методу. Для того, чтобы провести анализ, будем использовать следующие четыре цифровых метода: метод Эйлера, метод обратных разностей, метод Тустена и операторно-дискретный метод. Параметры цепи: R = 1000 Ом, C = 0,1 мкФ, L = 10 мГн.

Для экспериментального исследования погрешностей численного метода воспользуемся точными значениями функции $i(t)$, полученными классическим методом расчета, и по результатам вычислений функции $i(nT)$ определим функции абсолютных погрешностей $\Delta i(t) = i(t) - i_T(t)$.

Классический метод

Переходный процесс в заданной цепи описывается неоднородным дифференциальным уравнением 2-го порядка:

$$iR + L\frac{di}{dt} + \frac{1}{C}\int_0^t idt = e(t). \qquad (1)$$

Общее решение уравнения (1), полученное классическим методом, имеет вид:

$$i(t) = 1{,}291 \cdot 10^{-3} \cdot (e^{-11270 \cdot t} - e^{-88730 \cdot t}).$$

Метод Z- форм

Если известно изображение выходного сигнала устройства в виде:

$$F_{ВЫХ}(z) = \frac{a_0 + a_1 z^{-1} + a_2 z^{-2} + \ldots + a_m z^{-m}}{1 + b_1 z^{-1} + b_2 z^{-2} + \ldots + b_h z^{-h}}, \qquad (2)$$

то для определения оригинала может быть использовано одностороннее разложение изображения искомой функции в ряд Лорана.

$$F_{ВЫХ}(z) = \sum_{n=0}^{n=\infty} c_n z^{-n},$$

где $c_n = f_{ВЫХ}[n]$ – коэффициенты ряда Лорана, равные значениям функции оригинала в тактовые моменты времени.

Для определения коэффициентов ряда или значений оригинала функции в тактовые моменты времени используются выражения, полученные из алгоритма деления полиномов числителя и знаменателя (2):

$$f[0] = \frac{a_0}{b_0}; \quad f[n] = \frac{1}{b_0}(a_n - b_n f[0] - b_{n-1} f[1] - ... - b_1 f[n-1]), n \geq 1. \quad (3)$$

Если $n > h$ и $n > m$, то в этой формуле (3) все коэффициенты b_i при $i > h$ и a_n отсутствуют, и формула (3) примет следующий вид:

$$f[n] = -\frac{1}{b_0}(b_h f[n-h] + b_{k-1} f[n-h+1] + ... + b_1 f[n-1]). \quad (4)$$

С помощью метода Z-форм преобразуем непрерывную передаточную функцию в эквивалентную дискретную, используя три вида аппроксимации:

1) $z = e^{pT} \approx 1 + pT$ (прямая разность или метод Эйлера);

2) $z = e^{pT} \approx 1/(1 - pT)$ (обратная разность);

3) $z = e^{pT} \approx \dfrac{1 + pT/2}{1 - pT/2}$ (метод трапеций).

В качестве опорной величины при выборе периода дискретизации T используем минимальную постоянную времени, известную из точного решения.

В таблице 1 представлены функции $I(z)$, полученные методом Z-форм.

Операторно-дискретный метод

Выполним дискретизацию непрерывной функции (1), используя прямую конечную разность:

$$i[n]R + L\frac{(i[n+1] - i[n])}{T} + \frac{T}{C}\sum_{n=0}^{\infty} i[n] = e[n]. \quad (5)$$

К уравнению (5) применим прямое преобразование Лорана:

$$Z\left\{i[n]R + L\frac{(i[n+1] - i[n])}{T} + \frac{T}{C}\sum_{n=0}^{\infty} i[n] - e[n]\right\} = I(z)\left[R + \frac{z-1}{T}L + \frac{zT}{(z-1)C}\right] - E(z) = 0. \quad (6)$$

Из уравнения (6) определим закон Ома в операторно-дискретной форме для участка цепи, содержащего ЭДС:

$$I(z) = \frac{E\dfrac{z}{z-1}}{R + \dfrac{z-1}{T}L + \dfrac{zT}{(z-1)C}}, \quad (7)$$

которому соответствует схема замещения, изображенная на рис. 2.

Выполнив соответствующие математические преобразования в выражении (7), получим выражение $I(z)$, которое указано в таблице 1.

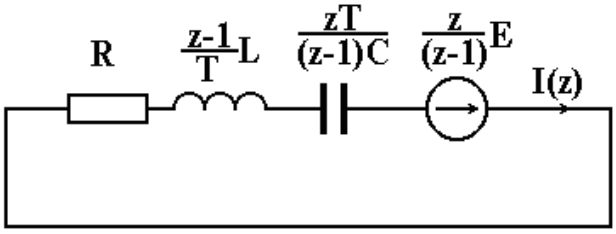


Рис. 2. Схема замещения электрической цепи

Основным преимуществом Z-уравнения является простота перехода от изображения к оригиналу, а именно: разностное уравнение может быть получено непосредственно по выражению изображения без вычислений. Основным недостатком рекуррентных алгоритмов является накопление погрешностей.

В таблице 1 указаны максимальные абсолютные погрешности $\Delta i_{\max}$ свободной составляющей тока цепи.

Таблица 1

Методы расчета	**Аналитическое выражение тока *i*(*t*) и его Z-изображения *I*(*z*)**	$\Delta i_{\max}$
Классический метод	$i(t) = 1{,}291 \cdot 10^{-3} \cdot (e^{-11270 \cdot t} - e^{-88730 \cdot t})$	–
Прямая разность	$I(z) = \dfrac{8{,}873 \cdot 10^{-5} z}{z^2 - 1{,}911z + 0{,}912}$	$1{,}863 \cdot 10^{-5}$
Обратная разность	$I(z) = \dfrac{8{,}144 \cdot 10^{-5} z^2}{z^2 - 1{,}917z + 0{,}918}$	$8{,}144 \cdot 10^{-5}$
Метод трапеций	$I(z) = \dfrac{4{,}247 \cdot 10^{-5} z \cdot (z+1)}{z^2 - 1{,}914z + 0{,}915}$	$4{,}247 \cdot 10^{-5}$
Операторно-дискретный метод	$I(z) = \dfrac{8{,}873 \cdot 10^{-5} z}{z^2 - 1{,}911z + 0{,}911}$	$1{,}639 \cdot 10^{-5}$

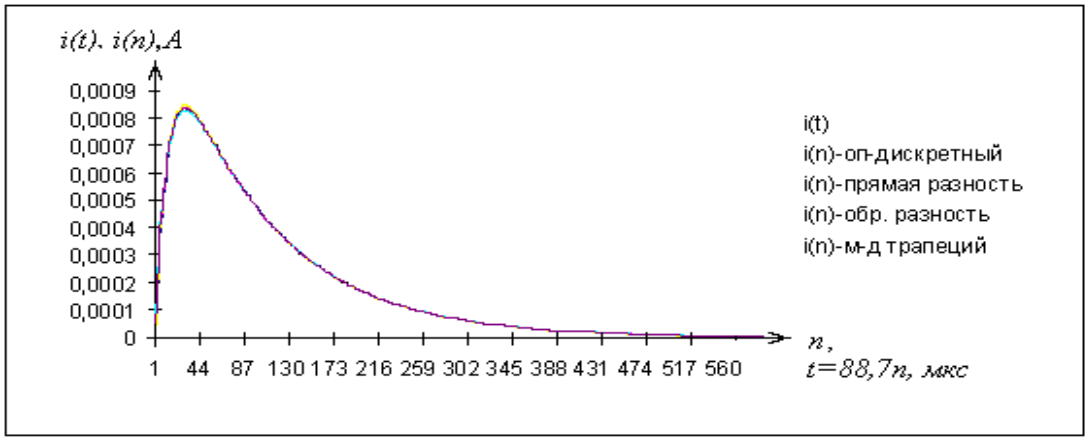


Рис. 3. Графики свободных составляющих тока

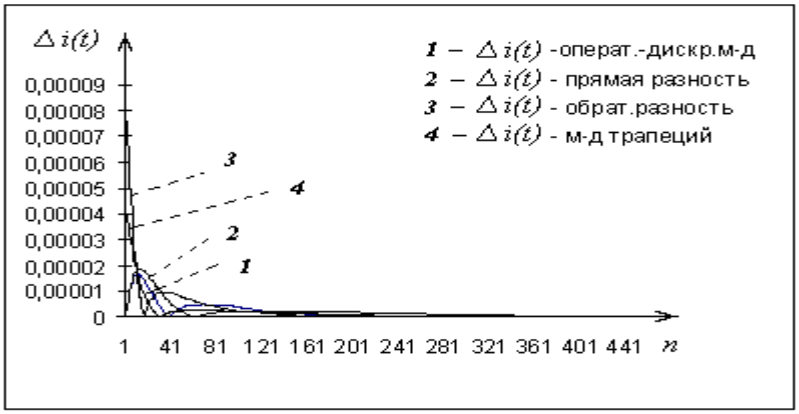


Рис. 4. Графики абсолютных погрешностей, полученных численными методами расчета

ВЫВОДЫ

Анализ результатов решения задачи с помощью численных методов показывает, что погрешности решения удовлетворяют инженерным требованиям, причем наименьшую погрешность имеет операторно-дискретный метод. Кроме того, данный метод позволяет эффективно решать довольно широкий круг задач в области электротехники и автоматики, а именно: линейных, нелинейных, дискретных, непрерывных, с переменными параметрами и изменяющейся структурой, с параметрическими обратными связями, со звеньями запаздывания.

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. *Бессонов Л.А.* Теоретические основы электротехники. Электрические цепи. – М.: Высшая школа, 1978. – 528 с.

2. *Влах И.*, *Сингхал К.* Машинные методы анализа и проектирования электронных схем: Пер. с англ. – М.: Радио и связь, 1988. – 560 с.

3. *Демирчян К.С.*, *Бутырин П.А.* Моделирование и машинный расчет электрических цепей: Учебное пособие для вузов. – М.: Высшая школа, 1988. – 335 с.

4. *Шипилло В.П.* Операторно-рекуррентный анализ электрических цепей и систем. – М.: Энергоатомиздат, 1991.

5. *Шилин А.Н.* Операторно-дискретный метод анализа электрических цепей. Приборы и системы. – Управление, контроль, диагностика. – 2000. – № 7.

СИСТЕМНЫЙ АНАЛИЗ МЕТОДОВ ПРОМЫШЛЕННОГО ТЕХНОЛОГИЧЕСКОГО НАГРЕВА

Е.В. Коптелов – аспирант
Волгоградского государственного технического университета
И.А. Коптелова – ст. преподаватель
Волгоградского государственного технического университета

Нагрев различными методами с давних пор составляет неотъемлемую часть производственного процесса во многих отраслях промышленности. Энергетически задача носителя конечной энергии при нагреве всегда состоит

в том, чтобы преобразовать эту энергию в теплоту до желаемого уровня температуры. Оптимальный энергоноситель при этом необходимо выбирать с учетом производственно-экономического, технического и экологического критериев. Промышленный технологический нагрев применяется в пищевой, текстильной, химической, металлургической, машиностроительной, стекольной, керамической и других отраслях.

Рациональное использование энергии и раскрытие энергосберегающего потенциала при применении методов технологического нагрева не только интересны для пользователя с производственно-экономической точки зрения, но и, более того, приводят к заметному сокращению энергопотребления.

Метод пламенного нагрева представляет собой химический процесс выработки тепловой энергии, в ходе которого твердые, жидкие или газообразные горючие материалы соединяются с кислородом с выделением тепла. В процессе нагрева образуются газообразные продукты, отработанные газы, являющиеся носителями теплоты, высвобождающейся при горении. Негорючие компоненты, содержащиеся в твердых горючих материалах, приняв незначительную часть теплоты сгорания, остаются в виде золы и шлаков. При методах пламенного нагрева преобразование энергии ископаемых материалов в теплоту всегда происходит вне нагреваемого материала. Результатом этого является весьма неравномерное распределение температуры в нагреваемом материале, поскольку энергия вводится только через поверхность.

Метод электронагрева. При использовании электротермических методов преобразование электроэнергии в теплоту происходит как вне, так и внутри материала различными способами. Преимущества применения электрической энергии в теплотехнических производственных процессах обусловлены особыми физическими свойствами этого вида энергии и состоят в следующем:

– выработка тепла без использования пламени;

– высочайшая надежность и отсутствие выброса вредных веществ;

– высокие удельные мощности, температуры и скорости нагрева;

– возможность целенаправленного нагрева внутри материала (прямой нагрев).

Резистивный нагрев основан на выделении тепла при прохождении электрического тока через проводник, имеющий сопротивление. При прямом резистивном нагреве, чаще называемом кондукционным нагревом, электрический ток течет непосредственно в самом нагреваемом материале. Типичными случаями применения являются, например, нагрев проволок, лент и прокатных заготовок, контактная сварка, выплавка и восстановление металлов.

Индукционный нагрев. При индукционном нагреве под действием переменного магнитного поля в электропроводящем материале возникают электрические токи, называемые вихревыми, которые вызывают нагрев материала. Таким образом, индукционный нагрев является непосредственным

методом нагрева и обеспечивает особенно быстрый, локально ограниченный и бесконтактный нагрев и плавку.

Чтобы выяснить, какой энергоноситель с учетом производственно-экономических и технических критериев обеспечивает оптимальный режим нагрева или плавки, следует, наряду с экономическими показателями для оценки установок и методов нагрева, принимать во внимание и такие критерии, как: энергетические затраты, инвестиционные затраты, экологичность, равномерность нагрева, квалификация обслуживающего персонала. Для того, чтобы выбрать более оптимальное решение и учесть все критерии, была разработана методика выбора метода промышленного технологического нагрева, основанная на морфологическом подходе. На стадии морфологического анализа получают описание всех потенциально возможных решений данной задачи. На этапе морфологического синтеза из большого числа технических решений выбираются наилучшие решения. Морфологический синтез основан на методе парного сопоставления и расстановки приоритетов.

Методика морфологического синтеза рассмотрена на примере выбора метода промышленного нагрева из трех вариантов по шести критериям.

Критерии: d_1 – Энергетические затраты, d_2 – Инвестиционные затраты, d_3 – Возможность автоматизации, d_4 – Экологичность, d_5 – Равномерность нагрева, d_6 – Квалификация обслуживающего персонала. Варианты: X_1 – Топливный нагрев, X_2 – Резистивный нагрев, X_3 – Индукционный нагрев. Оценка, в соответствии с указанным выше методом, осуществляется с помощью комплексных приоритетов $B_{i\,ком}$ по формуле:

$$B_{i\,ком} = \sum_{i=1}^{n} \beta'_j B'_{ij} ,$$

где β'_j – относительный приоритет (значимость) j-го критерия; B'_{ij} – относительный приоритет i-го варианта по j-му критерию; n – количество критериев.

Квадратная матрица смежности заполняется коэффициентами предпочтений 1,5; 1,0; 0,5. Это правило более точно описывает соотношение предпочтений.

На первом этапе строятся квадратные матрицы для каждого из критериев. В столбцах и строках пишется номер варианта, а на пересечении – коэффициенты, указывающие какой вариант предпочтительнее по данному критерию. Например, составим матрицу смежности по критерию «энергетические затраты» и сравним все возможные варианты попарно (таблица 1).

Следующий этап предусматривает последовательное определение абсолютных приоритетов β_j вариантов, а затем – относительных B'_{ij}. Аналогичным образом составляются матрицы смежности для других критериев.

Далее определяются значимости критериев. Для этого также применяют метод расстановки приоритетов, с той лишь разницей, что объектами сопоставления теперь являются не варианты решений, а критерии оценки d_j.

Таблица 1

Матрица смежности по первому критерию

Индекс варианта	Матрица смежности по 1-му критерию			$\sum$	$в'_j$	B'_{ij}
	X_1	X_2	X_3			
X_1	1,0	1,5	1,5	4	11,5	0,46
X_2	0,5	1,0	1,5	3	8,0	0,32
X_3	0,5	0,5	1,0	2	5,5	0,22
Всего	–	–	–	–	25,0	1,00

Вычисленные относительные приоритеты β'_j и являются коэффициентами значимости критериев (таблица 2).

Таблица 2

Матрица смежности определения важности критериев

Индекс критерия	d_1	d_2	d_3	d_6	Σ	β_j	β'_j
d_1	1,0	1,5	1,5	1,5	9	59,0	0,1873
d_2	0,5	1,0	1,5	1,5	8	50,5	0,1603
d_3	0,5	0,5	1,0	1,5	7	43,0	0,1365
d_4	1,5	1,5	1,5	1,5	10	68,5	0,2175
d_5	0,5	0,5	0,5	0,5	4	26,5	0,0841
d_6	0,5	0,5	0,5	1,0	5	31,0	0,0984
Всего	–	–	–	–	–	315,0	1,0000

Затем вычисляется комплексный показатель (приоритет) для каждого из вариантов $B_{i\ ком}$, который определяется как сумма произведений относительных приоритетов объекта на относительные приоритеты критериев. Вариант, получивший наибольшее значение $B_{i\ ком}$, может считаться лучшим из всех остальных (таблица 3). Таким образом, можно сделать вывод, что индукционный нагрев является оптимальным в данном случае.

Таблица 3

Определение комплексного показателя

Критерии значимости	Относительный приоритет по каждому варианту		
	X_1	X_2	X_3
0,1873	0,4600	0,3200	0,2200
0,1603	0,4600	0,3200	0,2200
0,1365	0,2200	0,3200	0,4600
0,2175	0,2157	0,3922	0,3922
0,0841	0,2200	0,3200	0,4600
0,0984	0,2157	0,3922	0,3922
Комп. приор.	**0,27657825**	**0,6043951**	**0,74284168**

На основе разработанной методики была создана экспертная система выбора оптимального технического решения по заданным критериям. Программа полностью реализует метод парных сравнений. Задачу с любым количеством вариантов и критериев можно решить, применив эту систему. Кроме того, возможность изменения шкалы оценок позволяет тонко настраивать программу.

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. *Моисеева Н.К.*, *Карпунин М.Г.* Основы теории и практики функционально-стоимостного анализа. – М.: Высш. шк., 1988. – 192 с.

2. *Джонс Дж.К.* Методы проектирования: Пер с англ. – М.: Мир, 1986. – 326 с.

3. *Одрин В.М.* Метод морфологического анализа технических систем. – М.: ВНИИПИ, 1989. – 312 с.

АНАЛИЗ ДИНАМИЧЕСКИХ ХАРАКТЕРИСТИК ЭЛЕКТРОМЕХАНИЧЕСКИХ СИСТЕМ

А.Н. Шилин – д-р техн. наук, профессор
Волгоградского государственного технического университета
Д.А. Черных – ст. преподаватель
Волгоградского государственного технического университета

При проектировании электромеханических систем (электроприводов, различных преобразователей перемещений и др.) одной из основных задач является обоснованный выбор элементов и узлов электромеханического оборудования, обеспечивающий необходимые динамические свойства системы.

Обычно при анализе динамических характеристик электромеханических систем используется переходная функция, являющаяся реакцией на функцию Хэвисайда, которая представляет собой единичное ступенчатое воздействие и является самым тяжелым и неблагоприятным воздействием. Однако на практике довольно часто в качестве входных воздействий могут быть функции более плавные, чем функция Хэвисайда, и в этом случае выбор параметров и характеристик электромеханического оборудования по переходной функции, то есть реакции на функцию Хэвисайда, необоснованно завышает требования.

Целью данного анализа является исследование зависимости динамических погрешностей отработки входного воздействия электромеханической системы от формы этого воздействия.

В качестве примера анализа рассмотрим наиболее простой случай, а именно, когда электромеханическая система представляет собой апериодическое звено первого порядка с передаточной функцией $W(p)=\dfrac{K}{1+pT_c}$. Переходная и импульсная переходная функции имеют, соответственно, выражения:

$$h(t)=K\left(1-e^{\frac{t}{T_c}}\right); \qquad (1)$$

$$k(t)h'(t) = K_c e^{\frac{t}{T_C}}, \qquad (2)$$

где $K_c = \dfrac{K}{T_c}$.

В качестве входного воздействия на электромеханическую систему также используем наиболее благоприятное и простое, а именно экспоненциальное воздействие:

$$x(t) = X_m \left(1 - e^{\frac{t}{T_{BX}}}\right), \qquad (3)$$

где X_m – максимальное значение входного сигнала; $T_{вх}$ – постоянная времени.

Очевидно, что для нормальной электромеханической системы должно выполняться условие $T_c < T_{вх}$.

Реакция системы на (3) может быть определена по формуле свертки функций:

$$y(t) = \int_0^t x(\tau)h'(t-\tau)d\tau = K\left(1 - \frac{T_{вх}}{T_{вх} - T_c} e^{-\frac{t}{T_{BX}}} + \frac{T_c}{T_{вх} - T_c} e^{-\frac{t}{T_C}}\right), \qquad (4)$$

где $K = X_m K_c$.

Определим погрешность *преобразования* входного воздействия в выходное. Поскольку в процессе работы искажение обусловлено запаздыванием электромеханической системы, то целесообразно для оценки погрешности привести сравниваемые величины к одной (входной или выходной). Обычно в таких случаях выбирают нормированное максимальное значение, равное 1, что позволяет получить погрешность в относительных единицах – %. В данном случае $X_m = 1$, $K_c = 1$.

$$\Delta(t) = y(t) - x(t) = \frac{T_c}{T_{вх} - T_c}\left(e^{-\frac{t}{T_C}} - e^{-\frac{t}{T_{BX}}}\right). \qquad (5)$$

Определим максимальную погрешность из условия $\Delta'(t) = 0$:

$$\frac{T_c}{T_{вх} - T_c}\left(-\frac{1}{T_c} e^{-\frac{t}{T_C}} + \frac{1}{T_{вх}} e^{-\frac{t}{T_{BX}}}\right) = 0. \qquad (6)$$

Из (6) найдем время, при котором погрешность максимальна:

$$t_{\Delta \max} = \frac{\ln \dfrac{T_c}{T_{вх}}}{\dfrac{1}{T_c} - \dfrac{1}{T_{вх}}}, \qquad (7)$$

и величину этой погрешности:

$$\Delta_{\max} = \frac{T_c}{T_{вх} - T_c}\left(-\frac{1}{T_c} e^{-\frac{t_{\Delta\max}}{T_C}} + \frac{1}{T_{вх}} e^{-\frac{t_{\Delta\max}}{T_{ВХ}}} \right). \quad (8)$$

На рис. 2, *а* изображен пример передаточной функции системы, её реакция на входное воздействие и погрешность.

В данном примере:

$T_c = 10^{-3}$ с; $T_{вх} = 10^{-2}$ с; $t_{\Delta\max} = 0{,}00255842$ с; $\Delta_{\max} = 0{,}07742$.

Обозначим $k_T = \frac{T_{вх}}{T_c}$, в данном случае $k_T = 10$, тогда:

$$\tau_{\Delta\max} = \frac{T_c k_T \ln\frac{1}{k_T}}{k_T - 1} = \frac{T_{вх} \ln\frac{1}{k_T}}{k_T - 1}, \quad (9)$$

$$\Delta_{\max}(k_T) = \frac{\left(e^{\frac{k_T \ln\left(\frac{1}{k_T}\right)}{k_T - 1}} - e^{\frac{\ln\left(\frac{1}{k_T}\right)}{k_T - 1}}\right)}{k_T - 1}. \quad (10)$$

Как видно из рис. 1, относительная погрешность зависит только от отношения постоянных времени и не зависит от их абсолютных значений.

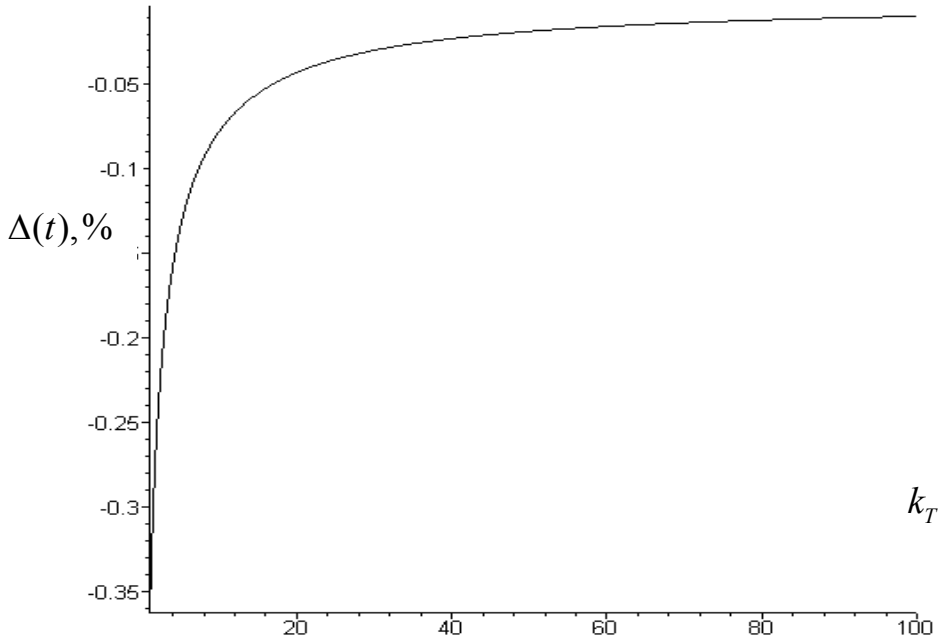
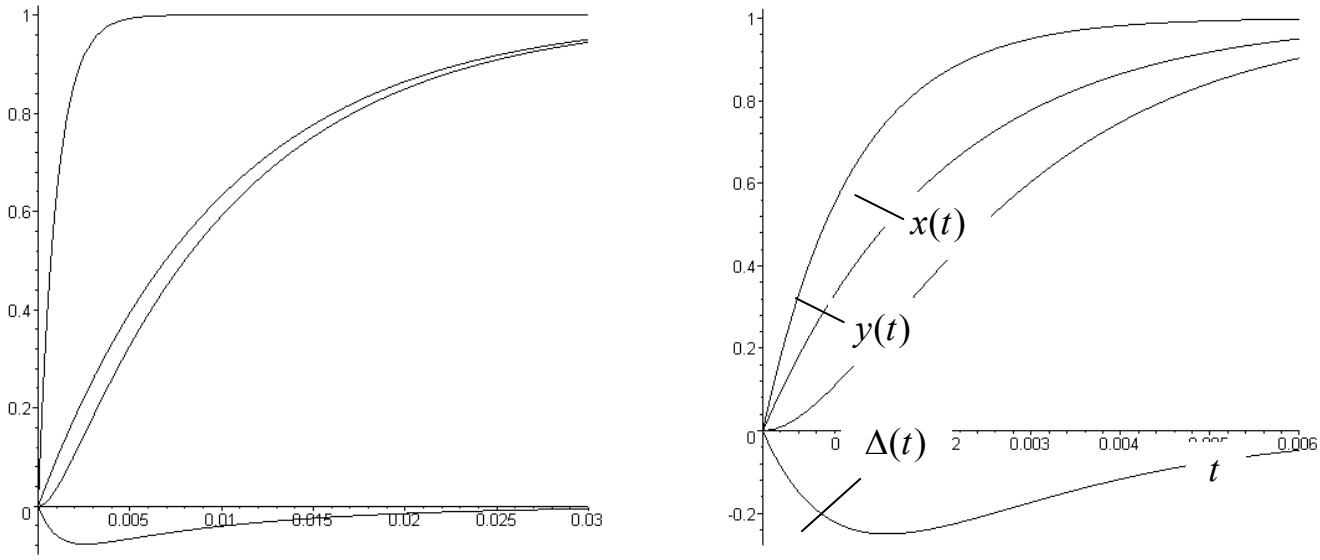


Рис. 1. Зависимость относительной погрешности электромеханической системы от отношения постоянных времени

Если же мы увеличим скорость изменения входного сигнала, то есть, например, $T_{вх} = 2 \cdot 10^{-3}$ с, и, соответственно $k_T = 2$, получим следующие данные: $t_{\Delta max} = 0{,}0013862$ с, $\Delta_{max} = -0{,}25$ (рис. 2, *б*).



а *б*

Рис. 2. Реакция системы на входное воздействие:
а) пример 1; б) пример 2

Как видно, при изменении отношения постоянных времени k_T изменяется и величина максимально ошибки и время её появления. Построим графики зависимости $t_{\Delta max}(k_T)$ и $\Delta_{max}(k_T)$ при фиксированном $T_c = 10^{-3}$ с (рис. 3).

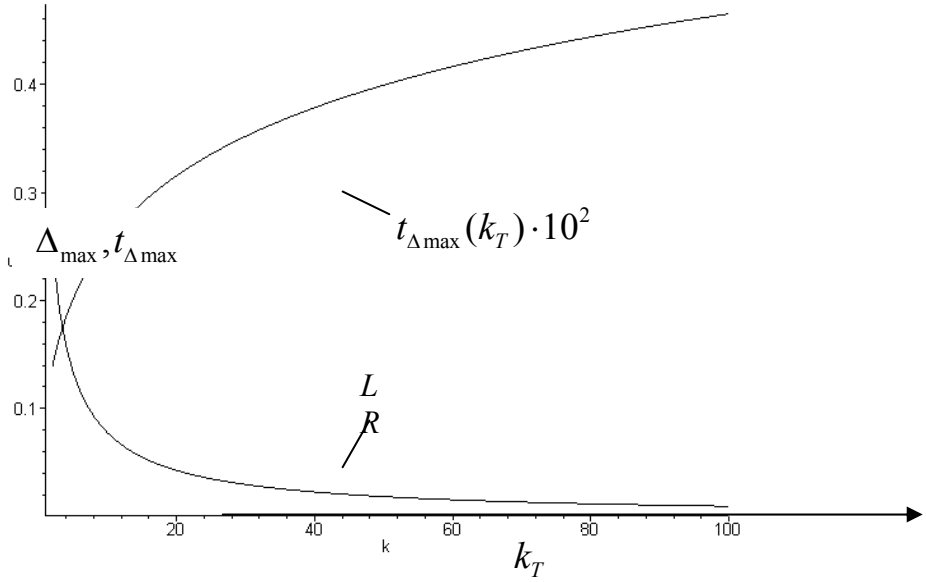


Рис. 3. Зависимость максимальной динамической погрешности и её времени возникновения от отношения постоянных времени входного сигнала и преобразователя

Полученные данные позволяют делать обоснованный выбор характеристик электромеханической системы (T_c) с учетом того, что расчеты ведутся по наиболее вероятному виду входного воздействия – экспоненциальному, и для меньшей погрешности отработки T_c должна удовлетворять условию $T_c << \frac{T_{вх}}{k_T}$.

Если входное воздействие имеет более сложную форму, то для использования предложенной методики входная функция может быть разложена в экспоненциальный ряд. Выходной сигнал в данном случае будет являться суммой реакций системы на каждое из входных воздействий, производимых членами ряда.

ПРОБЛЕМЫ ОПРЕДЕЛЕНИЯ МЕСТА ПОВРЕЖДЕНИЯ ПРОВОДОВ В ЛИНИЯХ ЭЛЕКТРОПЕРЕДАЧИ

В.П. Заярный – д-р техн. наук, доцент
Волгоградского государственного технического университета
С.А. Иванников – аспирант
Волгоградского государственного технического университета

Повреждение проводов в высоковольтных линиях электропередачи (ЛЭП), вызванное как естественными (ветер, молния и т.д.), так и искусственными причинами (воздействие посторонних лиц, дефект оборудования и т.п.), является крайне нежелательным, так как приводит к обесточиванию огромных территорий, на которых могут находиться крупные жилые массивы, промышленные предприятия с непрерывным циклом производства и вредными отходами, системы водоснабжения и канализации, здравоохранительные учреждения и т.д. В этом случае отключение электроэнергии является весьма опасным как для здоровья человека, так и для окружающей среды. Поэтому скорейшее обнаружение места повреждения токоведущих проводов ЛЭП и устранение повреждений имеет принципиально важное значение, а разработка способов обнаружения повреждений ЛЭП (типа *обрыв проводов*) является весьма актуальным.

Предлагаемый в данном случае способ дистанционного контроля наличия повреждений токоведущих проводов ЛЭП основан на фиксации изменения структуры электрической составляющей поля, создаваемого в окрестности этих проводов, в момент обрыва одного или нескольких проводов. В рассматриваемых ЛЭП (рис. 1) используется трехфазная система передачи электроэнергии, которая передается электрическим полем между линейными проводами *A*, *B*, *C* (рис. 1).

Поскольку между напряжениями различных проводов ЛЭП существует сдвиг по фазе, то они представляются комплексами $\overset{\circ}{U}_{AB}$, $\overset{\circ}{U}_{BC}$, $\overset{\circ}{U}_{AC}$, значение модулей напряжений которых достигает порядка 10 кВ. Система токоведущих проводов ЛЭП в поперечном сечении образует треугольник, близкий

к правильному, что обусловливает соответствующую структуру напряжения и электрического поля.

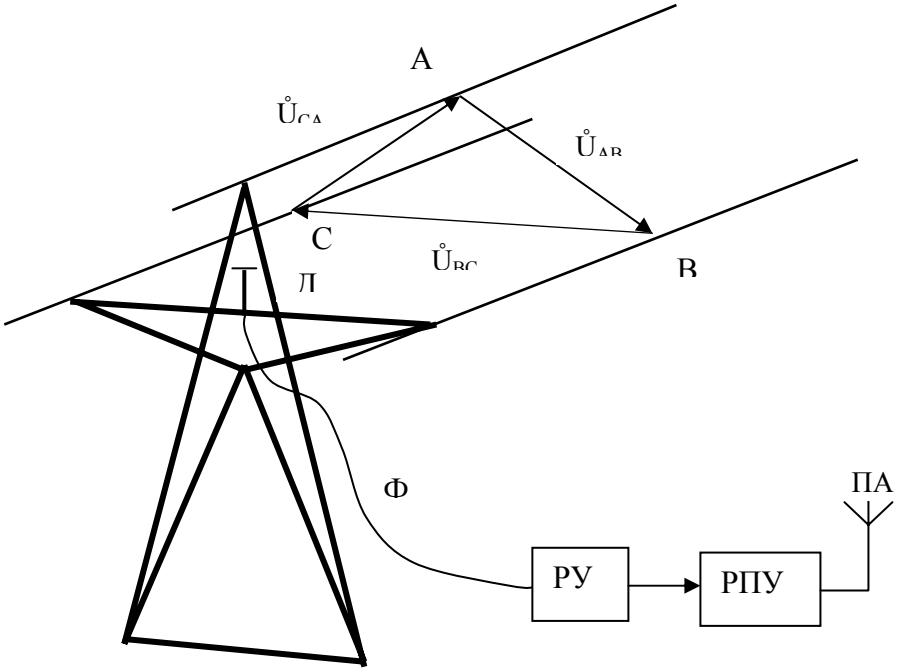


Рис. 1. Структура ЛЭП, распределение напряжений между ее проводами и размещение регистрирующей аппаратуры

Векторная диаграмма для составляющих электрического поля в поперечном сечении проводов ЛЭП приведена на рис. 2. Поскольку векторы линейных напряжений ЛЭП $\mathring{U}_{AB}$, $\mathring{U}_{BC}$, $\mathring{U}_{AC}$ сдвинуты между собой по фазе на 2/3π [1], то и векторы напряженностей электрических полей $\mathring{E}_{AB}$, $\mathring{E}_{BC}$, $\mathring{E}_{AC}$ будут иметь такой же сдвиг по фазе. Можно показать, что в результате суперпозиции электрических полей от всех проводов ЛЭП в геометрическом центре *O* равностороннего треугольника *ABC* их суммарная напряженность близка к нулю. Известно [2], что напряженность электрического поля *E* связана с мгновенной разностью потенциалов *φ* соотношением:

$$\vec{E} = -\mathrm{grad}\varphi .$$

В скалярной форме будем иметь:

$$E = \frac{\Delta\varphi}{\Delta r} = \frac{u}{\Delta r} .$$

В равностороннем треугольнике *ABC* точка *O* находится на одинаковом расстоянии от его вершин, поэтому для него $\Delta r = OA = OB = OC$. Пусть, с учетом сдвига фаз для точки *O* (рис. 2), напряженности электрических полей:

$$\dot{E}_A = E \exp(-j0); \quad \dot{E}_B = E \exp(-j2/3\pi); \quad \dot{E}_C = E \exp(-j4/3\pi),$$

где $E = E_A = E_B = E_C$ – модули комплексов $\dot{E}_A$, $\dot{E}_B$, $\dot{E}_C$. Тогда нетрудно показать, что в точке O:

$$\dot{E}_A + \dot{E}_B + \dot{E}_C = 0.$$

Следовательно, если в геометрическом центре O треугольника ABC установить чувствительный элемент (датчик), реагирующий на электрическую составляющую поля, то показания регистрирующего устройства (РУ, рис. 1) должны быть вблизи нуля (минимальными).

В случае, если происходит обрыв одного из проводов трехфазной ЛЭП (провода A, B, C, см. рис. 2), то симметрия электрического поля в окрестности точки O нарушится из-за нарушения условия ее равноудаленности от проводов A, B, C. Это, в свою очередь, приведет к резкому изменению (возрастанию) напряженности электрического поля в данной точке, что может быть зарегистрировано с помощью РУ. Следует заметить, что к такому же эффекту приведет и смещение местоположения датчика в пространстве относительно точки O (например, его отрыв от опоры ЛЭП).

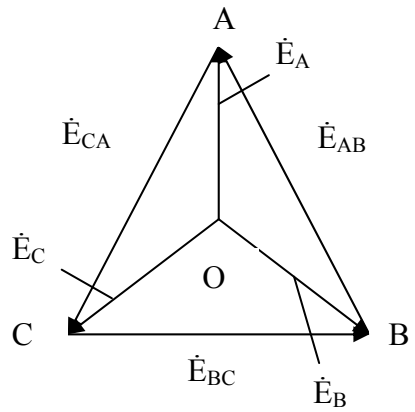


Рис. 2. Векторная диаграмма напряженностей электрических полей в поперечном сечении трехфазной ЛЭП

В качестве датчика напряженности электрического поля *Д* (рис. 1) может быть использован простейший вибратор, а в качестве фидера – коаксиальный кабель. В качестве регистрирующего устройства может быть использован селективный вольтметр, усилитель с амплитудным детектированием сигнала от датчика или другое аналогичное устройство.

Для дистанционного контроля состояния токоведущих проводов ЛЭП сигнал с выхода РУ можно закодировать для передачи на контрольный пункт с помощью радиопередающего устройства (РПУ) и передающей антенны (ПА).

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. *Нейман Л.Р.*, *Демирчян К.С.* Теоретические основы электротехники. – М.: Энергия, 1981.

2. *Сивухин Д.В.* Общий курс физики. Т. 3. Электричество. – М.: Наука, 1986.

РАСЧЕТ ЭЛЕКТРИЧЕСКИХ ЦЕПЕЙ С ИСТОЧНИКАМИ СТОХАСТИЧЕСКИХ СИГНАЛОВ

А.Н. Шилин – д-р техн. наук, профессор
Волгоградского государственного технического университета
С.В. Макартичян – ст. преподаватель
Волгоградского государственного технического университета

Одним из основных параметров электронных измерительных устройств является порог чувствительности, который определяется внутренними шумами устройства. Наибольшее влияние на порог чувствительности оказывают датчик и аналоговая схема обработки информации.

Обычно при проектировании электронных схем обработки информации в измерительных устройствах в качестве исходной информации используются детерминированные сигналы. Однако для обеспечения необходимого порога чувствительности необходим анализ схемы с источниками стохастических сигналов. Поскольку при расчете электронные схемы преобразуются с помощью схем замещения в электрические цепи, произведем анализ электрической *z*-цепи, содержащей все основные элементы.

Важнейшим инструментом прикладной теории случайных процессов является доказанная в 1934 г. теорема Хинчина-Винера, устанавливающая связь между функцией корреляции $r(\tau)$ и спектром мощности $S(\omega)$ случайного процесса:

$$r(\tau)=\frac{1}{2\pi}\int_{-\infty}^{+\infty}S(\omega)\,e^{j\omega\tau}d\omega, \qquad (1)$$

$$S(\omega)=\int_{-\infty}^{+\infty}R(\tau)\,e^{j\omega\tau}d\tau\,. \qquad (2)$$

Предположим, что на некоем входе линейной стационарной цепи присутствует колебание $x(t)$, представляющее собой реализацию случайного процесса $X(t)$. Зная математическую модель системы, которая определяется, например, частотным коэффициентом передачи $W(j\omega)$, можно всегда найти выходную реакцию $y(t)$. Обладая вероятностными характеристиками случайного процесса $X(t)$, можно исследовать связь между статистическими характеристиками процессов $X(t)$ и $Y(t)$.

Спектральная плотность мощности $S_y(\omega)$ и функция корреляции $r_y(\tau)$ выходного случайного сигнала связаны с аналогичными величинами на входе соотношениями:

$$S_y(\omega)=S_x(\omega)\left|W(j\omega)\right|^2, \qquad (3)$$

$$r_y(\tau)=\frac{1}{2\pi}\int_{-\infty}^{+\infty}S_x(\omega)\left|W(j\omega)\right|^2 e^{j\omega\tau}d\omega\,. \qquad (4)$$

Заметим, что дисперсия выходного сигнала

$$\sigma_y^2 = r_y(0). \tag{5}$$

Решим следующую задачу: рассмотрим влияние источника шумовой ЭДС с постоянной на всех частотах спектральной плотностью мощности $S(\omega) = S_0 = \text{const}$ («белый» шум) на RLC-цепь со следующими параметрами: $R = 15$ Ом, $L = 0{,}1$ мГн, $C = 2$ мкФ (рис. 1).

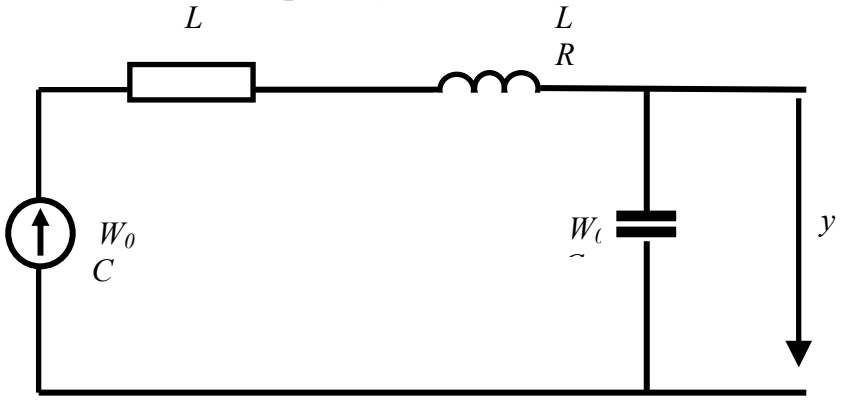


Рис. 1

Частотные коэффициенты передачи по напряжению со входа шумового источника на выходы элементов цепи:

$$W_C(j\omega) = \frac{1}{1 - LC\omega^2 + jRC\omega},$$

$$W_R(j\omega) = \frac{jRC\omega}{1 - LC\omega^2 + jRC\omega},$$

$$W_L(j\omega) = \frac{-LC\omega^2}{1 - LC\omega^2 + jRC\omega},$$

а соответствующие коэффициенты передачи мощности:

$$|W_C(j\omega)|^2 = \frac{1}{1 + \left((RC)^2 - 2LC\right)\omega^2 + (LC)^2\omega^4}, \tag{6}$$

$$|W_R(j\omega)|^2 = \frac{(RC)^2\omega^2}{1 + \left((RC)^2 - 2LC\right)\omega^2 + (LC)^2\omega^4}, \tag{7}$$

$$|W_L(j\omega)|^2 = \frac{(LC)^2\omega^4}{1 + \left((RC)^2 - 2LC\right)\omega^2 + (LC)^2\omega^4}. \tag{8}$$

Используя выражения (6)-(8) и подставляя в них численные данные задачи, по формулам (3)-(5) можно определить характеристики выходного сигнала:

$$S_{yC}(\omega) = S_0 \frac{1}{\left(1 + \omega^2\tau_1^2\right)\cdot\left(1 + \omega^2\tau_2^2\right)},$$

$$S_{yR}(\omega) = S_0 \frac{(RC)^2 \omega^2}{\left(1+\omega^2\tau_1^2\right)\cdot\left(1+\omega^2\tau_2^2\right)},$$

$$S_{yL}(\omega) = S_0 \frac{(LC)^2 \omega^4}{\left(1+\omega^2\tau_1^2\right)\cdot\left(1+\omega^2\tau_2^2\right)},$$

$$r_{yC}(\tau) = \frac{S_0}{2\left(\tau_1^2-\tau_2^2\right)}\left(\tau_1 e^{-\frac{\tau}{\tau_1}} - \tau_2 e^{-\frac{\tau}{\tau_2}}\right),$$

$$r_{yR}(\tau) = \frac{S_0 (RC)^2}{2\left(\tau_1^2-\tau_2^2\right)}\left(\frac{1}{\tau_2} e^{-\frac{\tau}{\tau_2}} - \frac{1}{\tau_1} e^{-\frac{\tau}{\tau_1}}\right),$$

$$\sigma_{yC}^2 = \frac{S_0}{2(\tau_1+\tau_2)},$$

$$\sigma_{yR}^2 = \frac{S_0 (RC)^2}{2\tau_1\tau_2(\tau_1+\tau_2)},$$

где τ_1 = 20 мкс, τ_2 = 10 мкс.

В свою очередь на индуктивном элементе интеграл (4) неопределен, а дисперсия напряжения на нем обращается в бесконечность.

На рис. 2 представлены графики нормированных функций корреляции напряжения на емкостном и резистивном элементах.

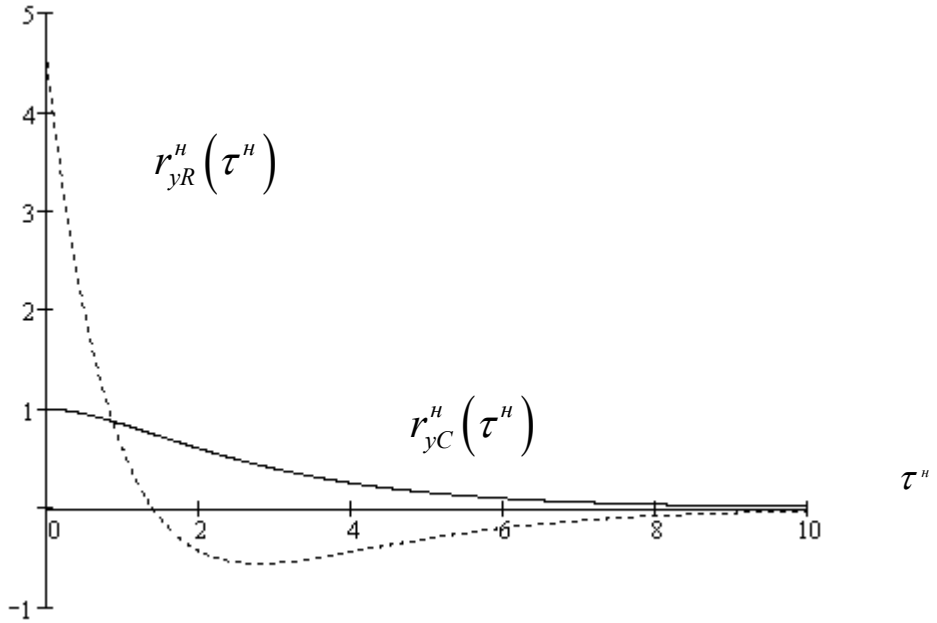


Рис. 2

$$r_{yC}^{н}\left(\tau^{н}\right)=\frac{r_{yC}(\tau)}{\sigma_{yC}^{2}}=\frac{\tau_2}{\tau_1-\tau_2}\left(\frac{\tau_1}{\tau_2}e^{-\frac{\tau_2}{\tau_1}\tau^{н}}-e^{-\tau^{н}}\right),$$

$$r_{yR}^{н}\left(\tau^{н}\right)=\frac{r_{yR}(\tau)}{\sigma_{yC}^{2}}=\frac{(RC)^2}{\tau_2(\tau_1-\tau_2)}\left(e^{-\tau^{н}}-\frac{\tau_2}{\tau_1}e^{-\frac{\tau_2}{\tau_1}\tau^{н}}\right).$$

Здесь $\tau^{н}=\dfrac{\tau}{\tau_2}$.

Видно, что *RLC*-цепь выполняет определённое «упорядочение»: если входной сигнал, будучи «белым шумом», абсолютно непрогнозируем, то выходной сигнал на емкостном и резистивном элементах оказывается сглаженным; интервал корреляции имеет порядок постоянной времени цепи; на индуктивном элементе сигнал предсказать невозможно.

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. Основы цифровой обработки сигналов: Курс лекций / *А.И. Солонина*, *Д.А. Улахович*, С.*М. Арбузов*, *Е.Б. Соловьева*, *И.И. Гук*. – СПб.: БХВ-Петербург, 2003. – 608 с.: ил.

2. *Баскаков С.И.* Радиотехнические цепи и сигналы: Учеб. для вузов по спец. «Радиотехника». – 3-е изд., перераб. и доп. – М.: Высш. шк., 2000. – 462 с.: ил.

ПРОГРАММНО-ИНФОРМАЦИОННЫЙ КОМПЛЕКС МОДЕЛИРОВАНИЯ И ОТОБРАЖЕНИЯ ОДНОЛИНЕЙНЫХ СХЕМ ПОДСТАНЦИЙ

Ю.В. Кисляков – зам. директора по НИР «ЦОТэнерго» РАО ЕЭС
В.П. Ульев – ведущий программист «ЦОТэнерго» РАО ЕЭС
М.И. Чудинов – инженер-энергетик «ЦОТэнерго» РАО ЕЭС
М.А. Щербакова – инженер 2 категории кафедры ЭОП филиала «МЭИ (ТУ)» в г. Волжском

В Южном филиале (ЮФ) ЦОТэнерго, г. Воронеж, создан программно-информационный комплекс моделирования и отображения однолинейных схем подстанций на основе разработанной им интегрированной графической информационной системы (ИнГИС Энерго) [1]. Электронные схемы однолинейных схем распределительных устройств подстанций (схем РУ ПС) автоматически генерируются в ее графические файлы из их топологических моделей в атрибутивных базах данных (БД) ИнГИС.

Целью разработки является автоматизация моделирования в БД ИнГИС схем РУ ПС и их изготовления на твердых носителях для применения в сетевых компаниях РАО ЕЭС. В основные задачи разработки входит сокращение многообразия схем РУ на основе их единой классификации, создание информационной и топологической модели РУ ПС в атрибутивных БД, разработка

методов, алгоритмов и программ генерирования однолинейных схем РУ ПС из их топологических моделей в атрибутивных БД, разработка библиотеки графических конструкционных элементов для компоновки схем присоединений к СШ для основных типов РУ.

Принятый подход к разработке программных средств моделирования РУ предусматривает формирование топологических моделей схем реальных ПС на основе предварительно созданных моделей эталонных схем для трансформаторных и линейных присоединений к СШ с входящей в них коммутационной аппаратурой для основных типов РУ. К трансформаторным присоединениям отнесены присоединения обмоток (авто)трансформаторов – силовых, собственных нужд (ТСН), напряжения (ТН), шунтирующих реакторов, к линейным – высоковольтных линий (ВЛ) и фидеров.

Топологические модели однолинейных схем РУ ПС хранятся в атрибутивных БД ИнГИС. Они организованы в соответствии с *концептуальным* и *объектно-ориентированным* подходом, почти полностью совпадающим с принципами стандарта Международного электротехнического комитета (МЭК) 61970-301 Общей Информационной Модели (CIM). В БД ИнГИС, как и в CIM, отображается в полном объеме состав классов объектов, атрибутов и отношений реальных энергосистем.

На подготовительном этапе разработки проведена типизация однолинейных схем РУ ПС и проектирование информационных и топологических моделей основных видов присоединений в типовых схемах РУ ПС.

В соответствии с классификацией однолинейных схем РУ ПС [2] разработаны модели их основных типов – кольцевых, радиальных, мостиковых и блочных. Типы схем условно обозначены символами. Так, например, кольцевые РУ с двумя выключателями на одно присоединение идентифицируются как К-1, с тремя – К-3, на два присоединения – К-2.

Проведена экспертная идентификация типов РУ для всех подстанций 330 кВ и выше Федеральной сетевой компании (ФСК) с определением их кодовых формул, записанных в соответствующем поле ТКО РУ в БД ИнГИС.

Для типовых схем РУ ПС разработаны информационные модели и на основе созданных в них классов объектов – модели связности (топологические) между объектами основных видов присоединений – трансформаторных и сетевых.

В ИнГИС, как и в CIM, понятийное содержание предметных областей проектируемых систем представляется информационными моделями «сущность – связь» в виде диаграмм классов объектов (ДКО), отображаемых в базах данных. Сущности включают все классы объектов энергосистем, необходимые для моделирования процессов в этой области. Установленные между ними семантические связи отображают отношения между ними в реальных энергосистемах. При формировании моделей однолинейных схем РУ в БД ИнГИС используются созданные в них таблицы классов (сущностей) объектов схемных элементов РУ.

Силовые (авто)трансформаторы и трансформаторы собственных нужд входят в одну и ту же таблицу классов – ТКО Трансформаторы.

В составе общей информационной модели энергосистемы ИнГИС создана эталонная модель схемы РУ ПС с семантическими идентификаторами по заданным синтаксическим макетам для каждого вида схемных объектов («модельные» обозначения). На применяемых в сетевых компаниях схемах РУ для обозначения каждого их объекта используется его диспетчерское наименование или принятая для данной ПС аббревиатура (схемное обозначение). Для семантических идентификаторов, диспетчерских и схемных наименований подстанционных объектов в их ТКО выделены специальные поля.

Ниже показан фрагмент представления информационной модели РУ ПС в нотации «сущность – связь», альтернативной диаграммам классов объектов (ДКО), см. рис. 1.

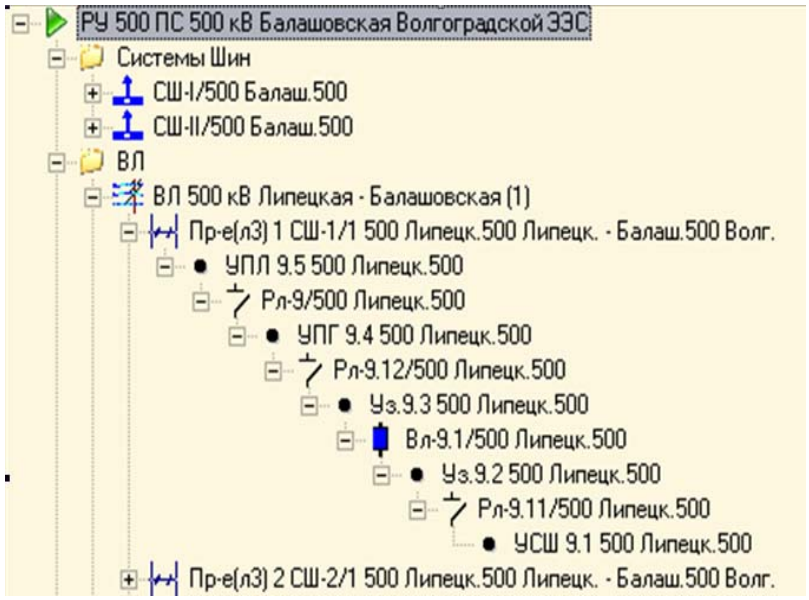


Рис. 1

Для каждого вида присоединений к СШ типовых РУ в БД ИнГИС созданы эталонные топологические модели. В них определен состав коммутационных объектов, участков и узлов присоединений и последовательность их соединений в соответствии с коммутацией электрических цепей разных видов присоединений и типов схем РУ.

Узлы присоединений эталонной топологической подмодели РУ и каждого РУ моделируемых реальных ПС сетевых компаний записываются в таблицу класса (ТКО) «Соединительные узлы (ConnectionNode)», созданную в информационной модели.

Узлы связывают выводы смежных сетевых объектов. Так, например, последовательность объектов электрических цепей присоединения ВЛ к СШ-I в схеме РУ типа «К-1» в топологической модели записывается в строчной форме:

[СШ-I]в – Уз.ш11 – в1**(Рш1)**в2 – Уз12 – в1**[В1]**в2 –Уз13 – в1**[Рл1]**в2 – Уз13 –
– в1**[*Уч.13*]**в2 – **Уз.п*** – в1**[*Уч.14*]**в2 – Уз.7 – в1**[Рл3]**в2 – в1**[ВЛ]**,

где ВЛ – объект присоединения; СШ-I, СШ-II – системы шин; В1, В2– выключатели; Рш1, Рш2, Рл1, Рл2, Рл3 – шинные и линейные разъединители; Уз.ш11-Уз16, Уз.ш21-Уз26 – соединительные узлы 2-х смежных сетевых элементов, Уз.п*7 – 3-х сетевых элементов присоединения; № в1 и в2 – внешние выводы сетевых элементов (двухполюсников).

Алгоритмы и программы моделирования схем РУ ПС

Программа формирования информационных моделей схем РУ моделирования РУ ПС создает семантические идентификаторы в ТКО сетевых объектов и в БД требуемые связи между классами.

Модели схем РУ реальных ПС созданы на основе алгоритмов и программ для каждой моделируемой ПС с автоматическим добавлением к идентификаторам схемных объектов ее сокращенного наименования в качестве ключевого слова.

Алгоритм формирования в БД таблицы соединений (конфигурации ПС) включает процедуры:

– формирования идентификаторов выводов объектов и участков присоединений добавлением в1 и в2;

– записи узла присоединения к СШ и идентификаторов вторых от СШ выводов объектов и участков в колонку 1 и первых – в колонку 2;

– формирования идентификаторов узлов с их порядковыми номерами в присоединении к СШ.

Идентификаторы объектов генерируются по заранее определенным правилам (макетам), соответствующим выбранному виду схемы РУ и типу присоединения. Для случая несоответствия реальной схемы РУ ее прототипу интерактивная ветвь управляющей программы моделирования получает от оператора необходимые параметры формируемой схемы РУ.

Алгоритм генерирования графических отображений визуализации схем РУ ПС из сформированных для них в атрибутивных базах данных (БД) топологических моделей определяет логику конструирования изображения схем последовательным выводом из созданной графической библиотеки условных обозначений энергооборудования и коммутационной аппаратуры, систем шин (СШ) и их схемных токоведущих элементов (участков присоединений к СШ РУ ВЛ и обмоток трансформаторов, соединительных узлов и терминалов (схем РУ). При этом каждый из них автоматически «привязывается» к экземплярам соответствующих таблиц классов БД, созданной топологической модели реальной схемы РУ.

Предусмотренные процедуры вывода на графическую схему усеченных (без имени АС) идентификаторов схемных объектов модели обеспечивают в интерактивном режиме вывод на схемы характеристик отображаемых объектов.

Для формирования из атрибутивных БД и хранения визуального представления модели схем РУ ПС выбран формат графического файла международного стандарта SVG (Scalable Vector Graphic). Он удовлетворяет требованиям

широкого использования в сетевых компаниях РАО ЕЭС: открытости для описания структуры файла, векторного способа обработки данных, унификации хранения любого объекта схемы, применения библиотеки графических обозначений объектов, возможности использования в WEB-приложениях, поддержки анимации объектов и применения HTML скриптов.

Хранение графического объекта схемы и его представления в атрибутивной БД позволяет применить для них единую классификацию, принятую для информационной модели энергосистемы. При этом автоматически устанавливается связь между графическим изображением объекта на схемах с его характеристиками в модели.

В формате SVG создана библиотека графических условных изображений объектов, используемых в качестве конструкционных элементов для компоновки под управлением программы схем присоединений к СШ в основных типах РУ.

Программно-информационный комплекс реализован как АРМ системы моделирования основных видов присоединений типовых однолинейных схем распределительных устройств подстанций с их коммутационным и измерительным оборудованием.

Моделирование схем РУ ПС в атрибутивных БД и формирование из моделей их графических отображений реализуются интерактивными программами с участием разработчика моделей и электронных схем на основе исходных утвержденных оперативных однолинейных схем ПС, предоставленных сетевыми компаниями.

Технология моделирования предусматривает поэтапное выполнение работ по созданию наборов систем шин РУ, межсистемных соединений обходных, секционных и шиносоединительных выключателей; основной коммутационной аппаратуры РУ (создание присоединений объектов РУ: ВЛ, фидеров, обмоток (авто)трансформаторов, реакторов); измерительного оборудования РУ (создание и установка ТТ, ТН).

На этапе создания набора систем шин РУ конструктор задает количество СШ в РУ. Программа автоматически создает в ТКО СШ записи для каждой секции СШ с одновременной генерацией их уникальных идентификаторов по разработанному синтаксическому макету и устанавливает связи с таблицами классов РУ и присоединений.

При формировании коммутационной аппаратуры для межсистемных соединений разработчик указывает СШ, между которыми планируется установить соединение, и выбирает предварительно сформированную в БД эталонную типовую схему соединения шин: между другой системой, секцией или обходной системой шин (ОСШ). В автоматическом режиме создаются соответствующие выбранному типу соединений выключатели (шиносоединительные, секционные, обходные) с формированием уникального идентификатора каждого объекта и установкой связи таблицы класса выключателей с ТКО СШ. В поле состояния

выключателей проставляется флаг их нормально-замкнутого состояния. В функции программы входит также формирование выводов для коммутационных аппаратов и соединительных узлов между ними, присоединений к СШ и выводами в соответствии с топологической моделью.

На этапе формирования основной коммутационной аппаратуры трансформаторных и линейных присоединений РУ разработчик модели выбирает в окне интерфейса программы требуемый для моделируемого присоединения шаблон схемы с предварительно сформированными топологическими элементами присоединения объекта типовой РУ к СШ и задает номер группы коммутационной аппаратуры (ГКА).

Все необходимые остальные процедуры для записи выключателей и разъединителей в соответствующие таблицы с формированием идентификаторов, установкой связей программа выполняет автоматически, в том числе и добавление ключевого имени ПС к каждому эталонному идентификатору.

Технология изготовления однолинейных схем РУ ПС из сформированных в табличном пространстве атрибутивных БД их топологических моделей включает этапы:

1. Программное автоматическое генерирование их первичных схем с полным составом схемных объектов и частичными отклонениями их конфигурации от общепринятых форм представления.

2. Устранение и приведение первичных схем к стандартному или принятому в сетевых компаниях виду.

3. Интерактивное установление соответствия выводимых программой в автоматическом генерировании «модельных» наименований схемных объектов с их обозначениями на исходных схемах сетевых компаний.

При интерактивном формировании графических отображений схем РУ ПС на них выводятся принятые в модели наименования энергооборудования, СШ, выключателей и разъединителей в виде усеченных идентификаторов, созданных в их ТКО, без ключевых сокращенных имен ПС, например, В11/ 220 вместо В11/ 220 Балаш.500.

Этап ручной доработки первичных программно сгенерированных схем включает интерактивные работы по установлению соответствия «модельных» и схемных наименований в исходных материалах. Программа записывает схемные наименования в отведенные для них поля каждой ТКО БД.

На первом этапе автоматического генерирования первичной схемы РУ разработчик выбирает требуемую подстанцию ФСК и ее РУ из их поискового дерева в окнах интерфейса ИнГИС и запускает программу. Она компонует схему из библиотеки графических обозначений объектов однолинейных схем по сценарию, заданному топологической моделью.

Большей частью после генерирования первичная однолинейная схема РУ не полностью соответствует общепринятой форме ее представления.

Второй этап доработки схемы требует приведения её к виду, идентичному исходной схеме, с помощью ряда настроек (позиционирование СШ, изменение направленности ВЛ и т.д.).

Нормализация сгенерированной схемы на втором этапе предусматривает графическую корректировку.

На основе разработанных методов и программных средств в атрибутивных БД ИнГИС сформированы модели схем распределительных устройств 110 кВ и выше всех 144 подстанций 330 кВ и выше ОАО «ФСК ЕЭС РФ» ПС и в графических файлах формата SVG – их электронные однолинейные схемы. Для каждого предприятия всех филиалов ФСК подготовлены альбомы их распечаток.

Электронные схемы РУ ПС с их базами данных могут использоваться в качестве оперативных схем ОИК АСДУ и АИИС КУЭ для вывода на них характеристик всех их схемных объектов, сформированных в БД состояния коммутационной аппаратуры РУ, текущих значений телеизмерений в реальном масштабе времени, минутных, получасовых, суточных значений показаний счетчиков.

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. *Копсяев А.П.*, *Синютин П.А.*, *Кисляков Ю.В.* Визуализация потоков электроэнергии на многоуровневых структурных схемах электрических сетей ФОРЭМ ЕЭС РФ для их коммерческого диспетчирования в центрах обработки АСКУЭ / Энергосистема: управление, качество, безопасность: Сб. тр. – Екатеринбург: УГТУ-УПИ, 2001. – С. 452-456.

2. *А.В. Шунтов* и др. Коммутационные узлы энергосистем. – М: Энергоатомиздат, 1997.

ПОДХОД К РАЗРАБОТКЕ СХЕМ СЕЧЕНИЙ МЕЖДУ ПОДСТАНЦИЯМИ, СТАНЦИЯМИ, СЕТЯМИ И ПОТРЕБИТЕЛЯМИ СУБЪЕКТОВ ОРЭ ДЛЯ ЦЕНТРОВ ОБРАБОТКИ ДАННЫХ АИИС КУЭ

Ю.В. Кисляков – зам. директора по НИР «ЦОТэнерго» РАО ЕЭС
Д.В. Кольцов – зам. директора по НИР «ЦОТэнерго» РАО ЕЭС
М.А. Щербакова – инженер 2 категории кафедры ЭОП филиала «МЭИ (ТУ)» в г. Волжском

Автоматизированные информационно-измерительные системы коммерческого учета электроэнергии (АИИС КУЭ) обеспечивают управление производством, передачей и потреблением в генерирующих и сетевых компаниях электроэнергетики и системах энергоснабжения предприятий – субъектов оптового рынка (ОРЭ). Одной из основных функций коммерческого диспетчера в центрах обработки данных АИИС КУЭ является наблюдение за выполнением плана выработки и имеющимися объемами в темпе процесса управления

потреблением. Оно потребовало применения в них унифицированных форм представления сложных многоуровневых схем электрических сетей.

В разработанной Южным филиалом ЦОТэнерго, г. Воронеж, интегрированной графической информационной системе (ИнГИС Энерго) создан графический комплекс, предназначенный для графической поддержки функций АИИС КУЭ с интегрированными пакетами электронных схем для электрических сетей 110 кВ и выше всех энергосистем ЕЭС РФ на основе общих генерализированных структур энергосистем с единичными блоками станций, сетей и потребителей субъектов ОРЭ и единичными межблочными связями (сечениями).

Головная схема охватывает в целом всю структуру станций и сетей субъектов ОРЭ энергосистемы со всеми сечениями.

Унификация достигается единым для головных схем любых энергосистем расположением блоков по ярусам (уровням схемы) и спрямленными единичными эквивалентными связями с кратчайшим расстоянием между блоками. За условные обозначения блоков всех типов приняты прямоугольники примерно одинакового размера. Структуры электрических сетей энергосистем в унифицированном формате (БГЕСЭ) отличаются только составом основных блоков ОРЭ.

На рис. 1 представлены: общая структура энергосистемы с полным составом блоков ОРЭ и структура Волгоградской ЭЭС с ее станциями ОГК и РГК и сетями компаний ФСК, МСК, РСК и потребителей.

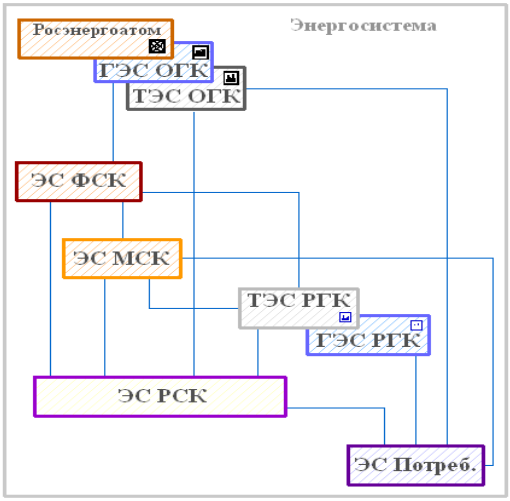
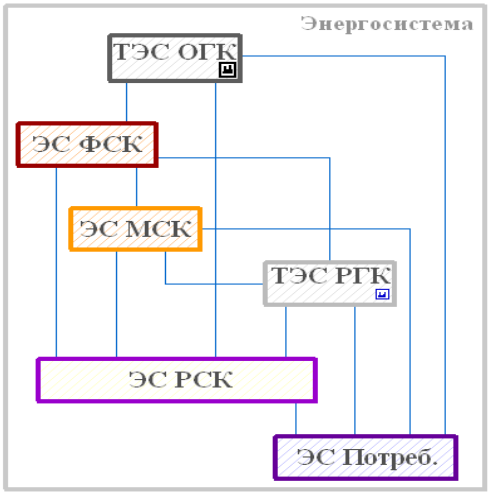
Общая структура ЭЭС с полным составом блоков	**Структура Волгоградской ЭЭС**
	

Рис. 1

Состав всех входящих в сечения ЛЭП, точек учета и зон поставки, величин и направлений потоков электроэнергии в электрических сетях представляется на блочных схемах всех ее межсистемных и внутрисистемных сечений с выделенными на границах обоих блоков подстанциями (формата БСГП).

Они развертываются из единичных межблочных сечений головной структуры интегрального пакета каждой энергосистемы ЕЭС. Блочные схемы сечений между станциями, сетями и потребителями ОРЭ в виде парных блоков (один блок к одному – 1:1) – основная форма нормализованного представления полного состава входящих в них ВЛ и ПС на границах блоков с минимумом пересечений. На них обеспечивается равномерность размещения граничных ПС на блоках сетей ОРЭ, прямолинейность и минимально возможное расстояние на схеме между граничным ПС смежных блоков сетей ОРЭ, размещения на каждой ВЛ сечения точек коммерческого учета (ТКУ), значений сальдо перетоков, а также приема и отдачи электроэнергии, диспетчерских наименований ВЛ в сечении.

Сетевые подстанции ФСК и МСК, станционные подстанции АЭС «РЭА», ГЭС «ОГК» 220 кВ и выше, как правило, образуют изолированные друг от друга узлы в составе общих сетей энергосистем. Для каждой из них формируются сечения, которые затем объединяются в общий блок.

Узловые подстанции с отходящими от них ВЛ до всех граничащих с ними подстанций сетевых или генерирующих компаний, топологически связанных между собою, копируются из структурных схем энергосистем в специально создаваемый для этого слой графического файла. После этого производится изоморфное преобразование топологизированной схемы. Узловая ПС перемещается средствами графического редактора в верхний блок сечения, граничащие с ней подстанции – на уровень нижнего блока.

На примере, рис. 2, показано такое преобразование исходной схемы узла ПС 220 кВ Таловка Волгоградской межсетевой компании (МСК). Подстанции 110 кВ относятся к региональной компании (РСК).

Структурная схема **Блочная схема сечения узла**

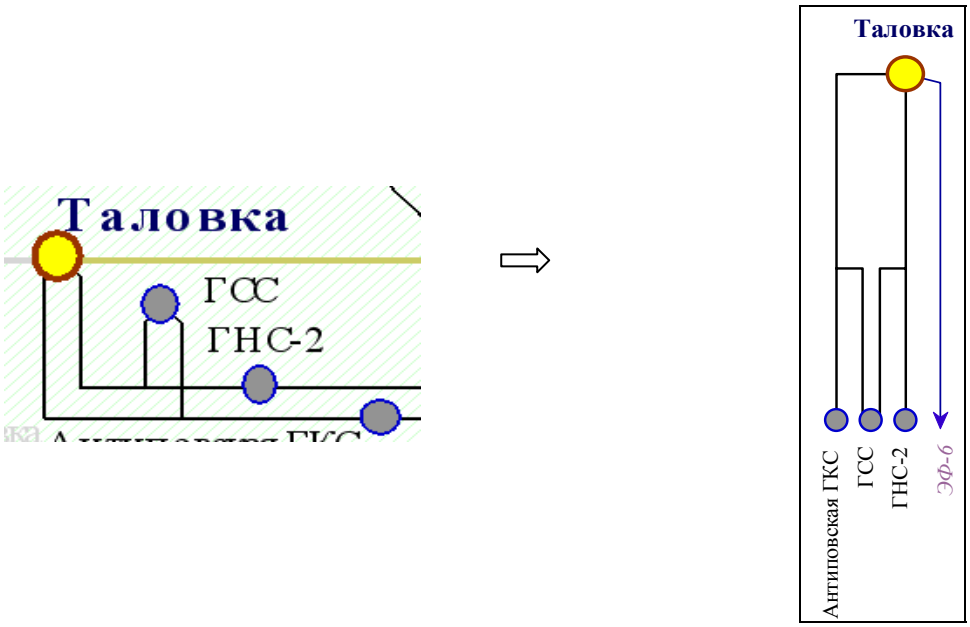


Рис. 2

Такой подход позволяет повысить степень упорядочения сечений, приводящую к улучшению алгоритма поиска требуемых экземпляров в таблице класса сечений для всех энергосистем ЕЭС РФ, созданного в БД ИнГИС.

Полный состав поузловых сечений рассмотрен на примере одной из подстанций 500 кВ «Волго-Донского предприятия МЭС – Центра «ФСК ЕЭС» и электрическими станциями (АЭС, ГЭС, ТЭС) и сетями (ЭС) других субъектов ОРЭ Волгоградской энергосистемы. Узел ПС-500 Трубная выделен из структурной схемы энергосистемы, созданной в ее графическом комплексе ИнГИС (рис. 3).

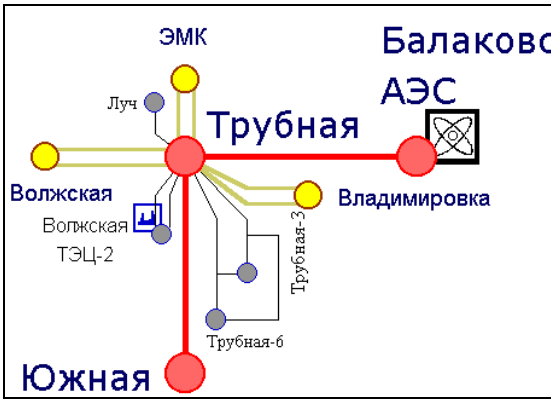


Рис. 3

Разработаны программы формирования состава ЛЭП в бинарных сечениях всех видов.

Межсистемные:

ОЭС Центра – ОЭС Волги

Сеч.1 [Трубная-500 – Балаковской АЭС «РЭА»]

Волгоградская ЭЭС – Астраханская ЭЭС

Сеч.2 [Трубная – ЭС «АстраханМСК»]

Внутрисистемные:

Сеч.3 [Трубная-500 – ЭС «Волгоградской МСК»]

Сеч.4 [Трубная-500 – ТЭС «Волгоградской РГК»]

Сеч.5 [Трубная-500 – ЭС «Волгоградской РСК»]

Сеч.6 [Трубная «ФСК» – ЭС ОАО «Трубный завод»]

Состав ВЛ в сечениях между РУ ПС 500 кВ Трубная «ФСК» и каждой граничной подстанцией электрических станций и сетей других субъектов ОРЭ Волгоградской и смежных энергосистем формируется программой в таблицу.

Высоковольтные линии электропередач сечений являются объектами измерений автоматизированной информационно-измерительной системы (АИИС) Волго-Донского предприятия МЭС – Центра «ФСК ЕЭС». На них по договору о границах раздела между электрическими сетями субъектов ОРЭ определяются точки коммерческого учета (ТКУ).

Средства измерения коммерческих перетоков электроэнергии представлены техническими средствами информационно-измерительного комплекса (ИИК)

точек коммерческого учета (ТКУ) на стороне РУ ПС-500 всех ВЛ для всех сечений подстанции.

Таблица

Состав сечений и входящих в них ВЛ	Граничная ПС
Сеч.-{110;220}_[Эл.сети Волго-Донского ПМЭС – Эл.сети Астраханской МСК]	
Владимировка – Трубная (1)	**Владим. 220**
Владимировка – Трубная (2)	**Владим. 220**
Сеч.-{220}_[Эл.сети Волгоградской МСК – Эл.сети Волго-Донского ПМЭС]	
Волжская – Трубная (1)	**Волжск. 220**
Волжская – Трубная (2)	**Волжск. 220**
Сеч.-{110;220}_[Эл.сети Волгоградской РСК – Эл.сети Волго-Донского ПМЭС]	
Трубная – ЭМК (1)	**ЭМК 220**
Трубная – ЭМК (2)	**ЭМК 220**
Трубная – Луч	**Луч 110**
ГПП-6(Трубная 6) – Трубная (1)	**ГПП-6(Тр. 6)110**
Отп.\А на ГПП-3(Трубная 3) ВЛ ГПП-6(Трубная 6) – Трубная (1)	**ГПП-3(Тр. 3)110**
Трубная – ГПП-6(Трубная 6) (2)	**ГПП-6(Тр. 6)110**
Отп.\А на ГПП-3(Трубная 3) ВЛ Трубная – ГПП-6(Трубная 6) (2)	**ГПП-3(Тр. 3)110**
Сеч.-{110}_[Эл.сети Волго-Донского ПМЭС – Эл.сети Волгоградской РГК]	
ВТЭЦ-2 – Трубная (1)	**ВТЭЦ-2 110**
Трубная – ВТЭЦ-2 (2)	**ВТЭЦ-2 110**

Разработанная технология поузлового формирования бинарных сечений применена при создании их электронных схем для всех 77 энергосистем ЕЭС РФ в проектах НП «АТС» и ОАО «ФСК».

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. *А.П. Копсяев*, *Ю.В. Кисляков*. Единая схема электрических сетей ЕЭС РФ и базы данных ее объектов на основе интегрированной графической информационной системы (ИнГИС Энерго). – Вести в электроэнергетике, 2003. – № 1. – С. 11-17.

ПРОБЛЕМЫ ВНЕДРЕНИЯ ПРЕОБРАЗОВАТЕЛЕЙ ЧАСТОТЫ ДЛЯ ЭЛЕКТРОПРИВОДА НАСОСОВ В ЖИЛИЩНО-КОММУНАЛЬНОМ ХОЗЯЙСТВЕ НА ПРИМЕРЕ МУП «ВОДОКАНАЛ»

П.Д. Васильев – канд. техн. наук, доцент
филиала «МЭИ (ТУ)» в г. Волжском
Ю.А. Ветлицын – инженер электротехнической лаборатории
МУП «Водоканал» г. Волжского

ВВЕДЕНИЕ

Проблема модернизации изношенного оборудования и внедрения современных технологий, позволяющих экономить природные и энергетические ресурсы, выходит на первый план во многих отраслях промышленности.

Объекты ЖКХ, построенные при «развитом социализме» и эксплуатирующиеся на протяжении десятилетий персоналом невысокой квалификации, с трудом выходят на показатели экономической эффективности и качества услуг, соответствующие проектам 50-70-х годов XX века.

Одним из направлений совершенствования технологических процессов на предприятиях водопроводно-канализационного хозяйства стало внедрение преобразователей частоты (ПЧ) для электропривода.

ТЕХНИЧЕСКИЕ АСПЕКТЫ КОНСТРУКЦИИ ПРЕОБРАЗОВАТЕЛЕЙ ЧАСТОТЫ

ПЧ на объектах водопроводно-канализационного хозяйства находят применение в качестве силовых регуляторов частоты и напряжения, подводимого к статорной обмотке асинхронного электродвигателя привода насоса. ПЧ обеспечивает регулирование частоты вращения рабочего колеса насоса. В режиме холостого хода частота вращения

$$n \cong 60 \cdot f / p, \qquad (1)$$

где f – частота выходного напряжения ПЧ; p – число пар полюсов статорной обмотки электродвигателя.

Квадрат величины выходного напряжения при установившемся значении частоты определяет величину электромагнитного момента электродвигателя:

$$M = 3U^2 p\, r_2 / (2\pi f s\, [(r_1 + r_2/s)^2 + (x_1 + x_2)^2]), \qquad (2)$$

где U – выходное фазное напряжение; s – скольжение; r_1, r_2 – активные сопротивления обмоток статора и ротора; x_1, x_2 – индуктивные сопротивления обмоток статора и ротора.

Снижение напряжения подводимого к статорной обмотке электродвигателя производится из-за необходимости ограничить ток и нагрев электродвигателя.

Типичная механическая характеристика центробежного насоса описывается уравнением квадратичной параболы, поэтому электродвигатель может обеспечить момент, необходимый для вращения рабочего колеса насоса.

Большинство используемых ПЧ построено по принципу двухзвенного преобразования с транзисторным автономным инвертором напряжения.

Функциональная схема ПЧ (рис. 1) содержит следующие блоки:

1. Входной полууправляемый диодно-тиристорный выпрямитель, выполненный по трёхфазной мостовой схеме.

2. Контур постоянного тока выполнен на конденсаторах и дросселях с немагнитным зазором в разрезном сердечнике. Дроссели уменьшают пульсации напряжения, конденсатор создаёт запас реактивной энергии.

3. Автономный инвертор напряжения преобразует постоянное напряжение в переменное заданной частоты. В ПЧ автономные инверторы напряжения выполняются сейчас только на IGBT модулях. Основу IGBT модуля

составляет биполярный транзистор с изолированным затвором, имеющий малые токи управления (от полевого транзистора) и большую допустимую мощность перехода коллектор-эмиттер (от биполярного транзистора).

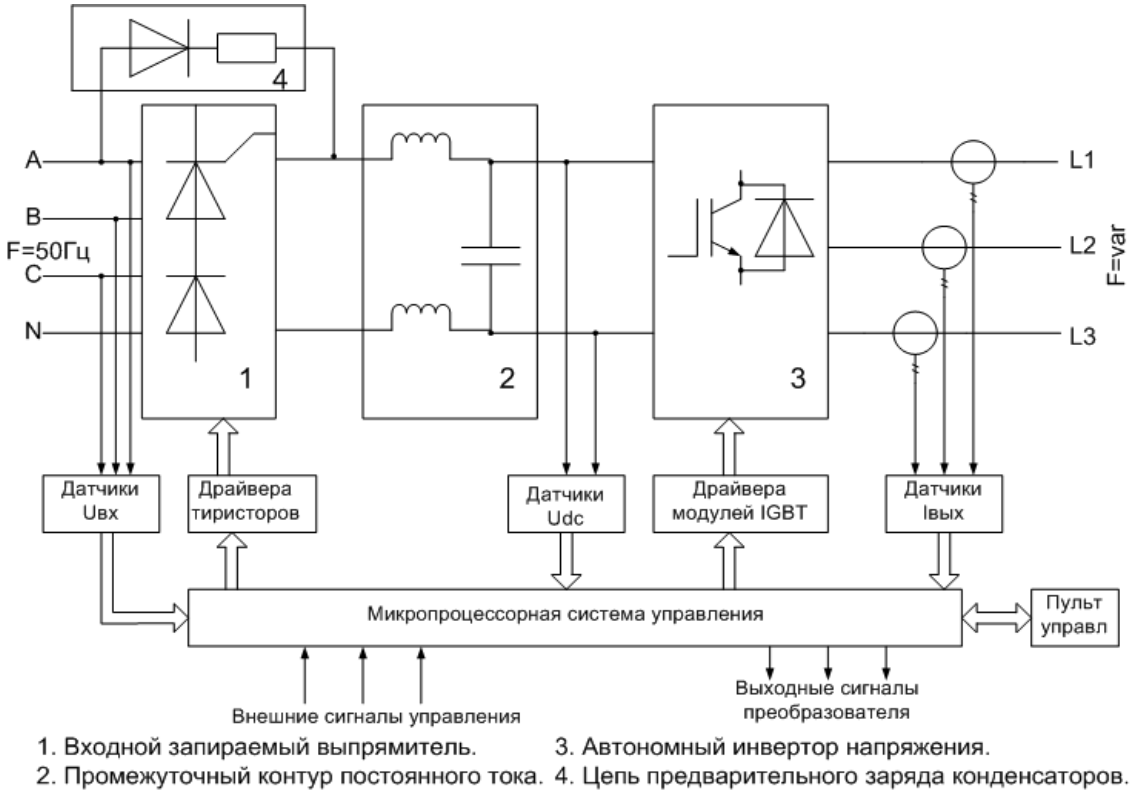


Рис. 1. Функциональная схема преобразователя частоты

4. Цепь предварительного заряда состоит из тиристорного ключа и токоограничивающих резисторов, используется для заряда емкости перед началом работы. По достижении заданного значения напряжения зарядная цепь отключается, дальнейшее увеличение напряжения контура постоянного тока происходит путем увеличения угла открытия тиристоров.

5. Драйвера IGBT модулей преобразуют сигналы системы управления в сигналы требуемой формы и амплитуды напряжения для формирования оптимальной траектории отпирания-запирания силовых ключей.

6. Драйвера тиристоров преобразуют сигналы системы управления в сигналы открытия тиристоров.

7. В ПЧ имеются датчики трех фаз входного напряжения, датчики напряжения контура постоянного тока и датчики трех фаз выходного тока. В качестве датчиков выходного тока применены модули фирмы LEM (Швейцария), работающие с компенсацией магнитного потока при помощи элемента Холла.

8. Система управления обеспечивает согласованную работу всех модулей, вычисляет моменты отпирания-запирания ключей инвертора, отслеживает сигналы датчиков напряжения и тока, анализирует состояние внешних линий.

9. Пульт управления реализует пользовательский интерфейс.

ТРУДНОСТИ ВНЕДРЕНИЯ НОВОГО ОБОРУДОВАНИЯ

Проблемы внедрения нового оборудования рассмотрим на примере установки ПЧ на насосной станции 4-го подъема водопроводных сооружений МУП «Водоканал» городского округа города Волжского.

Для управления асинхронным высоковольтным двигателем А355Х-4у3 привода насоса Д1250/65 применили ПЧ типа ПЧВН-ТТПТ-75-6000-50-М-У1 производства ЗАО «Электротекс», г. Орел.

Первой трудностью внедрения явилась попытка охватить большую часть действующего оборудования применением одного нового элемента. Для этого была реализована схема технического решения, представленная на рис. 2.

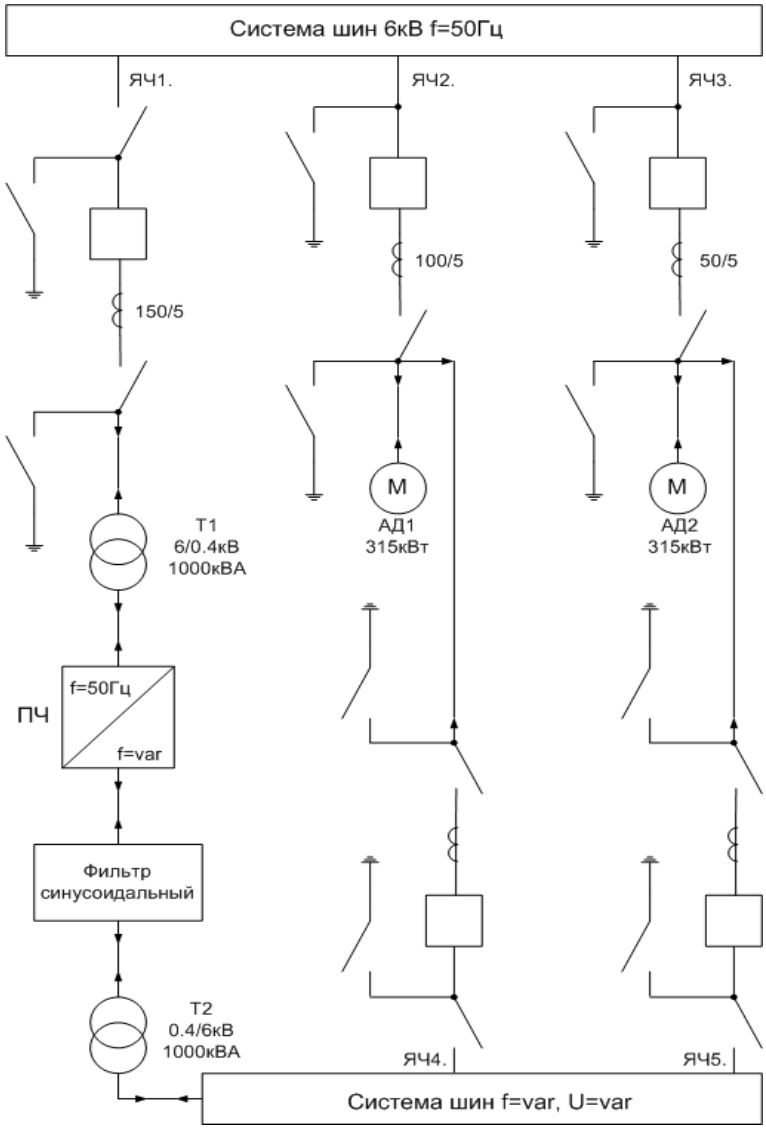


Рис. 2. Схема первичных соединений установки

В схеме участвуют:

– непосредственно ПЧ, обеспечивающий частотное регулирование;

– высоковольтные ячейки, обеспечивающие коммутацию оборудования;

– понижающий трансформатор, обеспечивающий напряжение, необходимое ПЧ;

– повышающий трансформатор, обеспечивающий выходное напряжение, соответствующее применяемому электродвигателю;

– фильтр синусоидальный, предназначенный для приближения формы выходного напряжения ПЧ к синусоидальной.

Несомненными преимуществами описанной схемы являются:

1. Возможность регулирования частоты вращения двух приводов одновременно.

2. Возможность работы одного электропривода от ПЧ, второго – от сети 50 Гц.

К недостаткам схемы следует отнести:

1. Усложнение схемы электрической сети, приводящее к ошибкам персонала.

2. Огромные капиталовложения, не приводящие к замене оборудования и кабельных линий, находящихся в эксплуатации более 20 лет.

В период настройки ПЧ имел место случай включения электродвигателя ячейки 3 при установленных заземляющих ножах ячейки 5 (рис. 2).

Второй проблемой внедрения новой техники оказалось низкое качество, а порой и полное отсутствие проекта. Недостатки заказанного проекта:

– не содержит кабельных трасс;

– расчет релейных защит не удовлетворяет требованиям селективности;

– не имеет постоянных площадок для обслуживания преобразователя.

Третьей серьёзной трудностью оказалось низкое качество электромонтажных работ, особенно в части монтажа кабельной продукции.

ЗАКЛЮЧЕНИЕ

Внедрение современного оборудования происходит с большими трудностями, нарушениями или отступлениями от действующих нормативно-технических документов.

Новые технологии подтверждают свои преимущества:

– удобство эксплуатации и улучшение качества услуг;

– уменьшение износа технологического оборудования;

– уменьшение потребления энергоресурсов.

Полученные на 4-ом подъёме преимущества:

– снижение износа запорной арматуры;

– уменьшение аварий на трубопроводах;

– облегчение труда машинистов насосной станции;

– снижение энергопотребления.

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. *Кудрявцев А.В.*, *Ладыгин А.Н.* Современные преобразователи частоты в электроприводе. – М.: Сборник МЭИ, 1998. – 27 с.

2. *Абрамов Б.И.*, *Иванов Г.М.* Опыт АООТ «Электропривод» по применению частотно-регулируемых электроприводов. – М.: Сборник МЭИ, 1998. – 8 с.

3. *Пиотровский Л.М.* Электрические машины. – М.-Л.: Госэнергоиздат, 1963. – 504 с.

4. Преобразователь частоты высоковольтный с низковольтным звеном преобразования ПЧВН-ТТПТ-75-6000-50-М-У1. Руководство по эксплуатации. ЗАО «Электротекс». – 83 с.

ДОБРОВОЛЬНАЯ СЕРТИФИКАЦИЯ СПЕЦИАЛИСТОВ В ОБЛАСТИ ЭНЕРГОСБЕРЕЖЕНИЯ

Н.В. Арванитаки – ст. преподаватель кафедры ЭОП филиала «МЭИ (ТУ)» в г. Волжском

П.Д. Васильев – канд. техн. наук, доцент, зав. кафедрой ЭОП, филиала «МЭИ (ТУ)» в г. Волжском

И.Л. Васильева – зав. лаб. информатики кафедры ЭОП филиала «МЭИ (ТУ)» в г. Волжском

В настоящее время в энергетике ощущается нехватка высококвалифицированного руководящего персонала всех уровней. Насколько важен кадровый фактор? Однозначно на этот вопрос невозможно ответить. По мнению авторов одним из эффективных мероприятий может стать добровольная сертификация специалистов в области электроснабжения с выдачей документов государственного образца.

На практике сертификат в области электроснабжения (СОЭ) должен показывать, что владелец сертификата прошел ряд теоретических тестов, оценивающих его знание основных понятий применения энергосберегающих технологий с оценкой экономической эффективности и перспективности внедрения в заданных условиях. Сертификат должен выдаваться не в рамках образовательной системы, которая в настоящее время является монополистом при выдаче документов государственного образца.

Необходимость в сертификации продиктована следующими причинами:

– в настоящее время общеизвестным фактом является снижение качества подготовки школьников и, как следствие, снижается качество подготовки молодых специалистов, в том числе в области электроэнергетики, и это очевидно для производственников;

– труднодоступность системы повышения квалификации для большинства специалистов нижнего и среднего уровня, особенно для тех, кто занят в бюджетной сфере, так как денежных средств для этого выделяется слишком мало.

Для решения одной из таких проблем мы предлагаем следующую модель сертификации специалистов (персонала): оценка навыков, знаний и умений кандидата производится в несколько этапов, с использованием независимых модулей на основе компьютерной тестовой системы. При выдаче данные кандидата могут включать в автоматизированный банк данных, доступный работодателю в области электроэнергетики на территории России.

Модель 1

Базовые знания в области электротехники

Кандидат должен продемонстрировать понимание основных физических явлений и законов электричества. Он должен составлять и читать простые электрические схемы, часто применяемые на практике, и рассчитывать основные их параметры.

Модель 2

Базовые знания основных вопросов электроснабжения до 1 кВ

Кандидат должен знать конструкцию и назначение цеховых электрических сетей, основного и вспомогательного электротехнического оборудования напряжением до 1 кВ; хорошо ориентироваться в вопросах электроснабжения – в частности, должен уметь составлять графики электрических нагрузок, разбираться в вопросах компенсации реактивной мощности и способах ее регулирования. Должен знать категории надежности электроснабжения и возможности резервировании. Должен владеть практическими навыками монтажа и ремонта электротехнического оборудования напряжением до 1 кВ.

Модель 3

Знания основ электробезопасности и техники безопасности в установках напряжением до 1 кВ

Кандидат должен продемонстрировать свою компетентность в вопросах электробезопасности при эксплуатации электроустановок, согласно отраслевым Правилам технической эксплуатации и электробезопасности электроустановок (ПТЭ и ТБ) и Правилам эксплуатации электроустановок (ПУЭ). Иметь практические навыки оказания первой медицинской помощи при поражении электрическим током. Должен уметь выполнять основные действия по обеспечению безопасной работы с электроустановками напряжением до 1 кВ, согласно отраслевым ПТЭ и ТБ, ПУЭ.

Модель 4

Знание и понимание энергосберегающих технологий

Кандидат должен продемонстрировать понимание основных энергосберегающих мероприятий, технических решений и технологий, должен продемонстрировать умение использовать основные методики сберегающих технологий (составление тепловых и электрических балансов). Должен знать периодическую работу систем вентиляции и кондиционирования, применение периодического режима отопления.

Исходя из специфики работ, модели могут быть расширены.

Получение предлагаемого добровольного сертификата в области электроэнергетики позволит кандидату при поиске работы иметь неоспоримый приоритет. Он может сразу продемонстрировать свою компетентность не только в вопросах эксплуатации электрических сетей напряжением до 1 кВ, но и в вопросах энергосбережения. Полученный сертификат позволит специалисту чувствовать себя уверено в современных условиях рынка труда.

АНАЛИЗ ПРИЧИН ВОЗНИКНОВЕНИЯ ВЫСШИХ ГАРМОНИК В ЭЛЕКТРОУСТАНОВКАХ СЕТЕЙ ОБЩЕГО НАЗНАЧЕНИЯ И ИХ ВЛИЯНИЕ НА КАЧЕСТВО ЭЛЕКТРОЭНЕРГИИ

В.В. Сикидин
ООО «Нефтьгазсервис»

ВВЕДЕНИЕ

В последнее время значительные изменения претерпевает структурный состав потребителей электроэнергии на напряжении 0,4 кВ. Это обусловлено использованием нового, более совершенного электрооборудования. Как правило, активная мощность современных электроприёмников невысока. При этом они в значительной степени являются нелинейными потребителями. В случаях, когда мощность такой нагрузки не превышает 10-15 %, каких-либо особенностей в эксплуатации системы электроснабжения не возникает. У потребителей, имеющих долю нелинейной нагрузки 25 % и выше, следует ожидать появления различных проблем в эксплуатации за счет наличия высших, по отношению к промышленной частоте, гармоник.

В данной статье рассмотрены причины возникновения высших гармоник и последствия их негативного воздействия, которые проявляются в сетях электроснабжения 0,4 кВ.

Физические основы процесса возникновения гармоник

Периодический ток или напряжение питающей электрической сети представляют собой периодическую функцию, которая при соблюдении условий Дирихле может быть представлена тригонометрическим рядом Фурье:

$$f(t) = A_0 + \sum_{\nu}^{n} A_\nu \sin(\nu\,\omega t + \varphi_\nu),$$

где A_0 – постоянная составляющая; $A_\nu \sin(\nu\,\omega t + \varphi_\nu)$ – гармонические составляющие порядка $\nu = 1, 2, 3\ldots$.

Совокупность амплитуд гармоник A_ν составляет дискретный амплитудный спектр тока и напряжения питающий сети, начальные фазы которых определяются углом φ_ν.

При этом, период первой гармоники есть $T_1 = 2\pi$, второй $T_2 = 2\pi/2$, третьей $T_3 = 2\pi/3$, тридцатой $T_{30} = 2\pi/30$.

Искажения синусоиды тока и напряжения питающей сети синхронными генераторами и силовыми трансформаторами происходят уже на стадии производства и трансформации электроэнергии. Физическая сущность этого воздействия изложена в общей теории электрических машин и не оказывает заметного влияния на элементы питающей сети и электроприемники [1].

Намагничивание сердечников трансформаторов

При намагничивании сердечников трансформаторов, вследствие насыщения магнитной цепи, пропорциональность между намагничивающим током и магнитным потоком нарушается.

В насыщенном трансформаторе при синусоидальном магнитном потоке кривая тока имеет несинусоидальную форму и содержит все нечетные гармоники (ν = 1, 2, 3…). При этом, наряду с первой, или основной (ν = 1), наиболее сильной будет третья гармоника. Для стали марки Э4 и максимальной индукции 1,4 Тл третья гармоника составляет около 30 %, а пятая – около 15 % от основной.

В трехфазных трансформаторах, включенных на синусоидальное напряжение сети, потоки каждой фазы также будут синусоидальными, а намагничивающие токи будут содержать нечетные высшие гармоники. При этом, в то время как основные гармоники отдельных фаз будут сдвинуты относительно друг друга на 120°, третьи гармоники будут сдвинуты на 3·120° = 360° или 0°, пятые – на 5·120° = 600° или 240°, седьмые – на 7·120° = 840° или 120°, девятые – на 9·120° = 3·360° или 0° и т.д. Таким образом, гармоники ν = 3 и кратные им (ν = 9, 15, 21 и т.д.) в разных фазах обмотки совпадают по фазе.

При соединении одной из обмоток треугольником токи этих гармоник циркулируют внутри замкнутого треугольника. При этом магнитные потоки, ЭДС и напряжения фаз остаются синусоидальными.

При соединении обмоток звездой гармоники тока, кратные 3, существовать не могут. При их отсутствии ток близок к синусоидальному, а, следовательно, кривая потока, создаваемого обмоткой, вследствие насыщения, имеет затупленную сверху форму. Такие кривые магнитных потоков фаз, наряду с основной гармоникой, содержат еще и совпадающие по фазе сильные третьи гармоники потока. Это приводит к несинусоидальности фазных ЭДС и напряжений. В трехстержневых трансформаторах совпадающие по фазе третьи гармоники потока могут замыкаться только через масло, воздух или крепежные детали, что приводит к росту потерь от вихревых токов.

Улучшение формы кривой ЭДС в трехфазных электродвигателях

В трехфазной обмотке электродвигателя, подключенной к синусоидальному напряжению сети, потоки каждой фазы также будут синусоидальными, а намагничивающие токи будут содержать нечетные высшие гармоники. При этом, в то время как основные гармоники отдельных фаз будут сдвинуты относительно друг друга на 120°, третьи гармоники будут сдвинуты на 3·120° = 360° или 0°, пятые – на 5·120° = 600° или 240°, седьмые – на 7·120° = 840° или 120°, девятые – на 9·120° = 3·360° или 0° и т.д. Таким образом, ЭДС гармоник ν = 3 и кратных им (ν = 9, 15, 21 и т.д.) в разных фазах обмотки совпадают по фазе, и поэтому при соединении обмотки в звезду в линейных напряжениях отсутствуют. При соединении в треугольник ЭДС гармоник ν = 3 складываются, вызывают ток третьих гармоник, циркулирующий по замкнутому треугольнику, и расходуются на падения напряжения внутри обмотки. Поэтому и в данном случае линейные напряжения не содержат третьих гармоник.

Из теории машин [1] известно, что ЭДС соответствующей гармоники определяется выражением:

$$E_\nu = \pi\sqrt{2} f_\nu w k_{e\nu} k_{p\nu} k_{c\nu} \Phi_\nu ,$$

где f_ν – частота соответствующей гармоники; $k_{e\nu}$ – коэффициент укорочения шага обмотки; $k_{p\nu}$ – коэффициент распределения обмотки; $k_{c\nu}$ – коэффициент скоса пазов.

Из формулы понятно, какими путями можно добиваться уничтожения любой гармоники ЭДС.

Добиться уничтожения определенной гармоники ЭДС можно выбором шага обмотки, таким образом, чтобы ЭДС от соответствующей гармоники поля в двух активных проводниках витка совпадали по фазе и в контуре витка действовали встречно друг другу.

Также ослабления гармоник ЭДС обмотки добиваются путем ее распределения в пазах. При этом ЭДС катушек катушечной группы для ν-й гармоники сдвинуты на углы в ν раз большие, чем для основной гармоники. В результате эти ЭДС складываются под большими углами и их сумма уменьшается.

Еще одним способом ослабления высших гармоник ЭДС является скос пазов или полюсных наконечников. При этом в отдельных участках проводника за период гармоники индуктируются одинаковые по величине и обратные по направлению ЭДС.

Искажение синусоидальности кривой напряжения статическими преобразователями напряжения и тока

Несмотря на высокую энергетическую эффективность, статические преобразователи напряжения и тока являются теми потребителями, чье отрицательное воздействие на синусоидальность напряжения наиболее ощутима.

Искажения напряжения являются следствием коммутации статических преобразователей. Преобразователь во время коммутации производит подключение нагрузки к соответствующей фазе без разрыва тока, поступающего из предыдущей фазы, что приводит к периодическим междуфазным коротким замыканиям в питающей сети. Эти коммутационные короткие замыкания отличаются от аварийных КЗ только небольшой длительностью времени протекания, то есть они длятся до тех пор, пока ток выходящей из работы фазы не спадет до нуля. В кривой напряжения в процессе коммутации появляются искажения, форма, величина и количество которых зависят от схемы выпрямления, количества фаз, мощности преобразователя, параметров питающей сети, угла преобразователей. Искаженные кривые напряжения и тока питающей сети в процессе работы статического преобразователя имеют периодический характер, что позволяет проводить их гармонический анализ и выявить наличие высших гармоник напряжения.

В настоящее время самой распространенной схемой выпрямления мощных преобразователей является трехфазная мостовая схема (схема Ларионова). Эта схема позволяет также осуществить шестифазную схему выпрямления.

Соединение последовательно или параллельно двух или более выпрямительных мостов позволяет получить 12, 18, 24, 36, 48…-фазные схемы выпрямления (кратные шести). При этом порядок высших гармоник определяется формулой:

$$\nu = mk \pm 1 \quad ,$$

где m – число фаз выпрямления; k = 0, 1, 2, 3… – последовательный ряд чисел.

Для 6-ти фазной системы напряжения в кривой питающего напряжения имеются высшие гармоники следующего порядка, называемые каноническими: ν = 5, 7, 11, 13, 17, 19, 23…; для 12-ти фазной схемы ν = 11, 13, 23, 25, 35, 37…; для 24-х фазной схемы ν = 23, 25, 47, 49, 71, 73… .

Источники высших гармоник в сетях электроснабжения 0,4 кВ, причины и последствия их влияния

В настоящее время проблема высших гармоник или несинусоидальности является одной из важных частей общей проблемы электромагнитной совместимости приемников электроэнергии с питающей электрической сетью.

Данная проблема обусловлена, главным образом, наличием мощных (либо большим количеством) электроприемников с нелинейной вольт-амперной характеристикой. Источниками высших гармоник напряжения и тока являются:

– статические преобразователи напряжения и тока (конвертеры переменного и постоянного напряжения, регуляторы переменного напряжения, тиристорные ключи, инверторы и ключевые источники электропитания);

– дуговые сталеплавильные печи;

– сварочные установки;

– печи сопротивления с тиристорным регулированием;

– реакторы с тиристорным регулированием;

– электронные установки частотно-регулированного привода, мягкие пускатели и оттормаживатели;

– персональные компьютеры и другие устройства с электронными источниками питания;

– флуоресцентные лампы с электронным балластом.

При этом воздействие источника гармоник зависит от характера нагрузки сети. Индуктивность сети способствует гашению высших гармоник тока и сглаживанию формы кривой. Емкостной элемент сети способствует усилению высших гармоник тока и искажению функции времени тока. Последнее особенно неблагоприятно сказывается на работе *электронных схем* и нетрансформаторных *источников питания вычислительной техники*, имеющих, как правило, емкостной характер нагрузки. Таким образом, как источники гармоник негативно влияют на электроустановки в сети, так и наличие высших гармоник в сети может вызвать существенные сбои в работе нелинейного потребителя. Рассмотрим четыре причины указанного взаимного влияния.

1. Замыкание токов третьей гармоники через проводники кабельных линий и конструктивные элементы трансформаторов и машин переменного тока.

2. Нелинейность вольт-амперной характеристики нагрузки.

3. Проявление поверхностного эффекта и эффекта близости, при наличии высших гармоник.

4. Помеховое воздействие высокочастотных гармоник тока на работу телекоммуникационного и электрооборудования.

Указанные причины приводят к следующим негативным последствиям при работе электроустановок (рис. 1).

Рис. 1. Причины возникновения высших гармоник и последствия их проявления в сетях 0,4 кВ

1.1. ***Возможен перегрев и даже разрушение нулевых рабочих проводников кабельных линий вследствие перегрузки токами третьей гармоники***

При линейной, даже самой мощной, нагрузке ток в нулевом рабочем проводнике будет меньше, чем максимальный ток в фазных проводниках. В случае нелинейной нагрузки ток в нулевом рабочем проводнике может превышать ток в фазе более чем в 1,5 раза (предельно – в 1,73 раза, когда ширина импульса тока равна 60 электрическим градусам). Это объясняется тем, что при нелинейной и симметричной нагрузке фазные токи основной частоты и все высшие гармоники, за исключением высших гармоник порядка, кратного трем, образуют систему нулевой последовательности, то есть имеют в любой момент времени одинаковые значения и фазы. Поэтому токи третьих гармоник, замыкаясь через нулевые рабочие проводники кабельных линий, образуют ток в нейтральном проводе, который равен утроенной сумме токов высших гармоник, кратных трем. Таким образом, при несинусоидальном токе и симметричной нагрузке ток в нулевом рабочем проводнике будет равен:

$$I_0 = 3\sqrt{I_3^2 + I_9^2 + I_{15}^2 + \ldots},$$

где I_3, I_9, I_{15} – действующие значения соответствующих гармоник тока.

При этом по ПУЭ нулевые рабочие проводники сечением меньше фазных и не защищены от перегрева автоматическими выключателями либо предохранителями.

1.2. ***Ускоренное старение изоляции при повышении рабочей температуры токонесущих проводников***

Нулевые рабочие проводники защищены от перегрева только до значения тока, не превышающего значения тока в наиболее нагруженной фазе. В случае нелинейных электропотребителей токи в нулевых рабочих проводниках могут превышать фазные, не ограничиваясь при этом тепловой защитой. Это может привести к перегреву изоляции нулевых и фазных проводников и вызвать их интенсивное старение.

1.3. ***Снижение электробезопасности за счет появления опасного напряжения прикосновения на корпусах электроприемников***

При протекании сверхнормативных токов в нулевых рабочих проводниках на корпусах электроприемников, подключенных к нулевому проводу, могут возникать напряжения, оказывающие при прикосновении раздражающее влияние на человека. В системе TN-C, когда функции нулевого защитного и рабочего проводников объединены в одном проводнике, в случае использования протяженных линий малого сечения, на корпусах электроприемников может возникать опасное (до 50 В) напряжение прикосновения.

2.1. ***Искажение синусоидальности питающего напряжения***

Следствием характера тока, потребляемого импульсной нагрузкой, является деформация синусоиды напряжения. При работе импульсной нагрузки

в момент импульса тока увеличивается падение напряжения на внутреннем сопротивлении сети:

$$U_{нагрузки}(t) = U_{сети}(t) - i(t) \cdot Z_{сети},$$

где $U_{нагрузки}(t)$ – деформированная синусоида напряжения на зажимах нагрузки; $U_{сети}(t)$ – синусоидальное напряжение питающей сети; $i(t)$ – импульсный ток нагрузки; $Z_{сети}$ – полное сопротивление сети со стороны зажимов нагрузки.

Несинусоидальные токи, протекая по сопротивлению сети, вызывают падение напряжения на нем. В результате на зажимах нелинейного потребителя, а также на зажимах всех остальных электроприемников, включенных параллельно ему, появляется несинусоидальное напряжение, обычно – плоская синусоида.

«Плоская» синусоида, воздействуя на импульсный источник питания:

– снижает уровень выпрямленного напряжения;

– увеличивает тепловыделение в элементах импульсного источника питания;

– снижает устойчивость к кратковременным провалам напряжения.

2.2. *Нелинейность нагрузки ухудшает условия работы батарей конденсаторов*

В условиях несинусоидальности тока батареи конденсаторов одновременно являются элементами, абсорбирующими гармоники со всей сети, так как сопротивление конденсатора обратно пропорционально частоте:

$$x_c = \frac{1}{\omega C} = \frac{1}{2\pi C} = \frac{1}{2\pi k f_0 C},$$

где f_0 – основная частота, Гц; k – порядок гармоники; C – емкость конденсаторов.

Батареи конденсаторов изменяют нормальный путь гармоник тока от нелинейного потребителя к источнику питания, замыкая часть этого тока через себя. Так как сопротивления элементов сети имеют индуктивный характер, то при применении установок компенсации реактивной мощности и наличии нелинейных потребителей появляется вероятность проявления резонансных явлений (как по току, так и по напряжению) на отдельных элементах системы электроснабжения.

2.3. *Появление ошибок при измерении токов, содержащих высшие гармоники*

При измерении токов, содержащих высшие гармоники, обычными токоизмерительными клещами, они могут показать неверный результат, так как работают в частотном диапазоне 50 Гц и зарегистрировать высшие гармоники не могут.

Кроме того, применение аналоговых приборов, принцип измерения которых основан на усреднении амплитуды синусоиды, в случае несинусоидальности дает существенную погрешность за счет различного значения коэффициентов амплитуды и формы.

Следовательно, аналоговые приборы показывают только действующее значение основной гармоники тока. Фактическое действующее значение тока при этом может оказаться на 25-50 % больше. Поэтому необходимо применять измерительные инструменты и приборы с широким частотным диапазоном и регистрирующие истинное действующее значение измеряемого тока (приборы с функцией True RMS).

3.1. *Дополнительные потери в трансформаторах*

Протекание по обмоткам трансформатора несинусоидальных токов, вследствие поверхностного эффекта и эффекта близости, приводит к увеличению активного сопротивления обмоток трансформатора и, как следствие, к дополнительному нагреву. Срок службы трансформатора зависит от нагрева его частей и не позволяет при несинусоидальном токе использовать трансформатор на всю его номинальную мощность, ее приходится занижать.

Например, полная нагрузка трансформатора может наступить при использовании лишь 80 % номинальной мощности. Если не учитывать превышение температуры и нагрузить такой трансформатор до номинальных значений, срок его службы может сократиться с десятков лет до одного года.

Кроме того, высокочастотные гармоники тока – это причина появления вихревых токов в обмотках трансформатора, что вызывает дополнительные потери мощности и перегрев трансформатора. Для линейных потребителей потери на вихревые токи составляют в общих потерях приблизительно 5 %, с нелинейной нагрузкой они могут возрасти в 15-20 раз.

3.2. *Перегрев изоляции*

Старение изоляции проводников обусловлено протеканием несинусоидального тока, приводящего к повышенному нагреву наружной поверхности жил кабеля вследствие поверхностного эффекта и эффекта близости. При рабочих температурах в изоляционных материалах протекают химические реакции, приводящие к постепенному изменению их изоляционных и механических свойств. С ростом температуры эти процессы ускоряются, сокращая срок службы оборудования.

3.3. *Ухудшение условий работы БСК*

В конденсаторах потери энергии пропорциональны частоте

$$\Delta P = U^2 \omega C \operatorname{tg}\delta.$$

Поэтому несинусоидальный ток приводит к их дополнительному нагреву и вызывает электрическое старение диэлектриков конденсаторов. Сущность электрического старения – в возникновении так называемых частичных разрядов, которые распространяются лишь на часть изоляционного промежутка, например, частичные разряды в газовых включениях. В результате развиваются местные дефекты в изоляции, что приводит к сокращению срока службы.

3.4. ***Ухудшение работы РЗА***

При протекании несинусоидальных токов и, следовательно, действии поверхностного эффекта и эффекта близости, наблюдается дополнительный нагрев внутренних элементов защитных устройств. При этом может происходить необоснованное срабатывание предохранителей и автоматических выключателей РЗА.

4.1. ***Возникновение помех в сетях телекоммуникаций***

При близком расположении силовых кабелей и кабелей телекоммуникаций, вследствие протекания по первым высокочастотных гармоник тока, во вторых могут наводиться помехи. Магнитные поля высших гармоник прямой и обратной последовательности частично компенсируют друг друга, поэтому наибольшее влияние на телекоммуникации оказывают гармоники, кратные трем. При этом, чем выше порядок гармоник, тем больше уровень помех, наведенных ими в телекоммуникационных кабелях.

4.2. ***Возможность возникновения нежелательных резонансов***

При значительной доле нелинейной нагрузки и одновременном использовании батарей статических конденсаторов, подключенных к шинам низкого напряжения трансформаторов, в определенном сочетании параметров сети может возникать параллельный резонанс (резонанс токов). Это опасное явление приводит:

– к резкому увеличению тока резонансной гармоники через трансформатор, что может послужить причиной его тепловой перегрузки;

– к выходу из строя батарей статических конденсаторов;

– к сбоям и даже выходу из строя электронного оборудования;

– к резкому увеличению коэффициентов искажения синусоидальности кривой напряжения.

ВЫВОДЫ

Проведенный анализ позволяет выявлять причины появления в электрических сетях гармонических составляющих и их влияние на качество электрической энергии и соответственно более обоснованно использовать мероприятия по уменьшению их отрицательного влияния.

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. *Вольдек А.И.* Электрические машины: Учебник для студентов высш. техн. учебн. заведений. Изд. 2-е, перераб. и доп. – Л.: Энергия, 1974. – 840 с.

2. *Иванов В.С.*, *Соколов В.И.* Режимы потребления и качество электроэнергии систем электроснабжения промышленных предприятий. – М.: Энергоатомиздат, 1987. – 336 с.

3. *Уильямс Б.* Силовая электроника: приборы, применение, управление. Справочное пособие: Пер. с англ. – М.: Энергоатомиздат, 1993. – 240 с.: ил.

ЭНЕРГОСНАБЖЕНИЕ УДАЛЁННЫХ ЛОКАЛЬНЫХ ПОТРЕБИТЕЛЕЙ

Д.А. Быкадоров – зам. главного инженера филиала ОАО «Волгоградэнерго» Левобережные электрические сети
П.Д. Васильев – – канд. техн. наук, доцент, зав. кафедрой ЭОП филиала «МЭИ (ТУ)» в г. Волжском

1. АКТУАЛЬНОСТЬ

В последние годы в энергетике Волгоградской области на рынке транспорта электроэнергии складывается сложная ситуация. С одной стороны, сетевым компаниям необходимо сохранять сети, по которым транспортируется электроэнергия, создавая тем самым валовой отпуск электроэнергии. С другой стороны, стареющее оборудование требует серьёзного увеличения затрат на поддержание сетей в пригодном для их технологического назначения состоянии. Высокая степень износа значительной части оборудования остро ставит вопросы обеспечения надёжности и безопасности эксплуатации энергетических систем. Ситуацию усугубляют негативные тенденции, имеющие место в системе обеспечения ремонтов, обусловленные, в основном, снижением уровня организации, планирования и управления энергоремонтным производством, недооценкой значимости ремонтов, решением текущих проблем в ущерб перспективе надёжной работы энергетического оборудования. Необходимы срочные меры, позволяющие приостановить эти тенденции, обеспечить выполнение необходимого для поддержания надлежащего технического состояния энергооборудования объёма организационных и технических мероприятий с минимальными затратами и соответствующим качеством. Сейчас уже ясно, что восстановление и замена выработавшего свой парковый ресурс оборудования будет проводиться, в основном, за счет собственных средств компаний, то есть с существенными ограничениями по финансированию. В будущем проблемы могут усугубиться из-за роста энергопотребления на 20-25 % в ближайшие 10-15 лет. В критической ситуации неизбежно окажется энергоснабжение удалённых от питающих центров предприятий агропромышленного комплекса, малых поселений и других локальных потребителей электроэнергии.

2. ПРИЧИНЫ ИЗМЕНЕНИЯ ПОДХОДОВ К ЭНЕРГОСНАБЖЕНИЮ

В условиях дефицита финансовых ресурсов и с учетом динамики старения оборудования предполагается изменение приоритетов в структуре энергоснабжения удалённых потребителей. Если ранее приоритет отдавался проведению восстановительных ремонтных мероприятий и замене изношенного оборудования, то в будущем приоритеты следует отдать строительству локальных электростанций, приближенных к потребителям энергии.

Попытаемся структурировать сложившиеся причины изменения подходов к энергоснабжению.

1. Социальные:

1.1. Множественность форм собственности юридических лиц.

1.2. Разнородность социального и этнического состава населения.

1.3. Низкий уровень доходов населения сельских районов.

1.4. Изменение нормативов потребления электроэнергии различными социальными группами.

1.5. Резкое увеличение в структуре затрат населения доли, связанной с оплатой электроэнергии.

2. Технологические:

2.1. Отсутствие принципиально новых технологий передачи электроэнергии.

2.2. Физическое старение оборудования.

2.3. Неудовлетворительное качество электроэнергии при постоянном повышении технологического уровня энергоприёмников.

3. Экономические:

3.1. Недостаточные инвестиции в энергетику. Снижение капиталовложений в ремонтные программы. Практически полное отсутствие нового строительства. Восстановление линий электропередач под видом нового строительства.

3.2. Изменение цены на электроэнергию.

3.3. Изменение стоимости транспорта электроэнергии.

4. Политические:

4.1. Изменение политического строя в стране.

4.2. Изменение структур власти и их влияния на энергетику.

3. ИЗМЕНЕНИЕ СТРУКТУРЫ ЭНЕРГОСНАБЖЕНИЯ

Изменение структуры энергоснабжения – ответственный шаг, который требует тщательного взвешивания всех доводов «за» и «против». Для реализации этой задачи необходимо, в первую очередь, выделить факторы, влияющие на эффективность централизованного энергоснабжения локальных удалённых потребителей.

Рассмотрим экономические доводы сохранения централизованного энергоснабжения с разных точек зрения.

1. Для потребителя, уже подключённого к сети:

1.1. Частное лицо:

1.1.1. Повышение цен на электроэнергию.

1.1.2. Необходимость продолжительных и затратных действий бюрократического характера для поддержания электроснабжения.

1.1.3. Низкое качество электроэнергии, включая нестабильность её получения.

1.1.4. Отсутствие тарифных планов по оплате в течение суток.

1.1.5. Удалённость питающих центров.

1.1.6. Продолжительное время ликвидации технологических нарушений у некатегорийных потребителей.

1.1.7. Воровство технологического оборудования.

1.2. Для юридических лиц к пунктам 1.1.1-1.1.7 следует добавить:

1.2.1. Необходимость оплачивать потери электроэнергии как технические, так и коммерческие.

1.2.2. Несправедливые тарифы из-за различных видов перекрёстного субсидирования населения.

1.2.3. Потребность в содержании квалифицированного персонала, оплата подтверждения его квалификации.

2. Для потребителя, не подключённого к сети:

2.1. Частное лицо:

2.1.1. Необходимость больших экономических ресурсов для подключения к сети:

– высокая стоимость тех. присоединения до 10 000 руб. за 1 кВт;

– высокая стоимость тех. оборудования и необходимость заказа его в комплекте;

– увеличение стоимости оборудования пропорционально удалённости от питающего центра.

2.1.2. Необходимость сбора огромного количества разрешений на подключение в разных организациях, зачастую предъявляющих противоречивые требования

2.1.3. Потребность в содержании квалифицированного персонала, оплата подтверждения его квалификации, как альтернатива – наём специализированной организации, не всегда качественно выполняющей техобслуживание вследствие монополизации рынка.

2.1.4. Высокая стоимость электроэнергии.

2.1.5. Большая доля стоимости электроэнергии в себестоимости продукции.

2.1.6. Воровство технологического оборудования.

2.2. Для юридических лиц к пунктам 2.1.1.-2.1.6 следует добавить:

2.2.1. Необходимость найма специализированной организации, не всегда качественно выполняющей техобслуживание, вследствие монополизации рынка.

В пользу децентрализации электроснабжения, с точки зрения транспортной энергетической компании, могут выступать нижеследующие доводы:

1. Сокращение издержек на обслуживание и ремонт линий электропередач, имеющих низкий транспортный показатель.

2. Отсутствие необходимости перераспределения средств, вырученных по тех. присоединению с других объектов, на новые объекты, попадающие под категорию льготных.

3. Отсутствие необходимости несения договорных обязательств перед потребителями по обслуживанию их линий.

4. Снижение потерь электроэнергии всех видов, а также всех видов потерь.

5. Повышение надёжности энергоснабжения, вследствие локализации отпуска электроэнергии.

Для энергосбытовой компании – это сокращение неоплаченной энергии, особенно с протяжённых проблемных участков.

С практической точки зрения необходима строгая формализация рассмотренных выше доводов для анализа высоковольтных линий (ВЛ) электропередач и выявления «узких мест», где локализация энерговыработки и энегоснабжения оправданы. Математическим аппаратом может выступить, например, теория качеств, предложенная в [1]. Аналогично [2], где рассмотрены варианты ранжирования энерговырабатывающих предприятий по критерию качеств, можно ранжировать ВЛ с выбором наиболее проблемных. Одними из факторов, влияющими на принятие решений, могут быть следующие:

1. Прямые:
   1.1. Потери в линиях ВЛ:
      1.1.1. Коммерческие.
      1.1.2. Технические.
   1.2. Ремонт:
      1.2.1. Затраты на капитальный ремонт ВЛ.
      1.2.2. Эксплуатация.
      1.2.3. Затраты на проведение эксплуатационных работ на ВЛ.
2. Косвенные:
   2.1. Потери от недостаточной надёжности электроснабжения.
   2.2. Так называемые технические потери, связанные с возникновением каких-либо неполадок и неисправностей по причине недостатков в эксплуатации или ремонте.
   2.3. Потери, связанные с неисправностями, возникающими под воздействием третьих лиц.

Дополнительно к списку, в качестве факторов завтрашнего дня, можно добавить:

1. Затраты на приведение качества электроэнергии к стандарту.
2. Штрафные санкции за срыв бесперебойности электроснабжения.

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. *Брызгалин Г.И.* Введение в теорию качеств. – Волгоград: ВПИ, 1998.

2. *Брызгалин Г.И.*, *Васильев П.Д.*, *Раменский П.П.* Оценивание энергоресурсоэффективности на основе методов теории качеств // Труды V международного симпозиума «Ресурсоэффективность и энергосбережение», г. Казань, 1-2 декабря 2004 г. // Казань: Казанский государственный университет, 2005. – С. 247-252.

СЕКЦИЯ № 3
АВТОМАТИЗИРОВАННЫЕ СИСТЕМЫ УПРАВЛЕНИЯ

Руководители секции: ***Андрюшин Александр Васильевич***
д-р техн. наук, профессор
Шевчук Валерий Петрович
д-р техн. наук, профессор

МЕТОД ИНТЕЛЛЕКТУАЛЬНОЙ ИЗМЕРИТЕЛЬНОЙ СИСТЕМЫ ПАРАМЕТРОВ ЖИВОЙ РЫБЫ

В.П. Шевчук – д-р техн. наук, профессор
филиала «МЭИ (ТУ)» в г. Волжском
В.И. Капля – канд. техн. наук, доцент
ВПИ (филиала) ВолгГТУ
С.В. Моргунов – инженер Волгоградского ОРЗ
А.Е. Баранов – гл. метролог
филиала «МЭИ (ТУ)» в г. Волжском
Р.В. Катаев – инженер-программист «Волтайр-Пром»

В статье разработаны уравнения измерения размера и массы живой рыбы, находящейся в бассейне, с помощью телевизионных средств измерения, исследована эффективность алгоритма измерения и разработана методика поверки предложенной интеллектуальной стереоизмерительной системы.

На Волжской ГЭС, при непосредственном участии со стороны «Нижневолжрыбвод», создано рыбоводное хозяйство, использующее закрытые водоёмы-ванны. Стабильность водного и температурного режимов позволяет эффективно содержать и использовать маточное стадо. Отдельные особи-производители содержатся в этих водоёмах по несколько лет.

Видовое разнообразие, большая численность, высокая динамика роста молодняка требуют постоянного и ежедневного контроля и учёта рыбного стада. В первую очередь это необходимо для определения *суточной потребности в кормах*. Для решения этой задачи проводятся периодические промеры длины и веса рыб, подсчитывается их количество.

Использование цифровых информационно-измерительных видеосистем рассматривается как перспективное направление снижения трудоёмкости и повышения точности этих измерений.

Исследования проводились для определения *метрологических параметров* информационно-измерительной системы контроля за состоянием живой рыбы в условиях закрытого водоёма рыбоводного комплекса Волжской ГЭС.

Задачей экспериментов были нахождение (вычисление):

– систематической погрешности стандартного метода измерений;

– случайной погрешности;

– присутствия или отсутствия выбросов и установления условий повторяемости и воспроизводимости результатов измерений длины и массы живой рыбы.

1. При создании математической модели ИИС представим полученное изображение в графическом виде. Для этого вводим прямоугольные координаты x и y. Рисунок выполняем в виде сетки, где одна клетка соответствует одному пикселю.

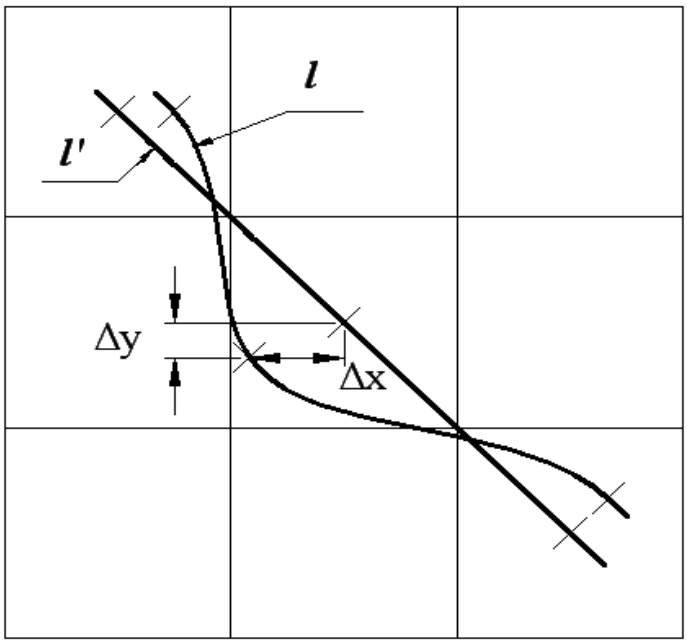


Рис. 1.

На рисунке кривая l – реальное изображение на плоскости. Крестиками обозначены места фиксации оператором; l' – ломаная, прямые отрезки которой воспроизводят длину l. Точками обозначен центр каждого пикселя.

Процесс восстановления длины кривой l происходит посредством ломаной l', проходящей через центры пикселей, в которых стояли крестики. Таким образом, в каждой опорной точке будет смещение в сторону от центра пикселя по оси абсцисс в виде Δx и оси ординат Δy. Данная погрешность может существовать как со знаком плюс, так и со знаком минус.

Уравнение длины ломаной l' можно представить в виде суммы прямых участков:

$$l' = \sum \sqrt{\begin{array}{l}(x_2 - x_1 + \Delta x_2 - \Delta x_1)^2 + (y_2 - y_1 + \Delta y_2 - \Delta y_1)^2 + \\ + (x_{k+1} - x_k + \Delta x_{k+1} - \Delta x_k)^2 + (y_{k+1} - y_k + \Delta y_{k+1} - \Delta y_k)^2\end{array}},$$

где $[x_1, y_1]$ – координаты первой опорной точки; $[x_k, y_k]$ – координаты k-ой опорной точки; $[\Delta x_1, \Delta y_1]$ – величина смещения первой опорной точки от центра пикселя; $[\Delta x_k, \Delta y_k]$ – величина смещения k-ой опорной точки от центра пикселя.

Погрешность $\delta_1 = l_1 - l_1'$ будет присутствовать в результатах измерений.

Данную погрешность можно определить как систематическую погрешность метода измерений. Количественная оценка будет дана в третьей главе.

2. При получении двумерного изображения с помощью одной камеры отсутствует учёт глубины погружения рыбы и её всевозможных перемещений в третьем измерении.

На рис. 2 представлена схема получения изображения, где l – положение рыбы в воде; h – глубина залегания рыбы; l' – проекция, отображаемая на дисплее ИИС.

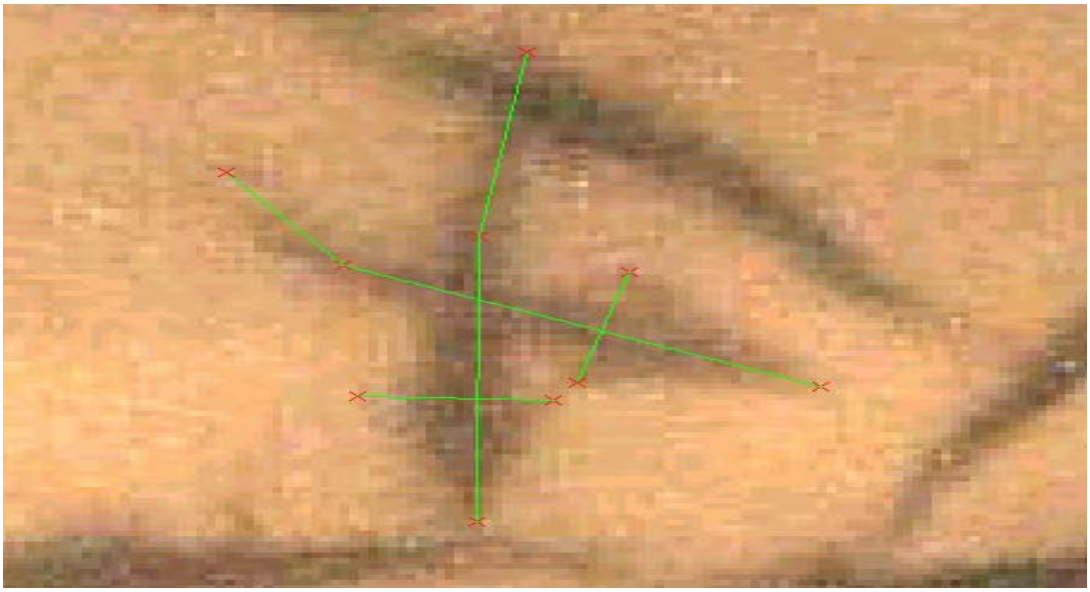


Рис. 2

Из рисунка становится очевидным существование ещё одной составляющей систематической погрешности метода однокамерного измерения δ_2, также являющейся случайной величиной, зависящей от поведения рыбы. Численно она равна $\delta_2 = l_2 - l_2'$

Также очевидно, что данная погрешность будет присутствовать только со знаком минус, так как проекция l_2' всегда меньше оригинала l_2, поскольку изображение предметов, находящихся под водой, получается уменьшенным за счёт действия на изображение водного слоя. Для учёта данного эффекта был многократно измерен в воде стандартный образец рыбы известной длины, и усреднённый поправочный коэффициент введён в алгоритм программы.

Эксперименты проводились на ремонтно-маточном стаде рыбоводного комплекса Волжской ГЭС.

Для этого был выделен произвольный бассейн и запущены 5 особей, существенно и равномерно отличающихся по длине друг от друга: от ~20 см. до ~ 100 см. Таким образом, 5 особей образуют 5 уровней измерений, и с монитора компьютера мы всегда легко можем идентифицировать каждую особь. Кроме того, выбранный шаг деления образует полный диапазон измерений, необходимый для проведения мониторинга на рыбоводном комплексе. При этом, естественно, подразумевается постоянство длины и массы взятых образцов в течение эксперимента.

Для надежного определения параметров воспроизводимость результатов измерения выполнялась двумя операторами в разные смены, и им были неизвестны результаты измерений длины и массы всех образцов.

Опорные точки длины и массы образцов были получены методом прямых измерений образцов вне водоёма при помощи рулетки РЛ-10 с ценой деления 1 мм и весов РП-20 с ценой деления 10 г.

Каждому оператору надлежало выполнить 10 снимков и вычислить длину и массу всех образцов по 3 раза в каждом снимке. Таким образом, оператор производит измерение каждого образца 30 раз. Количество операторов и количество измерений было определено по формуле:

$$A\sigma_R \le \frac{\sigma_m}{1{,}84},$$

где σ_m – заданное значение систематической погрешности, в нашем случае 1 см; σ_R – стандартное отклонение воспроизводимости метода измерения.

A, как функция p и n, задаётся следующим выражением:

$$A = 1{,}96\sqrt{\frac{n\left(\gamma^2 - 1\right) + 1}{\gamma^2 pn}},$$

где $\gamma = \sigma_R / \sigma_r$; σ_r – стандартное отклонение повторяемости метода измерений.

При подстановке значений получаем

$$A = 1{,}96\sqrt{\frac{30 \cdot \left(0{,}97^2 - 1\right) + 1}{0{,}97^2 \cdot 2 \cdot 30}} = 0{,}081;$$

$$0{,}16 \le 0{,}543.$$

Статическую модель погрешности стандартного метода измерений мы представим в виде $y = \mu + \delta + B + e$, поскольку δ представляет интерес, где y – результат измерения; μ – опорная точка; δ – систематическая погрешность метода измерений; B – операторная составляющая систематической погрешности метода измерений; e – случайная составляющая погрешности каждого результата измерений в условиях повторяемости.

Данная модель позволяет наиболее полно раскрыть систематическую погрешность метода измерений: μ – мы воспроизводим с помощью рулетки и принимаем в качестве опорного значения, δ – находим как разность между снимками одного оператора, B – определяем как разность полученных значений между операторами, то есть систематическая погрешность воспроизводимости, e – находим как разность значений в отдельном снимке оператора.

Принимается допущение, что особи, отражённые на снимках, ведут себя произвольно и в процессе измерения могут изменять пространственное положение как в горизонтальной, так и в вертикальной плоскости, и быть в движении с разной скоростью. Поэтому оператору необходимо получить чёткое изображение.

Рассчитываем средние значения в базовых элементах по формуле:

$$\bar{y} = \frac{1}{n}\sum_{k=1}^{n} y_{ik},$$

где y_{ik} – каждое измерение; n – число измерений = 3.

Результаты вычислений представлены в таблице 2.

Опорные значения:

Таблица 1

Уровень	1	2	3	4	5
Длина рыбы, см	95,1	74,0	61,8	35,5	22,8

Далее производим оценку стандартного отклонения внутри снимка по формуле:

$$S_{ij} = \sqrt{\frac{1}{n-1}\sum\left(y_j - y_j^2\right)}, \text{ где } n = 3.$$

Далее рассчитывается оценка стандартного отклонения внутри снимка для пяти уровней:

$$S_{\delta_1} = \sqrt{\sum S_{ij}^2 / np}.$$

Результаты заносим в таблицу 2.

Таблица 2

Уровень	1	2	3	4	5
S_{δ_1}	0,06	0,06	0,05	0,06	0,06

Расчёт стандартного отклонения на каждом уровне выполнен по формуле:

$$\sigma_{ri} = \sqrt{\frac{1}{n-1}\sum\left(\bar{y}_i - \mu\right)^2}, \text{ где } n = 10.$$

Результаты вычислений приведены в таблице 3.

Таблица 3

Оператор 1						Оператор 2				
1	2	3	4	5		1	2	3	4	5
2,43	1,79	0,62	2,70	0,72		2,84	1,17	0,66	1,74	2,33

3. Производилась проверка выбросов по критерию Граббса по формуле:

$$\sigma_p = \left(x_p - \bar{x}\right)/s,$$

где $\bar{x} = \frac{1}{p}\sum_{i=1}^{p} x_i$; $s = \sqrt{\frac{1}{p-1}\sum_{i=1}^{p}\left(x_i - \bar{x}\right)^2}$.

Были взяты наибольшее и наименьшее значения на каждом уровне и произведено сравнение с табличными данными.

Выбросы отсутствуют.

4. Дисперсия повторяемости вычисляется по формуле:

$$\sigma_r^2 = \frac{\sum \sigma_{ri}^2}{p},$$

где p – количество лабораторий.

Результаты вычислений приведены в таблице 4.

Таблица 4

Уровень	1	2	3	4	5
σ_r	2,01	1,51	0,64	3,21	1,72

5. Дисперсию воспроизводимости получаем по формуле:

$$\sigma_R^2 = \frac{1}{p-1}\sum\left(\bar{y} - \bar{y}\right)^2 + \left(1 - \frac{1}{n}\right)\sigma_r^2,$$

где p – число лабораторий; $\bar{y} = \frac{1}{p}\sum_{i=1}^{p}\bar{y}_i$.

Результаты вычислений приведены в таблице 5.

Таблица 5

Уровень	1	2	3	4	5
σ_R	2,01	1,51	0,64	3,21	1,72

6. Систематическая погрешность метода измерения определяется по формуле:

$$\hat{\delta} = \bar{y} - \mu,$$

где μ – принятое опорное значение.

Результаты вычислений приведены в таблице 6.

Таблица 6

Уровень	1	2	3	4	5
$\hat{\delta}$	-0,59	-0,38	-0,18	-0,51	-0,19

7. Вариация оценки систематической погрешности определяется по формуле:

$$\sigma_{\hat{\delta}} = \sqrt{\frac{\sigma_R^2 - \left(1 - \frac{1}{n}\right)\sigma_r^2}{p}}.$$

Результаты заносим в таблицу 7.

Таблица 7

Уровень	1	2	3	4	5
σ_{δ}	0	0	0	0	0

8. Доверительный 95 % интервал систематической погрешности определяется выражением:

$$\delta - A\sigma_R \le \delta \le \delta + A\sigma_R,$$

где $A = 1{,}96\sqrt{\dfrac{n\left(\gamma^2 - 1\right) + 1}{\gamma^2 pn}}$; $\gamma = \dfrac{\sigma_R}{\sigma_r}$.

Вычисляем γ и A для пяти уровней и заносим их в таблицу 8.

Таблица 8

Уровень	1	2	3	4	5
γ	0,985	0,987	0,984	0,984	0,983
A	0,081	0,081	0,081	0,081	0,081

Доверительный интервал систематической погрешности:

для первого уровня:

$$-0{,}59 - 0{,}16 \le \delta_1 \le -0{,}59 + 0{,}16,$$
$$-0{,}75 \le \delta_1 \le -0{,}43;$$

для второго уровня:

$$-0{,}38 - 0{,}12 \le \delta_2 \le -0{,}38 + 0{,}12,$$
$$-0{,}5 \le \delta_2 \le -0{,}26;$$

для третьего уровня:

$$-0{,}18 - 0{,}05 \le \delta_3 \le -0{,}18 + 0{,}05,$$
$$-0{,}23 \le \delta_3 \le -0{,}13;$$

для четвёртого уровня:

$$-0{,}51 - 0{,}26 \le \delta_4 \le -0{,}51 + 0{,}26,$$
$$-0{,}77 \le \delta_4 \le -0{,}25;$$

для пятого уровня:

$$-0{,}19 - 0{,}14 \le \delta_5 \le -0{,}19 + 0{,}14,$$
$$-0{,}33 \le \delta_5 \le -0{,}05.$$

В данной работе были получены и исследованы метрологические параметры информационно-измерительной системы контроля за состоянием живой рыбы в условиях закрытого водоёма.

Статистический анализ, выполненный на основе новейших стандартов серии ГОСТ Р ИСО 5725-1…6 – 2002 «Точность (правильность и прецезионность) методов и результатов измерений», позволил получить полную оценку модели погрешностей и их составляющих – систематическую погрешность метода измерений, межлабораторную и случайную.

Приведены их абсолютные значения и стандартные отклонения.

Выяснено также, что межлабораторная составляющая стандартного отклонения на порядок меньше, поэтому при округлении приняла значение стандартного отклонения повторяемости. В результате вариация оценки систематической погрешности свелась к нулю.

Всё это доказывает высокий уровень параметров правильности и прецезионности данной ИИС.

Полученные результаты являются обоснованием начала работ по утверждению типа и сертификации ИИС контроля за состоянием живой рыбы в условиях закрытого водоёма с целью применения её в сферах государственного метрологического контроля и надзора.

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. НИР 2.17.03ВАЭ2. Информационно-измерительная система контроля за состоянием живой рыбы в условиях закрытого водоёма.

2. ГОСТ Р ИСО 5725-1 …6 – 2002 «Точность (правильность и прецезионность) методов и результатов измерений».

3. *Лобанов А.Н.* Аналитическая пространственная фототриангуляция. – М.: Недра, 1991. – 324 с.

4. *Кожевников Н.П.* Фотограмметрия. – М.: Издательство геодезической литературы, 1960. – 532 с.

5. Патент РФ № 2173445 «Способ бесконтактного определения пространственных координат точек объекта».

6. Патент РФ № 1814412 «Устройство для учета рыбы в потоке воды».

7. Патент США № 5778548 «Viewing device and method three-dimensional no contacting measurements».

8. *Белоглазов И.Н.*, *Казарин С.Н.* Автоматическое стереоскопическое распознавание наблюдаемых сцен. Теория и системы управления. – 1999. – № 6. – С. 163-176.

9. *Анисимов Б.В.*, *Курганов В.Д.*, *Злобин В.К.* Распознавание и цифровая обработка изображений. – М.: Высш. шк., 1983. – 295 с.

10. *Новицкий П.В.*, *Зограф И.А.* Оценка погрешностей результатов измерений. – Л.: Энергоатомиздат, 1991. – 304 с.

11. *Кендалл М.*, *Моран П.* Геометрические вероятности. – М.: Наука, 1972. – 192 с.

ИССЛЕДОВАНИЯ АЛГОРИТМА УПРАВЛЕНИЯ РАСХОДА ОБЩЕГО ВОЗДУХА С КОРРЕКЦИЕЙ ПО КИСЛОРОДУ ПАРОВОГО БАРАБАННОГО КОТЛА

Д.В. Еремин – аспирант
кафедры АСУ ТП «МЭИ (ТУ)»

На данный момент наиболее распространенной и экономичной схемой управления расходом общего воздуха парового барабанного котла, работающего на газообразном топливе, является схема по соотношению «топливо – воздух» с коррекцией по кислороду.

Структурная схема данной системы управления имеет вид:

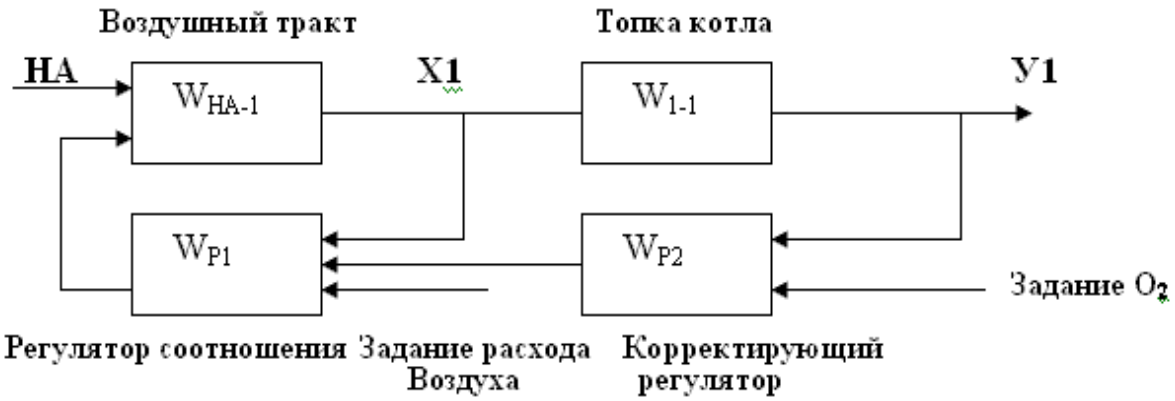


Рис. 1. Структурная схема регулятора общего воздуха с корректирующим регулятором кислорода

Для исследования данной системы управления и нахождения параметров настройки регуляторов необходимо получить математические модели входящих в нее каналов $W_{НА-1}$ и W_{11}. Это осуществляется путем проведения активного эксперимента (снятия кривых разгона) на действующем объекте.

На рис. 2 приведены снятые переходные характеристики (1 – кривая разгона; 2 – аппроксимационная кривая) по каналам, согласно структурной схемы рис. 1.

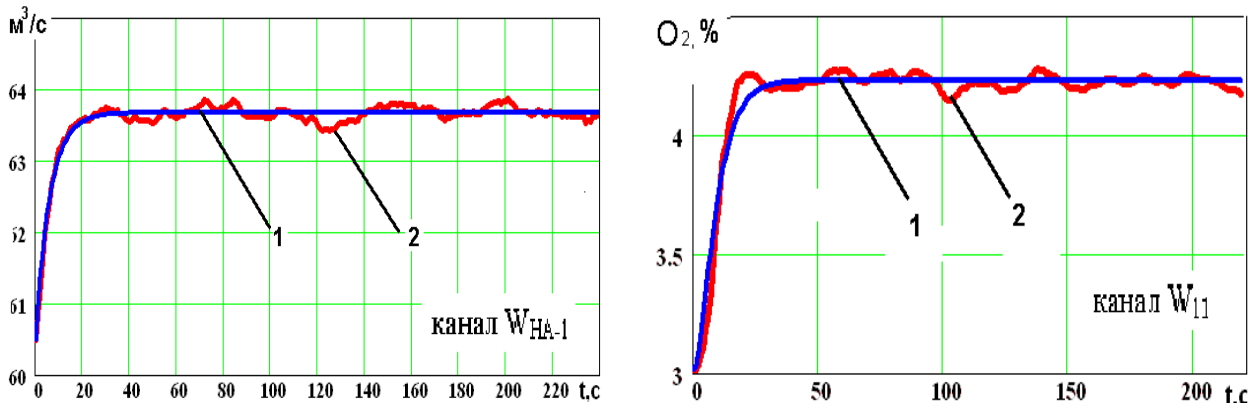


Рис. 2. Кривая разгона по каналу $W_{НА-1}$ и W_{11}

Аппроксимационные кривые получаются путём минимизации среднеквадратического отклонения экспериментальной кривой от теоретической, для чего были получены аппроксимирующие зависимости для каждого канала объекта в виде передаточных функций определенного аналитического вида, согласно [2]. Расчеты проводились с помощью пакета MathCAD, и результаты сведены в таблицу 1.

Таблица 1

Результаты активного эксперимента

Передаточная функция по каналу	**Вид передаточной функции**
$\mathbf{W_{НА\text{-}1}}$	$W_{НА-1}(p)=\dfrac{1{,}06}{(6{,}13\,(p+1))}$
$\mathbf{W_{1\text{-}1}}$	$W_{1\text{-}1}(p)=\dfrac{0{,}29}{24{,}1081\,p^2+9{,}82\,(p+1)}\,e^{-20\,p}$

Существуют различные способы расчета полученной многоконтурной системы, одним из них является метод многомерного сканирования [1].

Основу метода составляет обобщенный критерий Найквиста: разомкнутая линейная система, имеющая корневой показатель колебательности не хуже *m*, сохранит его и после замыкания отрицательной обратной связью, если расширенная АФЧХ разомкнутой системы не охватывает точку (–1; *j*0).

$$W_{raz}{}^{*}(\omega)=W_{raz}(-m\,\omega+j\,\omega),$$

где $W_{raz}(p)$ – передаточная функция разомкнутой системы.

Как уже было доказано выше, связь параметров настройки ПИ-регулятора с линейным интегральным критерием достаточно проста и может быть применена даже для слабоколебательных процессов. Используя данную связь и положения критерия Найквиста, предварительно задавшись определенным запасом устойчивости, можно записать систему уравнений, решение которой позволит получить искомые параметры настройки:

$$\left.\begin{aligned}&\mathrm{Re}\big(W_{raz}(\omega,kr,Tu)\big)=-1\\&\mathrm{Im}\big(W_{raz}(\omega,kr,Tu)\big)=0\\&\frac{kr}{Tu}\to\max\end{aligned}\right\}.$$

Расчет оптимальных параметров каскадных систем освещался в ряде публикаций, однако предложенные методы, в основном, относились только к системам с относительно малой инерционностью вспомогательных каналов объекта. Расчет систем, объекты которых не обладают такой особенностью, обычно предлагается выполнять поочередно по контурам (например, сначала внутренний, затем внешний, с включением в него внутреннего, затем снова внутренний, с включением в него внешнего и т.д.). Главный недостаток такого подхода состоит в отсутствии гарантии того, что подобная процедура последовательных приближений сойдется к действительному оптимуму.

Сущность этого метода, названного *методом многомерного сканирования*, состоит в ранжировании параметров настройки системы на ведущие и подчиненные с применением древовидного алгоритма расчета. Реализация этого метода, как правило, требует применения ПЭВМ, с помощью которой производится расчет каждой ветви древовидной структуры во всём возможном диапазоне изменения ее параметров. Простота программирования такого алгоритма заключается в том, что для всех его ветвей расчет оказывается одинаковым.

Структура алгоритма многоуровневого сканирования не имеет замкнутых циклов и, следовательно, он избавлен от главного недостатка методов поиска поочередно по контурам – отсутствие уверенности в его сходимости.

Порядок действий при расчете параметров настройки методом многомерного сканирования может быть следующим:

1. Любыми известными методами осуществляется поиск параметров настройки главного ПИ-регулятора в одноконтурной структуре для принятого значения запаса устойчивости. При этом нет необходимости искать настройку, при которой будет точно удовлетворяться ограничение на значение частотного показателя колебательности – эта настройка нужна только как начальное приближение, которое затем будет уточняться;

2. По КЧХ обобщенного объекта обычными методами расчета одноконтурных систем определяется оптимальная настройка вспомогательного регулятора.

3. Строятся графики АЧХ обоих замкнутых контуров; проверяется значение их резонансных пиков, после чего осуществляется переход к процедуре трехмерного сканирования. Здесь возможны два случая: пик главного контура принимает заданное значение, а вспомогательного – меньше допустимого. Это значит, что система обладает необходимым запасом устойчивости, но имеется возможность уменьшить критерий оптимальности путем увеличения коэффициента передачи основного регулятора (с одновременным пересчетом параметров настройки корректирующего), доведя его до значения, когда резонансный пик примет заданное значение. Приведенные соображения следует проверять фиксацией критерия оптимальности; возможно, что минимум будет достигнут до выхода на границу запаса устойчивости.

Поисковая процедура выполнена с помощью пакета MathCAD, и результаты представлены в таблице 2. Расчет настройки главного регулятора выполнять методом вспомогательной функции [1]. Необходимо соблюдать определенную осторожность, контролируя вид КЧХ обобщенного объекта (она не должна иметь петель).

Параметры системы управления также могут быть определены методом расположения полюсов передаточной функции [3].

Основная идея метода заключается во взаимосвязи расположения полюсов передаточной функции замкнутой системы на комплексной плоскости с характером переходных процессов в системе. Известно, что, чем ближе расположены полюса к действительной оси, тем меньше колебательность переходных

процессов в системе. Кроме того, чем дальше полюса располагаются от мнимой оси, тем меньше длительность переходных процессов.

При этом параметры настройки регулятора подбираются таким образом, чтобы все полюса передаточной функции лежали в заданной области. Во многих источниках обосновывается форма этой области как полубесконечной трапеции, однако для практических расчетов удобнее пользоваться формой полубесконечного прямоугольника.

Для расчета параметров необходимо задаться величиной β, которой можно регулировать колебательность переходного процесса в системе: чем она меньше, тем меньше колебательность и перерегулирование, но больше длительность переходного процесса. Кроме того, необходимо как можно дальше расположить полюса от мнимой оси, что уменьшит длительность переходного процесса. Эти положения можно формализовать в виде следующей системы уравнений:

$$\left.\begin{aligned} &\max(\ln(r(kr, Tu))) = \beta \\ &\max(\mathrm{Re}(r(kr, Tu))) \to \min \end{aligned}\right\},$$

где $r(kr, Tu)$ – вектор корней характеристического уравнения.

Решив данную систему, можно получить искомые параметры настройки.

Для расчета параметров настройки регуляторов многоконтурной системы необходимо получить ее общую передаточную функцию, согласно структурной схемы (рис. 1), по формуле Мейсона.

Общий вид формулы Мейсона и ее компоненты.

Для вычисления передаточных функций сложных систем звеньев пользуются формулой Мэйсона:

$$W(p) = \frac{1}{\Delta} \cdot \sum_i W_{пр\,i}(p) \cdot \Delta_i ,$$

где $W(p)$ – передаточная функция системы; Δ – определитель системы:

$$\Delta = 1 - \sum_i W_i(p) + \sum_{i,j} W_i(p) \cdot W_j(p) - \sum_{i,j,k} W_i(p) \cdot W_j(p) \cdot W_k(p) + \ldots .$$

Здесь $W_i(p)$ – передаточная функция i-го замкнутого контура; $W_i(p)$, $W_j(p)$ – передаточные функции попарно несоприкасающихся контуров; $W_i(p)$, $W_j(p)$, $W_k(p)$ – передаточные функции троек несоприкасающихся контуров; $W_{пр\,i}(p)$ – передаточная функция i-го прямого пути; Δ_i – определитель, получаемый из Δ после удаления i-го прямого пути.

Поисковая процедура оптимальных параметров настройки регуляторов выполнена с помощью пакета MathCAD, и результаты расчетов сведены в таблицу 2.

Таблица. 2

Результаты расчёта настроек ПИ-регуляторов многоконтурной системы

Канал / Параметры настройки	Метод расположения полюсов передаточной функции	Метод многомерного сканирования
Положение направляющих аппаратов (НА) – расход воздуха (X1)	$k_i = 1{,}846$ $T_i = 17{,}646$	$k_i = 1{,}113$ $T_i = 0{,}806$
Расход воздуха (X1)- концентрация кислорода (Y1)	$k_i = 1{,}338$ $T_i = 13{,}221$	$k_i = 0{,}207$ $T_i = 4{,}098$

Согласно найденным параметрам настройки регуляторов проводится имитационное моделирование работоспособности системы управления в программе VisSim.

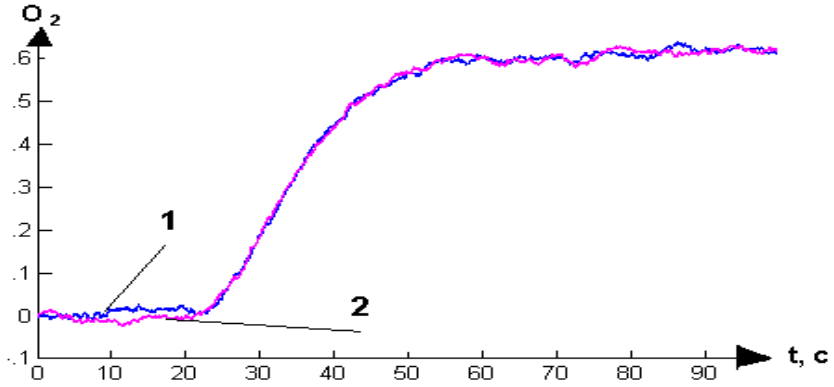


Рис. 3. Переходные процессы изменения концентрации кислорода при различных параметрах настройки регуляторов

1 – метод многомерного сканирования;
2 – метод расположения полюсов передаточной функции

Из имитационного моделирования видно, что графики переходных процессов при разных способах нахождения параметров настройки регуляторов практически идентичны. И переходные процессы, полученные при различных способах нахождения параметров настройки ПИ-регуляторов, показывают работоспособность исследуемого алгоритма и правильность найденных коэффициентов настройки регуляторов.

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. *Ротач В.Я.* Теория автоматического управления: Учебник для вузов. 2-е изд., перераб и доп. – М.: МЭИ, 2004.

2. Наладка систем автоматического регулирования барабанных паровых котлов / *А.С. Клюев*, *А.Т. Лебедев*, *С.И. Новиков*. – М.: Энергоатомиздат, 1985. – 280 с.

3. *Шамигулов П.В.* Использование программы MathCad для решения задач теории автоматического управления: Учебное пособие по дисциплине «Теория автоматического управления». – Волжский: Филиал ГОУВПО «МЭИ (ТУ)» в г. Волжском, 2004. – 38 с.

СИСТЕМА СТАБИЛИЗАЦИИ СТЕПЕНИ НАСЫЩЕНИЯ АБСОРБЕНТА

Д.А. Качегин – инженер ОАО «Волжский Оргсинтез»
И.А. Болдырев – студент
филиала «МЭИ (ТУ)» в г. Волжском
В.Н. Загребин – аспирант
кафедры АСУ ТП «МЭИ (ТУ)»

В настоящее время на ОАО «Волжский Оргсинтез» ведется работа по модернизации систем управления процессами абсорбции. Одним из объектов управления является абсорбционная колонна, в которой происходит поглощение сероуглерода из газовой фазы абсорбентом.

Структурная схема объекта управления показана на рис. 1.

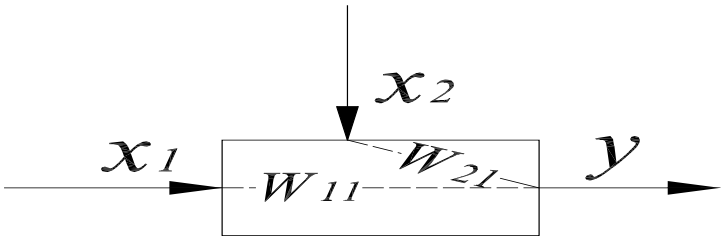


Рис. 1. Структурная схема объекта управления

Здесь x_1 – основной входной регулирующий параметр (расход тощего абсорбента); x_2 – возмущающее воздействие (концентрация тощего абсорбента); y – выходная величина (концентрация обогащенного абсорбента); W_{11} и W_{21} – передаточные функции по соответствующим каналам.

Применяемый в настоящее время алгоритм управления абсорбером при производстве сероуглерода основан на стабилизации технологических параметров без учета обобщенных показателей, характеризующих эффективность работы объекта управления в целом. Предполагается применять алгоритм управления, учитывающий критерии эффективности работы абсорбера.

Оценку эффективности можно произвести, исходя из предположения, что для обеспечения экономичности процесса абсорбции необходимо максимизировать отношение количества фактически поглощенного компонента к тому количеству, которое было бы поглощено в случае противотока при максимально возможном насыщении жидкости, то есть, когда концентрация уходящей жидкости находится в равновесии с поступающим газом [1]. Если равновесную концентрацию уходящей жидкости обозначить y^*, то степень насыщения или критерий оптимальности имеет следующий вид:

$$\psi = \frac{y - x_2}{y^* - x_2}, \qquad (1)$$

где y и x_2 – концентрации обогащенного и тощего абсорбента соответственно.

Предлагается осуществлять регулирование обобщенного критерия на основании пропорционально-интегрального закона. При этом на вход регулятора будет поступать сигнал рассогласования между текущим значением степени насыщения и заданным. Структурная схема системы стабилизации степени насыщения абсорбента показана на рис. 2.

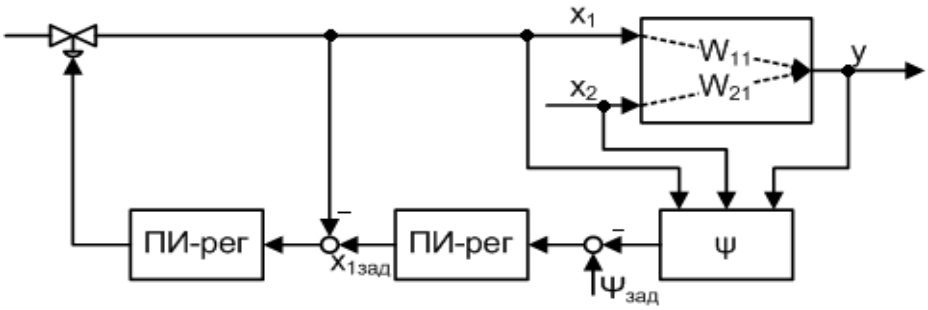


Рис. 2. Структурная схема системы стабилизации степени насыщения абсорбента

Технологическим объектом управления является абсорбер колонного типа, обладающий большим временем запаздывания, что необходимо учитывать при синтезе алгоритма управления, который должен вычислять управляющие воздействия с учетом того, что реакция на них будет наблюдаться лишь через некоторое время, определенное как время запаздывания. Другими словами, алгоритм управления должен оперировать не с текущим значением регулируемой величины, а с прогнозируемым значением, приведенным к настоящему времени.

Таким образом, выражение (1) должно быть записано в виде:

$$\psi = \frac{y(t+\tau) - x_2(t)}{y^* - x_2(t)}, \qquad (2)$$

где t – текущий момент времени; τ – время запаздывания абсорбера.

Одним из методов расчета значения $y(t + \tau)$ является вычисление с использованием математической модели. Эта модель должна в достаточной степени полно отображать протекающие внутри объекта физические процессы и отличаться от модели реального объекта только отсутствием запаздывания. Достоинством такого метода является относительная вычислительная простота, а недостатком является необходимость постоянной корректировки расчетной модели из-за меняющихся свойств реального объекта.

Предлагается вычислять степень насыщения абсорбента в текущий момент времени по формуле:

$$\psi(t) = \frac{\sum_{j=0}^{i} h_{21}(j)\, x_1(i-j)\,\Delta t - x_2(t)}{y^* - x_2(t)}, \qquad (3)$$

где $h_{21}(j)$ – импульсная переходная характеристика объекта управления; $x_1(i - j)$ – величина управляющего воздействия (расход тощего абсорбента); Δt – период дискретизации.

Достоинством данного метода является постоянный учет изменяющихся свойств объекта управления при отсутствии большого количества измеряемых параметров.

Предлагаемая структурная схема алгоритма стабилизации степени насыщения абсорбента показана на рис. 3.

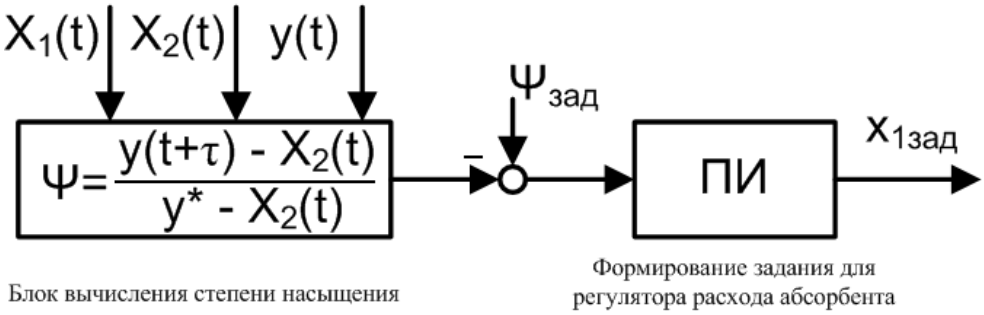


Рис. 3. Структурная схема алгоритма стабилизации степени насыщения абсорбента

В качестве входных параметров используются текущие значения расхода абсорбента на входе в колонну (параметр $x_1(t)$ в соответствии со структурной схемой), концентрации тощего абсорбента (параметр $x_2(t)$) и концентрации обогащенного абсорбента (параметр $y(t)$).

Для функционирования алгоритма управления, основанного на зависимости (3), необходимо измерять значения концентраций на входе и на выходе технологического аппарата, значение расхода тощего абсорбента, и по результатам измерений вычислять величину степени насыщения в виртуальном приборе, являющемся частью программы контроллера.

Работа по созданию виртуального прибора ведется по двум направлениям. Одним из них является создание алгоритма вычисления степени насыщения абсорбента для контроллера, применяемого для управления процессом абсорбции. Другим направлением работы является создание самостоятельного устройства на базе микроконтроллера, что позволит применять алгоритмы управления по обобщенным показателям для других объектов, не оснащенных системами регулирования на базе контроллеров.

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. *Рамм В.М.* Абсорбция газов. – М.: Химия, 1966.

2. *Шевчук В.П.*, *Качегин Д.А.*, *Загребин В.Н.* Система управления процессом абсорбции по степени насыщения абсорбента // Приборы и системы, 2006. – № 7.

ИССЛЕДОВАНИЕ АЛГОРИТМОВ УПРАВЛЕНИЯ ПРОЦЕССОМ ПОЛУЧЕНИЯ АКРОЛЕИНА НА СТАДИИ ДИСТИЛЛЯЦИИ

С.А. Агринская – ассистент кафедры АТП
филиала «МЭИ (ТУ)» в г. Волжском
О.С. Забровская – студентка
филиала «МЭИ (ТУ)» в г. Волжском

В последние годы в свете интенсивного развития различных отраслей промышленности возрастают требования к объемам и качеству продукции химического производства. Высокие производительность и качество продукции при одновременной минимизации производственных затрат в современном химическом производстве невозможны без применения эффективных автоматизированных систем контроля и управления технологическим процессом (АСУ ТП).

Одной из технологических стадий производства метионина на ОАО «ЗОС» является получение акролеина, которая в свою очередь делится на: стадию синтеза; стадию абсорбции; стадию дистилляции и стадию обработки газовых и жидких отходов. Особенностью этого производства является сложность протекающих химических реакций, высокая чувствительность к отклонениям от заданного режима, наличие большого числа точек контроля и управления процессом, а также необходимость мгновенного и соответствующего сложившейся в данный момент обстановке воздействия на процесс.

В ходе выполнения работы проведен детальный анализ технологического процесса получения акролеина на стадии дистилляции. Технологическим объектом управления в данной работе является колонна дистилляции, которая представляет собой вертикальный цилиндрический аппарат (рис. 1).

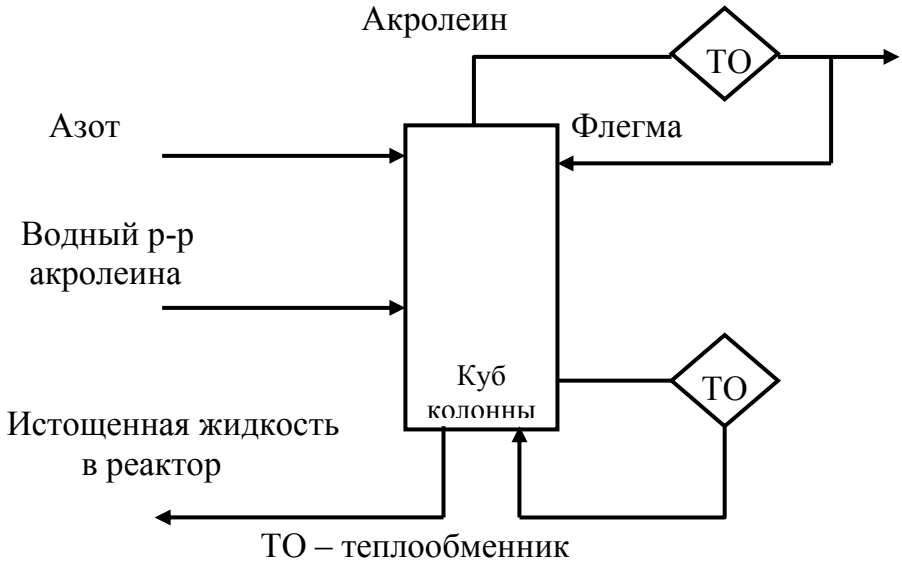


Рис. 1. Колонна дистилляции

Физическая сущность процесса дистилляции заключается в двухстороннем массо- и теплообмене между неравновесными потоками пара и жидкости при высокой турбулизации поверхности контактирующих фаз. В результате массообмена пар обогащается низкокипящими, а жидкость – высококипящими компонентами.

Основной принцип стадии дистилляции заключается в извлечении акролеина методом азеотропной перегонки из четырехпроцентного водного раствора акролеина, поступающего со стадии абсорбции, с предварительным удалением кислорода.

Колонна дистилляции, как объект управления, представляет собой сложную динамическую систему с несколькими взаимосвязанными входными и выходными величинами.

Основной регулируемой величиной, влияющей на качество получения акролеина, является уровень истощенной жидкости в кубе колонны дистилляции. Анализ возмущающих воздействий на объект управления показал, что наиболее влияющим возмущением является расход поступающего в колонну дистилляции водного раствора акролеина, который, в свою очередь, напрямую зависит от уровня водного раствора акролеина в колонне стриппинга.

Применяемые одноконтурные системы регулирования уровня истощенной жидкости в колонне дистилляции и уровня водного раствора акролеина в колонне стриппинга (рис. 2) не позволяют достичь требуемого качества технологического процесса.

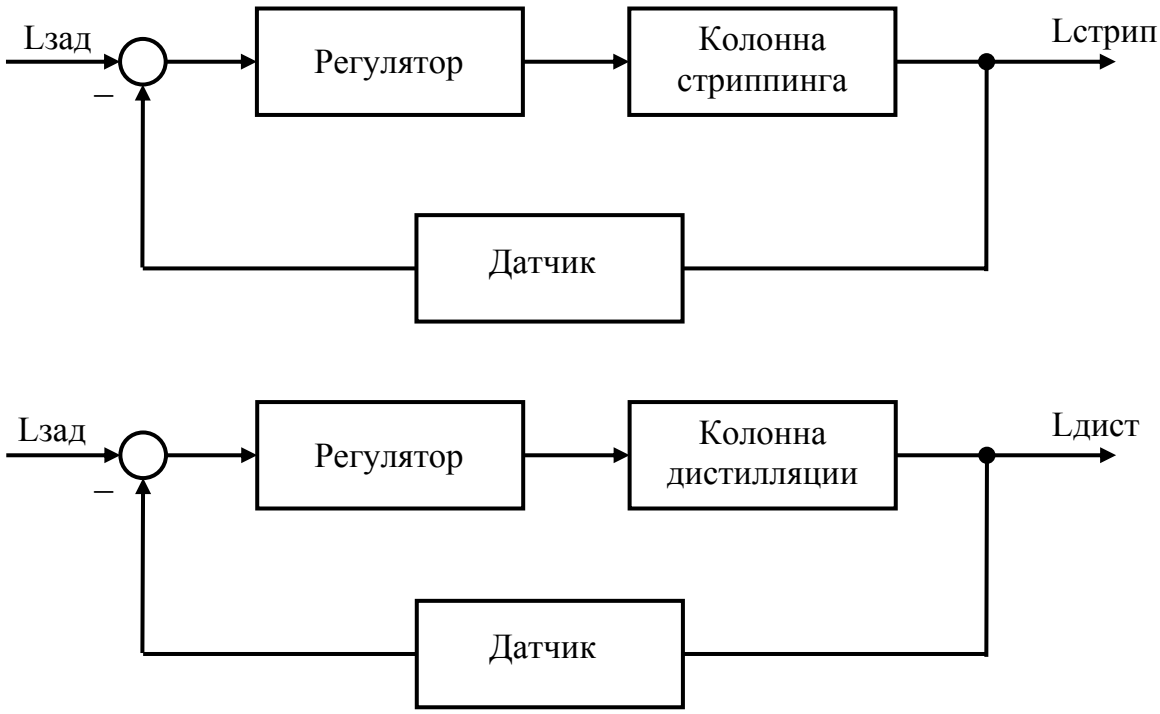


Рис. 2. Структурные схемы одноконтурных систем автоматического управления

Lдист – уровень истощенной воды в колонне дистилляции;
Lстрип – уровень водного раствора акролеина в колонне стриппинга

При существующей структуре систем управления величина перерегулирования уровня в колонне дистилляции составляет 35 %. Для получения требуемого качества продукции не допускается перерегулирование более 15 %, поэтому возникает необходимость разработки многоконтурных систем автоматического контроля и управления.

Учитывая вышеизложенное, была построена структурная схема двухконтурной системы автоматического управления уровнем истощенной жидкости в кубе колонны дистилляции (рис. 3).

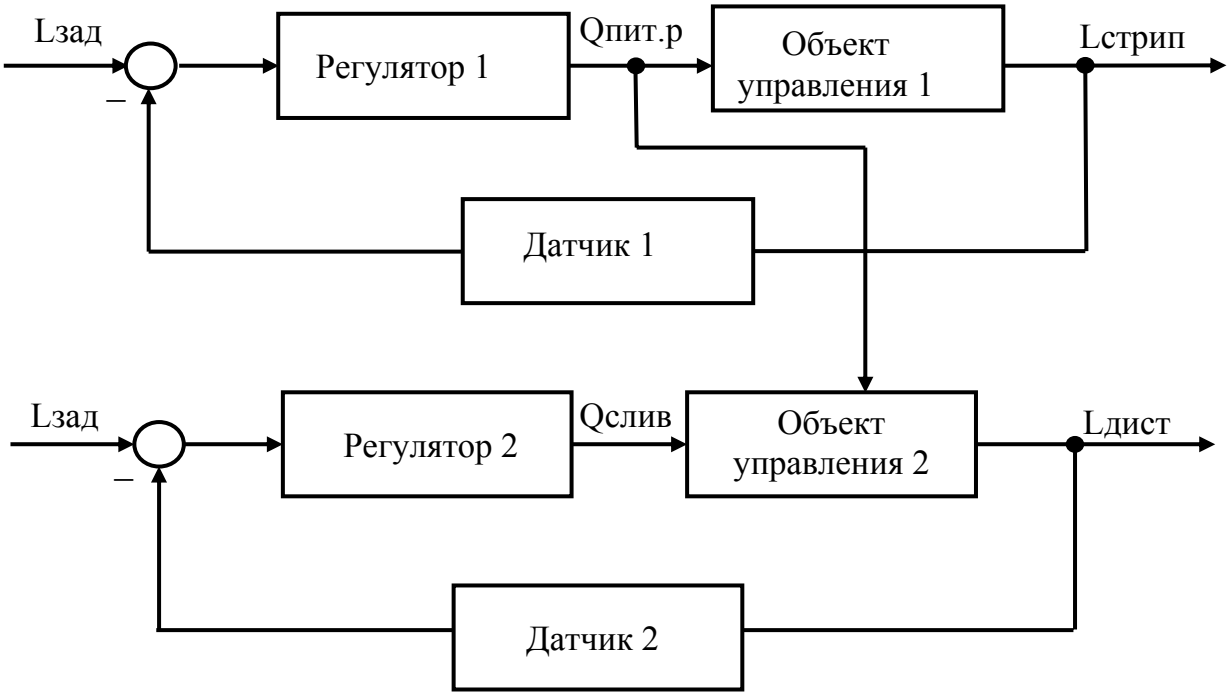


Рис. 3. Структурная схема двухконтурной системы автоматического управления

Одной из причин возникновения погрешностей в системах управления является неполнота получаемой рабочей информации о текущем состоянии объекта управления. Физически неполнота рабочей информации о состоянии объекта в одноконтурных САУ с управлением по отклонению обусловлена тем, что в таких структурах регулятор контролирует лишь конечный эффект действия возмущений на объект – вызванное этим возмущением нежелательное отклонение управляемой величины. В течение промежутка времени между появлением какого-либо возмущения и началом вызванного этим возмущением отклонения управляемой величины регулятор бездействует, несмотря на то, что фактическое состояние объекта уже меняется. Таким образом, неполнота рабочей информации может быть в значительной мере устранена, если осуществлять непосредственный оперативный контроль возмущений.

В связи с этим была составлена двухконтурная система управления уровнем истощенной жидкости с компенсацией по возмущению (рис. 4).

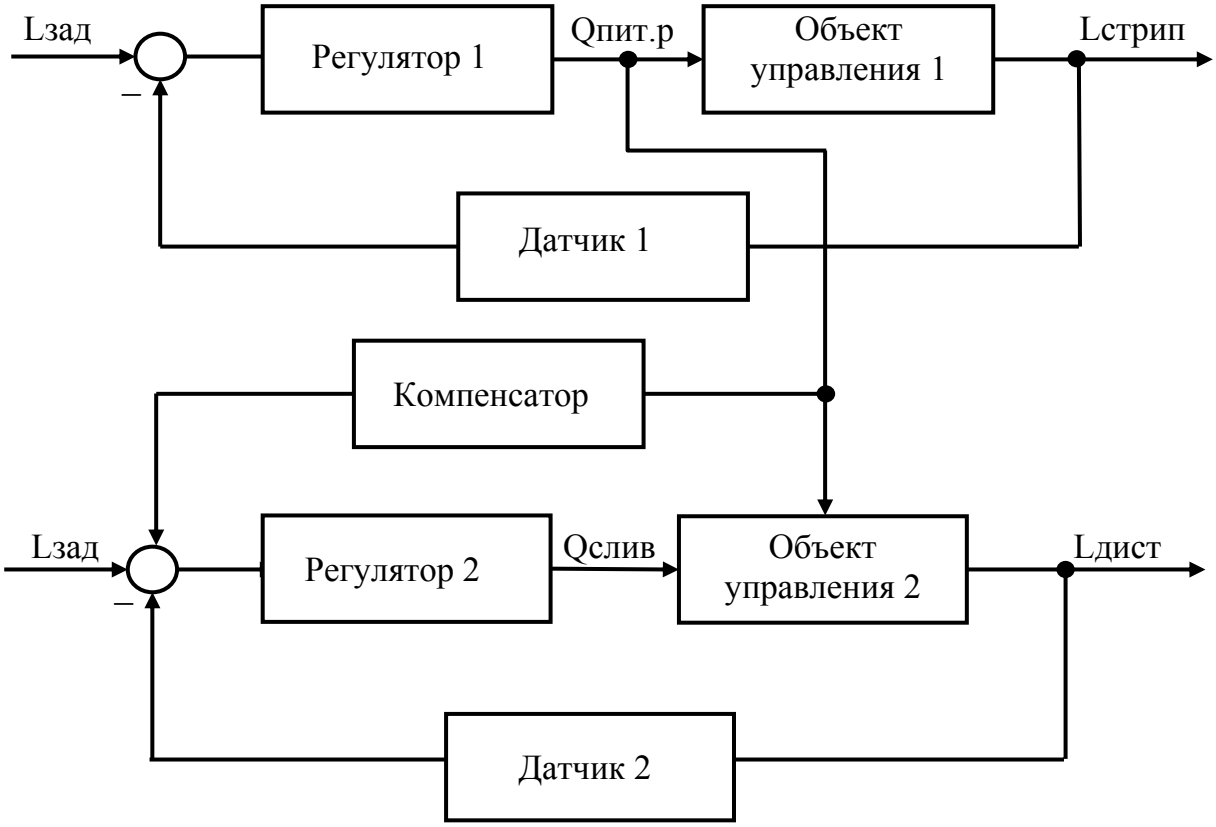


Рис. 4. Структурная схема двухконтурной системы автоматического управления с компенсацией по возмущению

Путем аппроксимации экспериментальных данных составлены математические модели объектов управления. Далее разработаны математические модели двухконтурной системы управления с компенсацией возмущения и без нее. По критерию Найквиста выполнен оптимальный расчет параметров регулятора и построены графики переходных процессов в полученной системе управления (рис. 5).

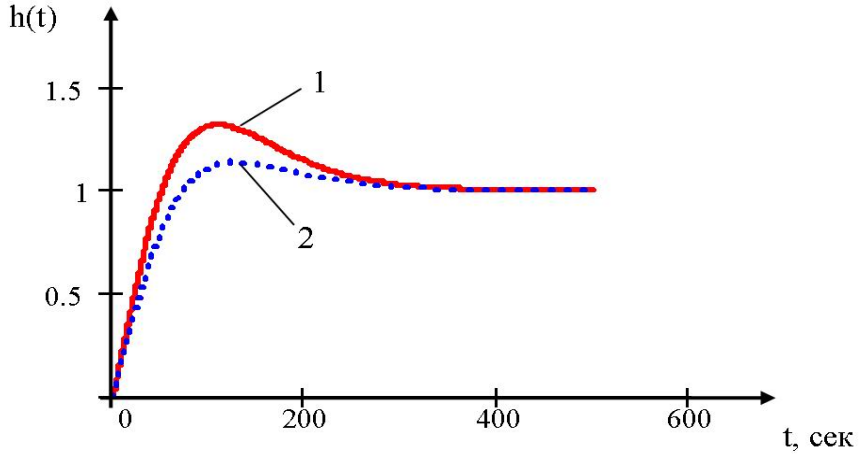


Рис. 5. Графики переходных процессов в системе управления
1 – без компенсации возмущения; 2 – с компенсацией возмущения

Из графиков, приведенных на рис. 5, видно, что величина перерегулирования уровня в колонне дистилляции с системой управления без компенсации возмущения составила 28 %, с компенсацией возмущения – 13 %. Наиболее полно удовлетворила предъявляемым требованиям двухконтурная система с компенсацией возмущения.

Основываясь на результатах проведенных расчетов, сделан вывод, что внедрение в производство двухконтурной системы с компенсацией возмущения позволит снизить колебания уровня в колонне дистилляции с 35 до 13 %.

ЭКСПЕРТНАЯ СИСТЕМА ДИАГНОСТИКИ ТЕХНИЧЕСКОГО СОСТОЯНИЯ ПРИБОРОВ

Е.Н. Гудкова, ***Е.Н. Кириенко*** – аспиранты
Волгоградского государственного технического университета
Г.С. Мазин – студент
филиала «МЭИ (ТУ)» в г. Волжском

На современных крупных предприятиях парк используемых приборов контроля, управления и измерения насчитывает тысячи единиц. Перед службами встают нетривиальные задачи по обслуживанию такого огромного количества приборов небольшим штатом отдела метрологии. В этом случае на помощь призываются современные информационные технологии с применением быстродействующей компьютерной техники.

Анализ проблем, решаемых метрологической службой в процессе своей профессиональной деятельности, показал, что перечень задач можно разделить на четыре группы: административные, исследовательские, экспериментальные и расчетные задачи. На сегодняшний день не создано ни одной информационно-экспертной системы, направленной на автоматизацию деятельности метрологической службы и касающейся такого вида задач, как экспериментальные и исследовательские задачи. Выводы, полученные в результате исследований, позволяют рекомендовать структурную модель экспертной системы такой, чтобы добиваться улучшения показателей качества продукции и уровня автоматизации технологических процессов.

Существующие системы позволяют решать только часть задач отдела метрологии на предприятии. Как правило, решаются только задачи учета и документооборота, сводя все введенные оператором данные в статичную базу и выводя отчеты и бланки, сгруппированные заданным способом. При этом остается открытым вопрос оперативности оценки технического состояния парка приборов.

Исследования показали, что автоматизированное рабочее место (АРМ) метролога должно представлять собой комплексную систему текущего мониторинга технического состояния приборного парка предприятия. Предварительная структура системы представлена на рис. 1.

Здесь информационно-измерительная система – это система приборного оформления каждого производственного участка.

Рис. 1. Структура экспертной системы диагностики технического состояния приборного парка

Система состоит из трех следующих видов обеспечений: информационное, программное и техническое.

Информационное обеспечение представляет собой базу экспериментальных данных и базу технических характеристик. База экспериментальных данных содержит информацию об основных показателях приборов. Эта информация может вводиться в базу экспериментальных данных как в ручном режиме (посредством СУБД), так и в автоматизированном (измерительные средства). На наш взгляд база экспериментальных данных представляет большую ценность, так как на основе ее информации могут быть получены эмпирические модели, связывающие показатели условий эксплуатации приборного парка и его технические характеристики.

Совокупность этих двух баз данных образует базу знаний системы.

Программное обеспечение включает в себя следующие функционально законченные элементы экспертной системы.

• Система управления базой экспериментальных данных: обеспечивает добавление, редактирование, удаление и поиск информации в базе экспериментальных данных.

• Система интеллектуального анализа данных: обеспечивает построение эмпирических моделей на основе базы экспериментальных данных и ведение базы технических характеристик.

• Система прогнозирования и принятия решений: обеспечивает решение на основе базы технических характеристик различных задач диагностики.

• Система формирования выходных документов: обеспечивает формирование на основе базы знаний отчетной документации.

Таким образом, на основе построенной системы можно решать не только задачи документооборота, но и автоматизировать обработку больших объемов информации. Экспертная система диагностики позволяет оперативно находить и использовать любую необходимую информацию о конкретных средствах измерений.

С использованием СУБД базы технических характеристик приборов на протяжении всего срока существования прибора на предприятии автоматически ведется паспорт, содержащий информацию практически обо всех связанных с прибором работах.

Формирование полного перечня средств измерений по различным условиям и полуавтоматическое составление графиков поверки, калибровки, аттестации позволяют создавать план работ по метрологическому обслуживанию приборного парка.

В СУБД технических характеристик приборов решаются задачи регистрации передвижения средств измерений на предприятии и составления уведомлений на сдачу приборов в поверку, калибровку и аттестацию для каждого из подразделений организации, что позволяет сменить организующую роль инженера-метролога на роль, контролирующую процесс работы экспертной системы.

Повысить оперативность принятия решений позволяет система визуализации базы технических характеристик приборного парка. Система представляет собой отображение текущего состояния приборов, закрепленных на оборудовании, и предоставляет для работы оператора механизмы взаимодействия с СУБД базы технических характеристик.

Организация системы визуализации в виде функциональных схем производства, разделенных по участкам, вносит элементы наглядности в работу экспертной системы и одновременно соответствует современным стандартам дружелюбного интерфейса пользователя. Такое соответствие увеличивает скорость обмена информацией между человеком и машиной и не позволяет оператору делать ошибки в своей работе.

Используя экспертную систему диагностики технического состояния приборного парка предприятия, организация повышает эффективность используемого оборудования, равномернее распределяет нагрузку на штат метрологической службы. Кроме того, система позволяет четко вести анализ деятельности службы метрологии предприятия по различным критериям и производить критически важные оценки необходимой численности парка приборов, затрат на метрологическое обеспечение производства и его эффективность.

ВИРТУАЛЬНЫЙ ПРИБОР ДЛЯ ИЗМЕРЕНИЯ СТЕПЕНИ НАСЫЩЕНИЯ АБСОРБЕНТА

Д.А. Качегин – аспирант
Волгоградского государственного технического университета
В.Н. Загребин – аспирант «МЭИ (ТУ)»
И.А. Болдырев – студент
филиала «МЭИ (ТУ)» в г. Волжском

Один из наиболее простых обобщенных критериев говорит о том, что для обеспечения экономичности процесса абсорбции необходимо максимизировать отношение количества фактически поглощенного компонента к тому количеству, которое было бы поглощено в случае противотока при максимально возможном насыщении жидкости, то есть, когда концентрация уходящей жидкости находится в равновесии с поступающим газом (1). Если равновесную концентрацию уходящей жидкости обозначить $x^*_{кон}$, то степень насыщения или критерий оптимальности имеет следующий вид:

$$\psi = \frac{x_{кон} - x_{нач}}{x^*_{кон} - x_{нач}}, \qquad (1)$$

где $x_{кон}$ и $x_{нач}$ – концентрации обогащенного и тощего абсорбента соответственно.

Для работы данного алгоритма необходимо измерять два значения концентрации – на входе и на выходе технологического аппарата, а целевую величину степени насыщения вычислять в виртуальном приборе, создаваемом в теле программы контроллера.

Предлагается осуществлять регулирование обобщенного критерия на основании пропорционально-интегрального закона. При этом на вход регулятора будет поступать сигнал рассогласования между текущим значением степени насыщения и заданным.

Поскольку абсорберы колонного типа обладают большим запаздыванием, то эффективность работы указанного алгоритма, прежде всего, зависит от динамических свойств объекта. Поэтому этот алгоритм должен формировать и выдавать управляющие воздействия с учетом того, что реакция на них будет наблюдаться лишь через некоторое время, определенное как время запаздывания.

Другими словами, алгоритм управления должен оперировать не с текущим значением регулируемой величины, а с прогнозируемым значением, приведенным к настоящему времени и полученным в результате вычислений с использованием математической модели. Причем эта модель должна в достаточной степени полно отображать протекающие внутри объекта физические процессы и отличаться от найденной в работе модели отсутствием запаздывания.

На рис. 1 представлен алгоритм управления абсорбционной установкой с компенсацией динамических свойств или, так называемого, с прогнозом степени насыщения.

Рис. 1. Структурная схема алгоритма управления с компенсацией

В качестве входных параметров используются текущее значение расхода абсорбента на входе в колонну (параметр $x_1(t)$) и текущее значение концентрации тощего абсорбента (параметр $x_2(t)$). Как видно из алгоритма, текущее значение концентрации насыщенного абсорбента $y(t)$ в расчете степени насыщения не используется. Вместо него применяется параметр $y'(t)$, представляющий значение концентрации насыщенного абсорбента в момент времени $t + \tau$.

В указанном алгоритме сигнал рассогласования между прогнозируемым значением управляемой величины и заданием поступает на вход П-регулятора, который вырабатывает управляющее воздействие в виде задания требуемого изменения расхода абсорбента на входе в колонну по следующей зависимости:

$$\Delta Q(t) = k_{рег}\, \varepsilon(t),$$

где $k_{рег}$ – коэффициент пропорциональности регулятора.

Проверка работоспособности алгоритмов управления осуществлена в программном пакете VisSim методом имитационного моделирования процессов управления.

РАЗРАБОТКА ПРОЕКТА ЭКСТРЕМАЛЬНОЙ СИСТЕМЫ РЕГУЛИРОВАНИЯ СООТНОШЕНИЯ «ГАЗ-ВОЗДУХ» ПЕЧИ ВЫДЕРЖКИ БЛЮМОВ

Ф.Б. Зеленский – мастер КИПиА ТПЦ-3
А.С. Солодовников – электромеханик ТПЦ-3
ОАО «Волжский трубный завод»

Печь выдержки блюмов является неотъемлемой частью процесса горячего проката. Она предназначена для восполнения потерь тепла блюмом, произошедших на линии рольганга, в установке гидросбива окалины, а также в процессе резки блюма. В случае разрезания на части блюма, поступающего из нагревательной печи с шагающими балками, исследуемая печь служит для выдержки частей исходного блюма и поддержания их температурного режима на время, необходимое для прошивки первого реза в прессопрошивочной машине.

Существующая система автоматического управления (САУ) печью выдержки блюмов выполнена на базе контроллера SIEMENS CPU 417-4H и включает в себя три контура регулирования:

– контур регулирования расхода газа;
– контур регулирования расхода воздуха;
– контур регулирования температуры в печи.

Структурная схема печи представлена на рис. 1.

Из опыта эксплуатации известно, что контур регулирования температуры является более инерционным по сравнению с контурами расходов. Поэтому в данной системе управления использован каскадный принцип регулирования. То есть система регулирования расхода газа получает сигнал задания от контура регулирования температуры. В свою очередь, контур расхода газа через коэффициент соотношения «газ – воздух» является заданием для контура расхода воздуха.

Регулирование температуры в рабочей зоне печи выдержки блюмов производится путем изменения количества подаваемого топлива – газа. Измерение температуры производится термопарами в двух точках печи: в зоне погрузки и в зоне выгрузки блюмов. Возможен выбор каждого канала измерения температуры, а также регулирование температуры по среднему арифметическому из показаний термопар.

Все три контура используют ПИД-закон регулирования.

Согласно теории горения топлива, существует некоторое оптимальное значение коэффициента соотношения «газ – воздух», при котором расход газа минимальный. Величина этого коэффициента зависит от ряда факторов: качества газа, температуры воздуха, его влажности и др.

Поскольку все эти факторы могут изменяться случайным образом, а также не контролируются непосредственно, имеет место необходимость в создании экстремальной системы регулирования, обеспечивающей оптимальное в данных условиях значение коэффициента. Таким образом, изменение коэффициента соотношения в сторону приближения его к оптимальному значению, а не поддержание его на постоянном уровне, является наиболее предпочтительным, так как обеспечивает максимальную температуру факела, а, следовательно, и экономию топлива при одних и тех же условиях функционирования.

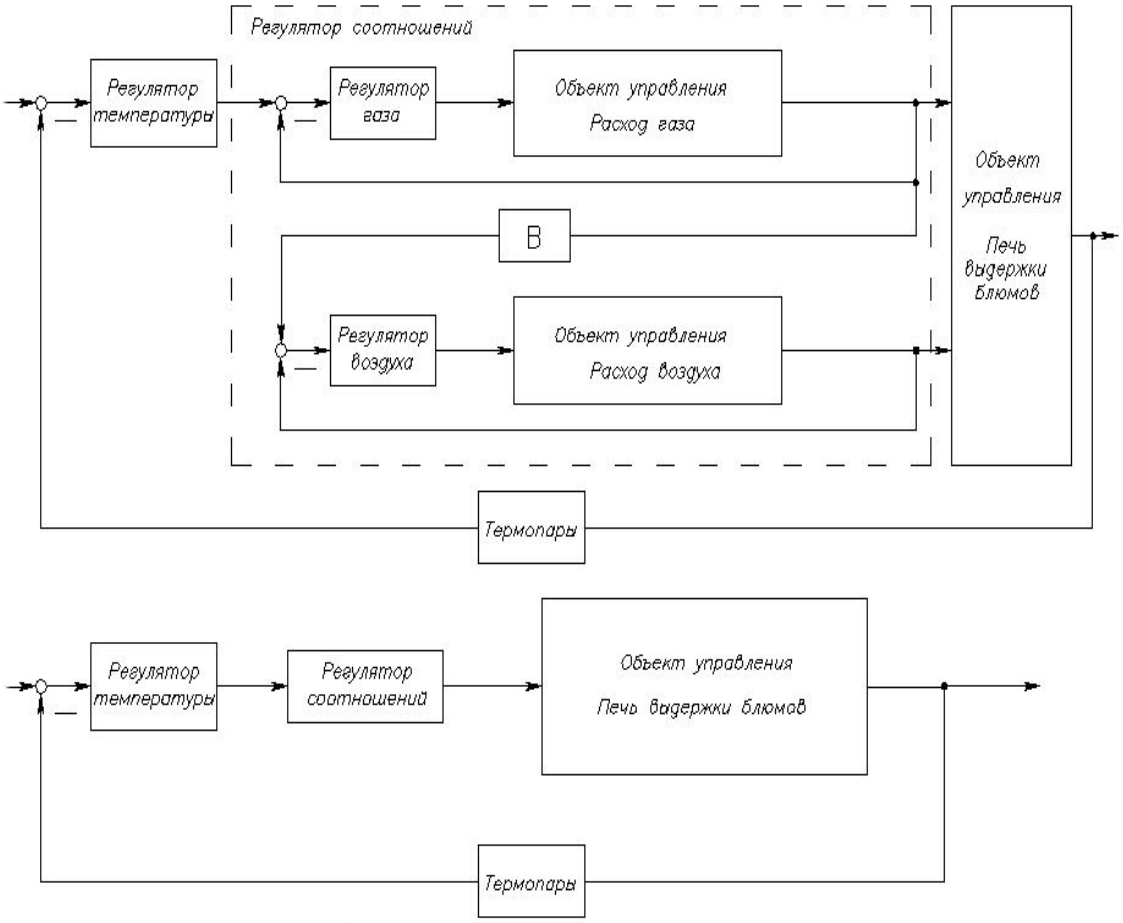


Рис. 1. Схема структурная печи выдержки блюмов

Ограниченные сведения об объекте управления (ОУ) и внешних воздействиях или изменяющиеся во времени свойства объекта и внешние воздействия приводят к понятию самонастраивающихся систем управления (СНС). Особенность этих систем проявляется в том, что для достижения экстремального или заданного уровня критерия качества и последующего поддержания качества на этом уровне изменяются параметры управляющего устройства на основании информации о характеристиках ОУ и внешних воздействиях. В результате система приобретает свойство приспосабливаемости к внешним условиям и с позиции критерия качества сохраняет оптимальный или заданный режим работы при широком диапазоне изменения внешних условий.

Среди поисковых СНС с оптимизацией качества управления широко распространены системы экстремального управления, или экстремальные системы. Отличительным признаком этих систем является наличие у объекта управления статической характеристики с явно выраженным экстремумом, достигаемым при определенных значениях входных сигналов. Эта характеристика во времени не остается неизменной под действием различных причин, которые часто могут быть и неизвестны, может изменяться ее профиль, положение экстремума, экстремальное значение. Однако неизменным остается сам факт наличия экстремума. Система экстремального управления должна по мере изменения статических свойств ОУ, сопровождаемого заранее непрогнозируемыми смещениями экстремальной точки, изменять входные сигналы ОУ таким образом, чтобы они соответствовали экстремальной точке характеристики ОУ и обеспечивали работу объекта в экстремальном режиме.

Достаточно общим выражением различных принципов построения одномерных экстремальных систем является структура, представленная на рис. 2.

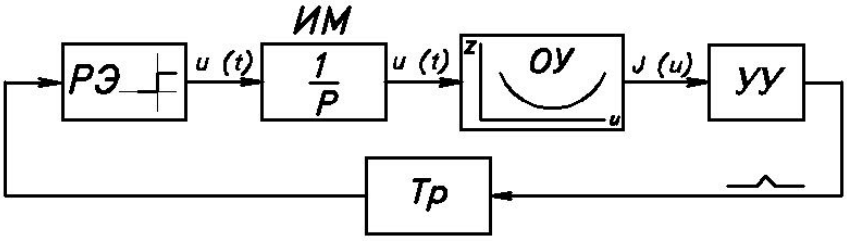


Рис. 2. Одномерная экстремальная система

Схема включает объект управления ОУ, управляющее устройство УУ, триггер Тр, релейный элемент РЭ, исполнительный механизм ИМ. Пусть для определенности необходимо обеспечить минимум функции $J(u)$. Тогда УУ вырабатывает положительный импульс всякий раз, когда выходной сигнал $z(u)$ начинает возрастать.

Триггер работает в счетном режиме (Т – триггер). При срабатывании триггера происходит переключение релейного элемента, что приводит к реверсу исполнительного механизма.

В зависимости от конкретной схемы УУ получают тот или иной конкретный принцип работы системы:

1) системы с дифференцированием, которые реагируют на знак или значение производной $\frac{dJ}{du}$;

2) системы с запоминанием экстремума, реагирующие на разность между наименьшим, достигнутым в предыдущие моменты времени значением функции J и ее текущим значением;

3) системы с задержкой, реагирующие на знак приращения функции за некоторое время;

4) градиентные системы.

Градиентная система является весьма сложной в реализации, так как требуется наличие генератора пробных колебаний и усредняющего фильтра. Она более подходит для реализации многомерных экстремальных систем. Однако мы рассматриваем одномерную систему. Система с запоминанием экстремума и система с задержкой, в свою очередь, представляют собой упрощенный вариант системы с дифференцированием. Данное упрощение является оправданным в условиях недостаточного развития вычислительных устройств, применявшихся в автоматике в конце прошлого века. Контроллер SIEMENS CPU 417-4H позволяет без труда выполнять операцию численного дифференцирования, и соответственно сложность реализации системы с дифференцированием в современных условиях становится решаемой.

На основании проведённого анализа делаем вывод о целесообразности применения системы с дифференцированием, структурная схема которой представлена на рис. 3.

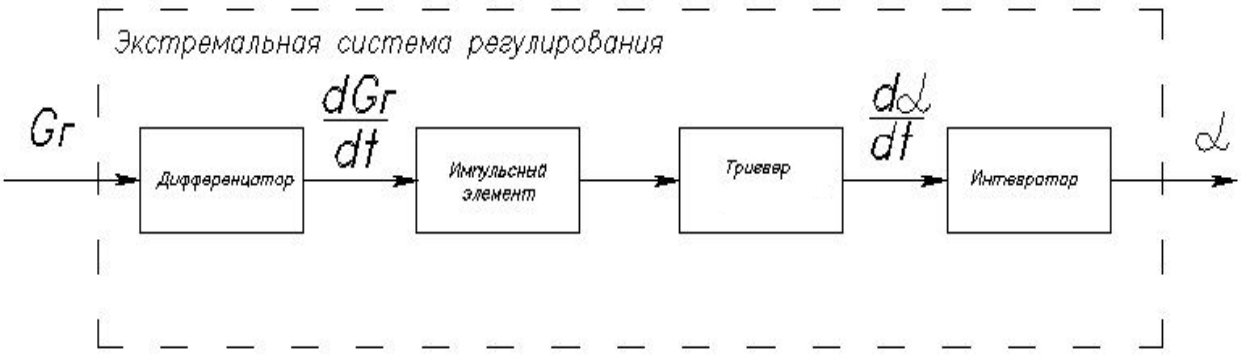


Рис. 3. Структурная схема экстремальной системы

Импульсный элемент вырабатывает единичный импульс всякий раз, когда расход газа $\frac{dG_Г}{dt} > 0$. Триггер переключает «плюс один» и «минус один» по каждому входному импульсу. «Плюс один» означает положительную производную $\frac{d\alpha}{dt}$, то есть увеличивает значение α. «Минус один» – отрицательную производную, то есть уменьшение значения α. Здесь $G_Г$ – расход газа, а α – коэффициент соотношения.

Для создания подобной системы необходимо наличие математической модели, связывающей текущее значение α с потребным расходом газа. Поскольку аналитически получить такую модель затруднительно, разработаем эмпирическую модель.

Эмпирическую модель разработаем по экспериментальным данным, полученным для двух характерных периодов эксплуатации печи, для которых наиболее заметны отличия в оптимальных значениях α. Воспользуемся экспериментальными данными, полученными в летний и зимний период.

Разработка экспериментальных данных по зависимости потребного расхода газа от коэффициента α приведена на рис. 4.

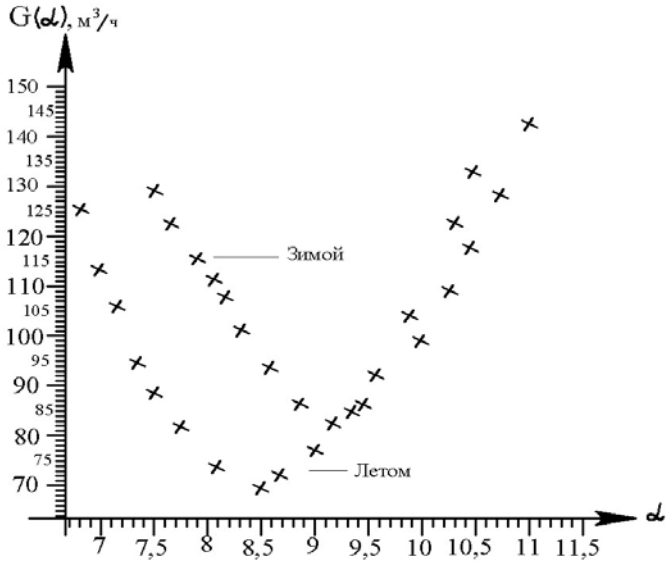


Рис. 4. Экспериментальные значения расхода газа
в летний и зимний период

После получения вида экстремальной зависимости производилось получение передаточной функции объекта управления по каналу «расход газа – температура в печи» посредством анализа данных идентификации объекта методом активного эксперимента.

В завершение была построена система автоматического управления в среде VisSim, приведенная на рис. 5.

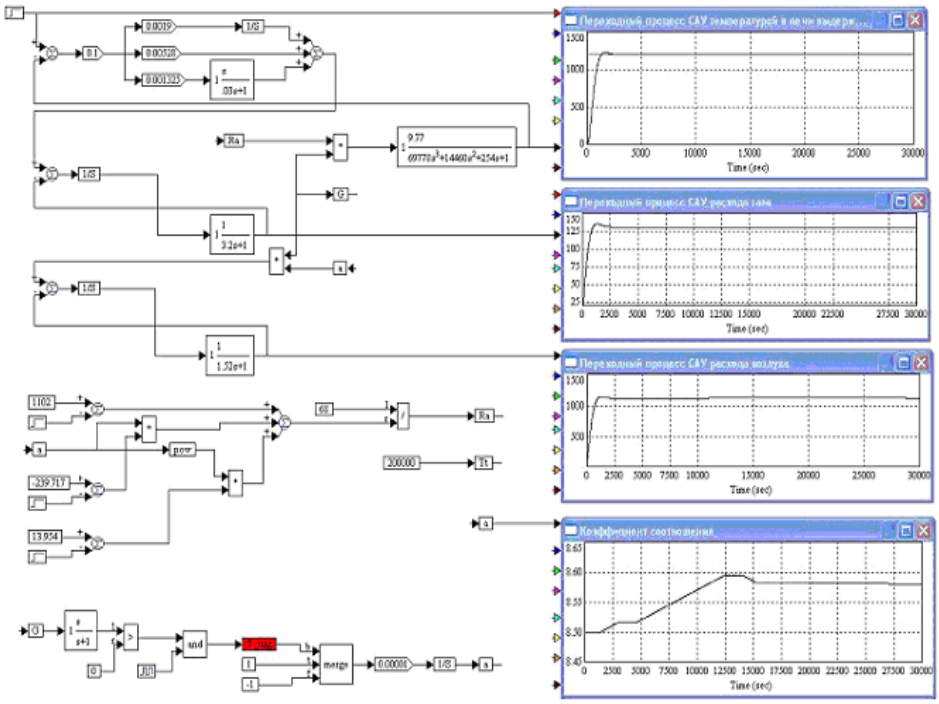


Рис. 5. Модель экстремальной системы в программе VisSim v5

ИССЛЕДОВАНИЕ СИСТЕМЫ ТЕРМОСТАТИРОВАНИЯ ФОРМУЮЩЕГО ИНСТРУМЕНТА ДЛЯ ИЗГОТОВЛЕНИЯ ИЗДЕЛИЙ ИЗ ПОЛИМЕРНЫХ МАТЕРИАЛОВ

В.П. Шевчук – д-р техн. наук, профессор
филиала «МЭИ (ТУ)» в г. Волжском
Ю.С. Мясникова – студентка
филиала «МЭИ (ТУ)» в г. Волжском

Система термостатирования формы для литья пластмассовых изделий несёт ответственность за равномерное охлаждение отливки по всей её поверхности. Это чрезвычайно сложно, если учесть то, что чаще всего создаются изделия с неравномерной толщиной по всей форме, многогнездность большинства форм, а также другие факторы.

Основными тепловыми процессами, циклически повторяющимися и происходящими при охлаждении отливок, являются:

– теплопередача от расплава к поверхности металлической формы;

– теплоотдача от нагретого металла к хладоагенту (вода);

– отвод теплоты хладоагентом и теплоотдача от формы в окружающую среду.

Равномерность охлаждения изделия влияет на образование структуры изделия, величину и характер внутренних напряжений и многое другое.

По возможности необходимо обеспечить одновременное окончание охлаждения отливки по всей ее поверхности. Это устраняет главную причину коробления изделия. Следовательно, если заранее знать температурное поле по всей поверхности в соответствующие моменты времени, то появляется возможность его скорректировать. То есть система термостатирования должна регулировать температуру формы, поддерживая ее на необходимом уровне.

Для поддержания температурного поля формы плоских изделий рассмотрим расположение каналов с боковым щелевым впуском (рис. 1). Такое расположение каналов охлаждения используется для габаритных изделий. Система охлаждения формы является той органической частью системы термостатирования, через которую оказывается воздействие на охлаждаемую отливку. Именно эта система охлаждения является одной из основных, обеспечивающих работоспособность форм. Если отдача тепла идет от расплава к хладагенту через соответствующие ступени, то соответственно охлаждение начинается с охлаждения металла формообразующей поверхности. Следовательно, если охлаждение пресс-формы (1 ступень отвода тепла – непосредственно вблизи к охлаждающим каналам) произошло неравномерно, то далее искажение температурного поля пойдет более интенсивно.

Целью данной работы является моделирование процесса охлаждения пресс-формы, которая представляет собой объект с распределёнными параметрами в двумерном приближении.

Данная модель охлаждения пресс-формы содержит производные по двум координатам, отображая распределение физических величин по сечению.

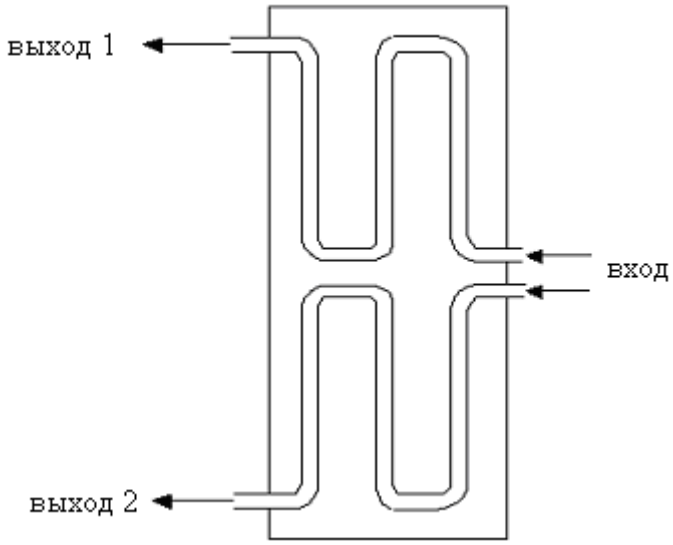


Рис. 1. Расположение каналов охлаждения в формах для плоских изделий с боковым щелевым впуском (заложен змеевик)

Математическое описание с помощью дифференциального уравнения теплопроводности в частных производных имеет довольно сложное аналитическое решение, которое часто не имеет смысла, если не введена последовательность ограничений и допущений, что в данном случае недопустимо.

Таким образом, аналитический метод является нерациональным, так как результат можно получить лишь перебором множества допустимых решений и только для простейших систем.

Численные методы решения задач являются более приемлемыми и результативными. Одним из методов решения является разностный метод или метод Эйлера, который позволяет решить дифференциальные уравнения в частных производных для построения многомерных моделей с распределёнными параметрами.

Математическую модель рассматриваемого объекта сведём к уравнению теплопроводности квадратной пластины в двумерном приближении:

$$\frac{\partial \Theta}{\partial t} = a\left(\frac{\partial^2 \Theta}{\partial x^2} + \frac{\partial^2 \Theta}{\partial y^2}\right).$$

Шаблон аппроксимации уравнения теплопроводности в двумерном приближении учитывает отвод тепла от рассматриваемой точки в данный момент с 4-х сторон (рис. 2).

Моделирование объекта осуществлено в среде MathCad, в которой совокупность уравнений состояния и начальных условий можно решить методом Рунге-Кутта.

Выбрав на шаблоне расположение охлаждающих каналов в пресс-форме, получаем матрицу распределения температур в пресс-форме, то есть систему термостатирования. Температурное поле, распространяющееся от хладагента, охватывает большую часть пресс-формы, но опять таки не обеспечивает 100 % равномерного распределения.

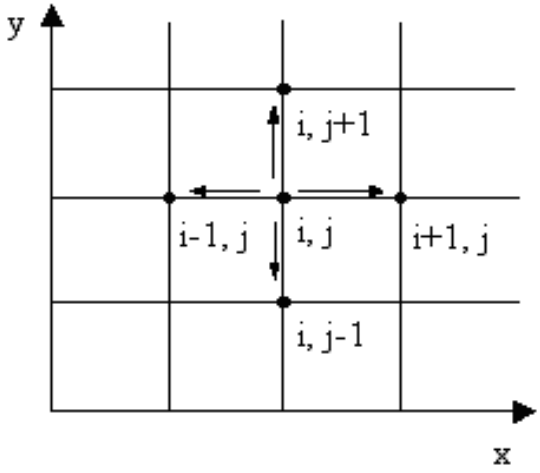


Рис. 2. Шаблон аппроксимации уравнения теплопроводности в двумерном приближении

Таким образом, с помощью численных методов решения исходного дифференциального уравнения в частных производных промежуточных обыкновенных дифференциальных уравнений была получена математическая модель температурного поля системы термостатирования пресс-формы.

Данная модель позволяет заранее просмотреть ход охлаждения и равномерно проводить снижение температуры отливки по всей её поверхности.

Математическая модель является работоспособной и сходится. Она может быть использована для создания систем неразрушающего контроля за системой термостатирования.

СЕКЦИЯ № 4
МОДЕЛИРОВАНИЕ ОБЪЕКТОВ ЭНЕРГЕТИКИ

Руководители секции: ***Амосов Андрей Авенирович***
д-р техн. наук, профессор
Капля Егор Викторович
канд. физ.-мат. наук, доцент

ВИРТУАЛЬНЫЙ ПРИБОР ДЛЯ ИЗМЕРЕНИЯ, УЧЕТА И КОНТРОЛЯ КОЛИЧЕСТВА ПОТРЕБЛЕННОЙ ТЕПЛОВОЙ ЭНЕРГИИ

Е.В. Коровина – аспирантка
кафедры ИИТ «МЭИ (ТУ)»

Повышение степени автоматизации управления современным производством, усложнение технологических процессов, увеличение объемов информации, подлежащей обработке, привело к необходимости контролировать все более и более сложные параметры технологических и производственных процессов – технико-экономические показатели (ТЭП). Особенностью ТЭП является то, что зачастую не существует датчиков или приборов, позволяющих непосредственно получить их значения, в связи с чем оценка значения технико-экономического параметра осуществляется посредством косвенных измерений. Для измерения текущих значений ТЭП используются информационно-измерительные системы (ИИС), осуществляющие основные стадии процедуры измерения. При этом возникает проблема рациональной обработки информации в информационно-измерительных системах.

Системы теплоучета необходимы сейчас как потребителям тепла, так и его поставщикам. Их внедрение позволяет получить реальную картину теплопотребления и решить все спорные финансовые вопросы при расчетах за тепло. Перспективность этой работы подтверждается тем, что с ростом цен на газ, электроэнергию и воду за последние два года произошло увеличение тарифа за тепловую энергию. Аналогично повысилась стоимость горячей и холодной воды.

Недостатком существующих технических средств, предназначенных для определения количества потребленного тепла, является то, что они не учитывают систематическую методологическую погрешность измерения, которая определяется формулой расчета тепловой энергии. В связи с этим предлагается создать виртуальный прибор, в котором будет устранен названный недостаток. А также для повышения качества и достоверности измерения количества потребленного тепла будет предложен алгоритм оптимизации параметров измерительных каналов.

Структурная модель виртуального прибора показана на рис. 1.

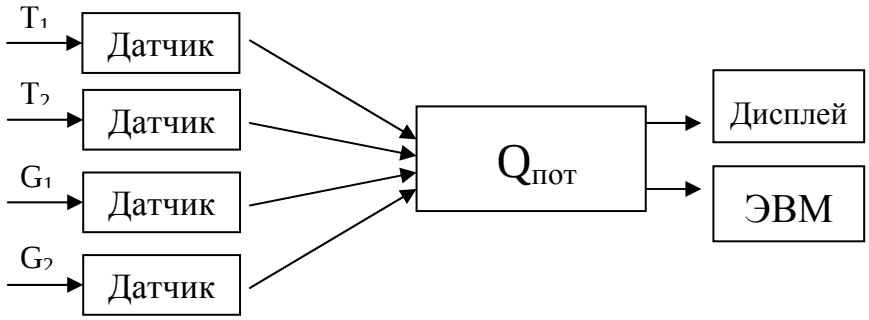


Рис. 1. Структурная модель системы измерения, контроля и учета тепла

Математическую модель сигнала и помехи можно представить в виде корреляционной функции, поскольку данные процессы являются случайными:

$$K_x(\tau) = D_x e^{-\alpha|\tau|}, \qquad K_n(\tau) = D_n e^{-\beta|\tau|},$$

где D_x, D_n – соответственно дисперсии измеряемого сигнала и помехи; α, β – соответственно коэффициенты, характеризующие скорость убывания корреляционной функции измеряемого сигнала и помехи.

В качестве помехи измерения будем также рассматривать помеху типа «белый шум» с корреляционной функцией вида $K_n(\tau) = S\delta(t)$, где S – спектральная плотность помехи; $\delta(\tau)$ – дельта-функция.

Для построения математической модели был проведен эксперимент, в результате которого были получены данные об изменении температуры и расхода прямой и обратной воды. При обработке использовались экспериментальные данные за время наблюдения, равное 5-ти суткам.

По полученным данным были построены и аппроксимированы корреляционные функции для всех каналов.

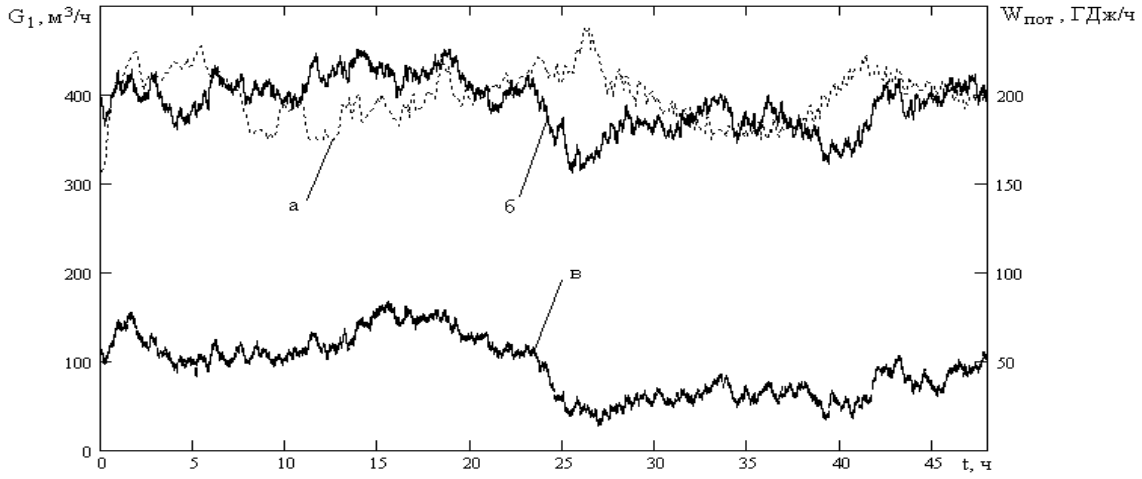


Рис. 2. Графики изменения:

а – расхода прямой воды, полученного по экспериментальным данным;

б – расхода прямой воды, смоделированного в канале;

в – количества тепла, смоделированного системой

В соответствии с этапами преобразования измерительной информации в структуре измерительного канала, ИИС будет иметь вид, показанный на рис. 3.

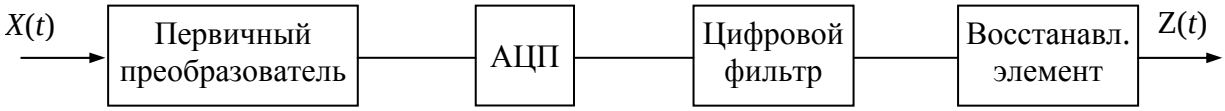


Рис. 3. Структура типового измерительного канала, предназначенного для прямых динамических измерений

Имитация каждого канала проводилась в среде MathCad. Полученные модели для всех каналов были проверены на адекватность.

Потребленное тепло определяется как разность между поступившим потребителю и возвращенному от него:

$$Q_{пот} = G_1 \cdot T_1 \cdot c_p - G_2 \cdot T_2 \cdot c_p, \qquad (1)$$

где G_1, G_2 – расход теплоносителя в подающем и обратном трубопроводах; T_1 и T_2 – температуры воды в подающем и обратном трубопроводах; c_p – средняя изобарная теплоемкость воды.

По зависимости (1) была произведена имитация работы системы и проверка на адекватность. На рис. 2, *в* показан график изменения количества тепла, полученного моделированием системы. Исследования показали, что модель измерительной системы адекватна реальным процессам.

Критерием оптимизации при параметрическом синтезе информационно-измерительных систем является минимум погрешности измерений, при этом сама погрешность должна быть выражена как функция параметров ИИС и измеряемых сигналов.

Максимальное значение относительной средней квадратичной погрешности определения искомой величины в случае помехи типа «белый шум» равно:

$$\eta_y^{макс} = \left[\frac{q^2}{12D_x} \cdot \frac{T_s}{2T_f - T_s} + \frac{T_s}{2T_f - T_s} \left[\left(\frac{S}{2T_p D_x} - \frac{\alpha T_p}{1-(\alpha T_p)^2} \right) \times \right.\right.$$

$$\left. \times \frac{T_f + e^{-T_S/T_P}(T_f - T_s)}{T_f - e^{-T_S/T_P}(T_f - T_s)} + \frac{1}{1-(\alpha T_p)^2} \cdot \frac{T_f + e^{-\alpha T_S}(T_f - T_s)}{T_f - e^{-\alpha T_S}(T_f - T_s)} \right] -$$

$$\left. - \frac{2}{D_x} \min\left[K_{yz}^0(0), K_{yz}^1(0)\right] + 1 \right]^{\frac{1}{2}}. \qquad (2)$$

В выражение для погрешности (2) входят такие величины, как уровень квантования, постоянная времени датчика, скорость убывания и дисперсия сигнала. Эти параметры не могут быть оптимизированы. Постоянная времени

фильтра и период дискретизации могут меняться в широких пределах. От их значений в большей степени зависит относительная средняя квадратичная погрешность. Поэтому в качестве параметров оптимизации были выбраны именно эти. Задачу оптимизации можно выразить математически следующим образом:

$$\begin{cases} \min\limits_{T_f,\,T_s} \eta_x^{макс}\left(T_f, T_s\right) \\ T_s \geq 0{,}33 \\ 1 \leq T_f \leq 100 \end{cases}$$

В работе [1] приведен алгоритм, предназначенный для расчета оптимальных значений периода опроса T_s и постоянной времени фильтра T_f при заданной допустимой погрешности $\eta_{x\,доп}^{макс}$ цифровой обработки измерительной информации. Блок-схема описанного алгоритма представлена на рис. 4.

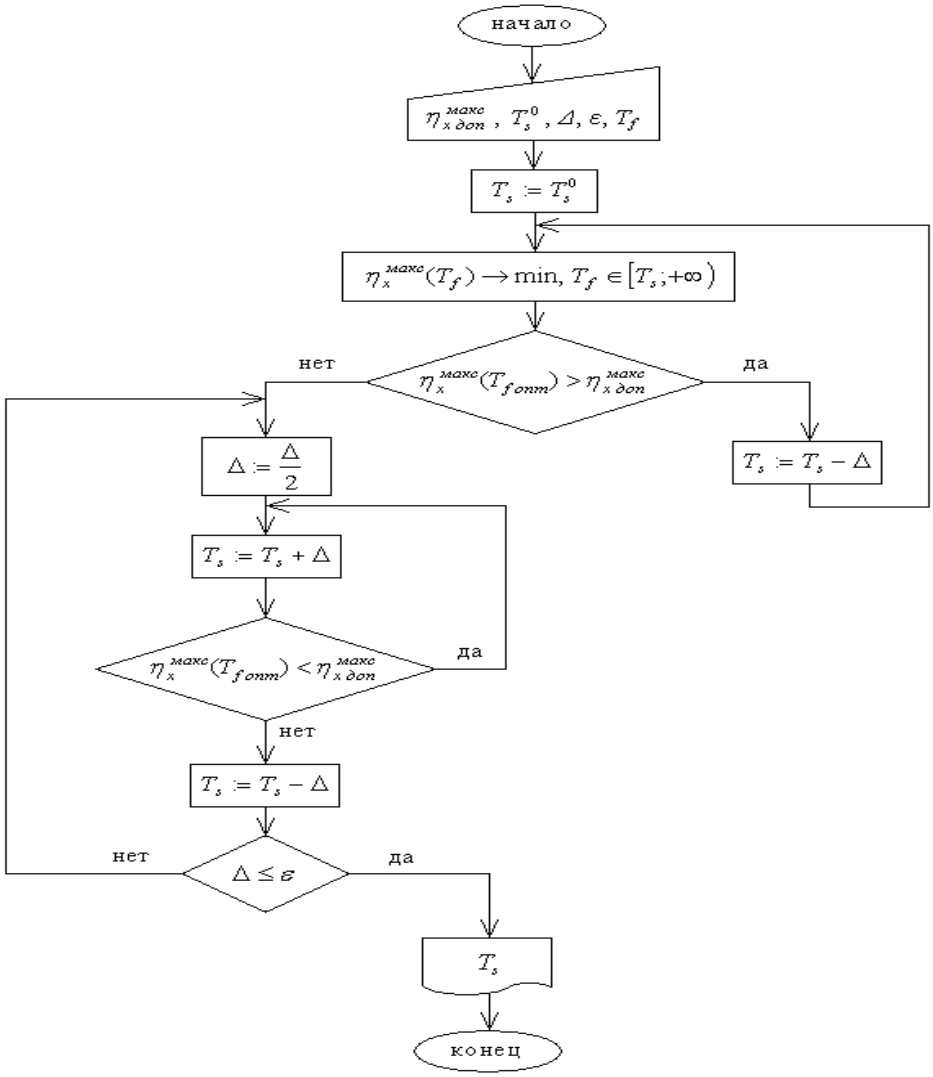


Рис. 4. Блок-схема алгоритма параметрического синтеза оптимального фильтра

Разработаны структурные и математические модели каналов измерения температуры и расхода прямой и обратной воды, на их основе построена модель измерительной системы. Произведена имитация работы каналов системы, проверка на адекватность, а также предложена методика параметрического синтеза оптимальных фильтров для данного класса систем.

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. *Шевчук В.П.*, *Капля В.И.*, *Желтоногов А.П.*, *Лясин Д.Н.* (под общей редакцией академика метрологической академии России, профессора *Шевчука В.П.*). Метрология интеллектуальных измерительных систем: Монография / ВолгГТУ, Волгоград, 2005.

МОДЕЛИРОВАНИЕ РАСПРОСТРАНЕНИЯ АКУСТИЧЕСКИХ ВОЛН В ОБРАЗЦЕ С ПЛОСКОЙ ТРЕЩИНОЙ

В.П. Шевчук – д-р техн. наук, профессор
филиала «МЭИ (ТУ)» в г. Волжском
Е.В. Капля – канд. физ.-мат. наук, доцент
филиала «МЭИ (ТУ)» в г. Волжском
Ю.Е. Пронкина – ОАО «Волжский трубный завод»
М.А. Матыченко – аспирант
Волгоградского государственного технического университета

ВВЕДЕНИЕ

Акустические волны, встречая дефекты материала, отражаются, преломляются и рассеиваются, изменяя при этом свою амплитуду, фазу и другие параметры. Этот факт позволяет успешно использовать ультразвуковые волны для неразрушающего контроля материалов.

СТРУКТУРА ИНФОРМАЦИОННО-ИЗМЕРИТЕЛЬНОГО КАНАЛА АКУСТИЧЕСКОГО ДЕФЕКТОСКОПИЧЕСКОГО КОНТРОЛЯ

Источник ультразвуковых сигналов, исследуемый образец и приёмник ультразвука образуют измерительный канал (рис. 1):

Рис. 1. Структура канала:

$P_1(t)$ – временная зависимость давления, созданного сгенерированной ультразвуковой волной, при входе в исследуемый образец; $P_2(t)$ – временная зависимость давления, созданного ультразвуковой волной, на выходе из исследуемого образца в месте установки приёмника; $A_1(\omega)$, $A_2(\omega)$ – амплитудно-частотные характеристики ультразвуковой волны на входе и выходе

Передаточная функция сигнала для исследуемого образца имеет вид:

$$K(\omega) = A_2(\omega)/A_1(\omega). \qquad (1)$$

Распространение плоских акустических и электромагнитных волн вдоль оси Oz в неоднородной среде с учётом диссипации определяется волновым уравнением:

$$\frac{\partial^2 P}{\partial z^2} - \frac{1}{v^2} \cdot \frac{\partial^2 P}{\partial t^2} - \alpha \cdot \frac{\partial P}{\partial t} - \beta \cdot P = 0, \qquad (2)$$

где $P \equiv P(z,t)$ – давление, созданное акустической волной в слое с координатой z в момент времени t; $\vec{v} \equiv \vec{v}(z,\omega)$ – скорость распространения частотной составляющей волнового пакета; ω – круговая частота составляющей; $\alpha \equiv \alpha(z,t,\omega)$, $\beta \equiv \beta(z,t,\omega)$ – коэффициенты, характеризующие затухание частотной составляющей волнового пакета.

В однородной среде параметры α и β не зависят от координат и времени. Скорость продольной ультразвуковой волны в твёрдых и газообразных средах определяется формулами:

$$v(z) = \sqrt{E(z)/\rho(z)}, \quad v(z) = \sqrt{\gamma \cdot R \cdot T/\mu}. \qquad (3)$$

ЧИСЛЕННОЕ РЕШЕНИЕ

В результате аппроксимации уравнение (2) приводит к трёхслойной разностной схеме:

$$\begin{aligned} &\frac{P_{i+1,\,j} - 2 \cdot P_{i,\,j} + P_{i-1,\,j}}{\Delta z^2} - \frac{1}{v_i^2} \cdot \frac{P_{i,\,j+1} - 2 \cdot P_{i,\,j} + P_{i,\,j-1}}{\Delta t^2} - \\ &- \alpha_{i,\,j} \cdot \frac{P_{i,\,j+1} - P_{i,\,j-1}}{2 \cdot \Delta t} - \beta_{i,\,j} \cdot P_{i,\,j} = 0. \end{aligned} \qquad (4)$$

В узлах (j + 1)-го слоя величина $P_{i,\,j+1}$ определяется значениями из j-го и (j – 1)-го слоёв с помощью явной схемы:

$$P_{i,\,j+1} = \frac{F_1(z_i) \cdot \left(P_{i+1,\,j} + P_{i-1,\,j}\right) + F_2(z_i) \cdot P_{i,\,j} + F_3(z_i) \cdot P_{i,\,j-1}}{F_4(z_i)}. \qquad (5)$$

Для лаконичности в (5) введены обозначения:

$$F_1(z) = v(z)^2 \cdot \Delta t^2, \qquad F_3(z) = \Delta z^2 \cdot \left(\frac{1}{2} \cdot \alpha(z) \cdot v(z)^2 \cdot \Delta t - 1\right). \qquad (6)$$

$$F_2(z) = 2 \cdot \left(\Delta z^2 - v(z)^2 \cdot \Delta t^2\right), \quad F_4(z) = \Delta z^2 \cdot \left(\frac{1}{2} \cdot \alpha(z) \cdot v(z)^2 \cdot \Delta t + 1\right). \qquad (7)$$

На дискретной сетке начальные условия определяют первые два слоя:

$$P_{i,\,0} = P(z,0), \qquad P_{i,\,1} = P_{i,0} + \Delta t \cdot \left.\frac{\partial P(z,t)}{\partial t}\right|_{t=0}. \tag{8}$$

Значения функции $P(z,t)$ на границах рассматриваемой пространственной области будем считать неизменными. Граничные условия для уравнения (2) представляются в форме:

$$\left.\frac{\partial P}{\partial z}\right|_{z=\min(z)} = 0, \qquad \left.\frac{\partial P}{\partial z}\right|_{z=\max(z)} = 0. \tag{9}$$

В этом случае акустические волны не способны покинуть рассматриваемую пространственную область. Приближаясь к границам области, волны отражаются от них. Целесообразно использование граничных условий с учётом двух соседних узлов:

$$P_{0,\,j+1} = \frac{1}{3}\cdot\left(4\cdot P_{1,\,j+1} - P_{2,\,j+1}\right), \quad P_{ki,\,j+1} = \frac{1}{3}\cdot\left(4\cdot P_{ki-1,\,j+1} - P_{ki-2,\,j+1}\right). \tag{10}$$

Стартовые позиции волнового пакета необходимо выбирать вдали от расположения слоёв неоднородности среды, потому что только в этом случае для задания начальных условий можно использовать известные аналитические решения уравнения (2).

По заданным начальным и граничным условиям, с использованием соотношений на разрыве, определяются значения $P(z,t)$ на всей ограниченной пространственно-временной области.

На тех участках, где ожидается или наблюдается в процессе решения резкое изменение искомой функции, шаг сетки уменьшают с целью достижения большей точности расчётов. Уменьшение шага сетки особенно имеет смысл вблизи неоднородностей среды.

При моделировании толстый слой неоднородности можно заменить множеством дискретных барьеров, повторяющих профиль распределения характеристик в слое неоднородности.

РЕЗУЛЬТАТЫ РАСЧЕТОВ

Рассмотрим стальную деталь с плотностью $\rho_0 = 7\,800\ \text{кг/м}^3$ и модулем упругости $E_0 = 20{,}6\cdot 10^{10}\ \text{Н/м}^2$. Коэффициент поглощения примем равным $\alpha_0 = 10^{-3}$. Будем считать, что трещина заполнена водой $\rho_d = 1\,000\ \text{кг/м}^3$, $E_d = 0{,}7\cdot 10^{10}\ \text{Н/м}^2$, $\alpha_d = 10^{-2}$. Пусть трещина имеет ширину 4 мм, координаты трещины: $\varsigma_1 = 0{,}050$ м, $\varsigma_2 = 0{,}054$ м. Пусть частота ультразвуковой волны 2 МГц, тогда $\lambda \approx 2{,}57$ мм.

Начальные условия представим в виде:

$$P(z,0) = P \cdot \operatorname{sech}\left(\frac{z - zo}{L}\right) \cdot \cos\left(\frac{2\pi}{\lambda(z)} \cdot z\right), \qquad (11)$$

где $L = 25 \cdot 10^{-4}$ м – параметр, определяющий ширину волнового пакета; $zo = 0{,}02$ м – начальная координата центральной части волнового импульса; $P = 10^3$ Па – амплитуда давления; $\lambda(z) = v(z)/\nu$ – длина волны в окрестности z.

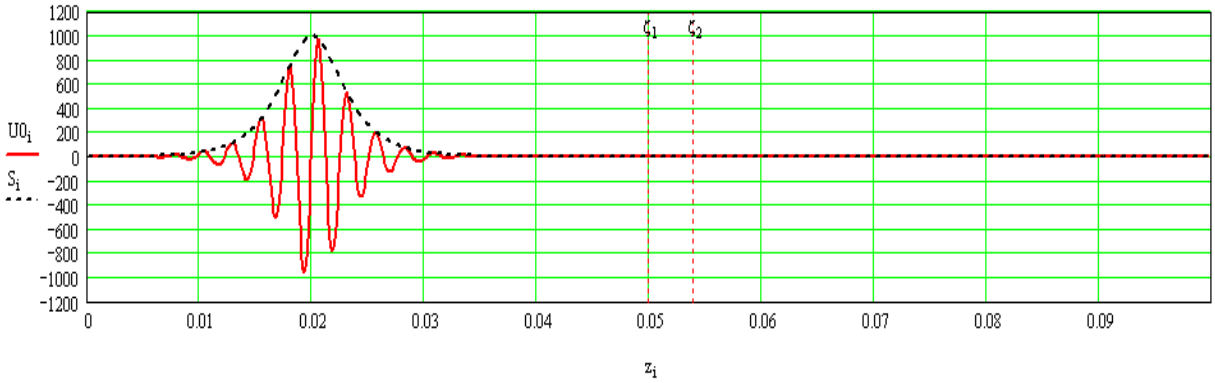


Рис. 2. Начальные условия

Решение проведём с шагом $\Delta t = 10^{-8}$ с. Результаты расчётов профиля волны для $t = 0, 5, 10$ мкс показаны на рисунке 3.

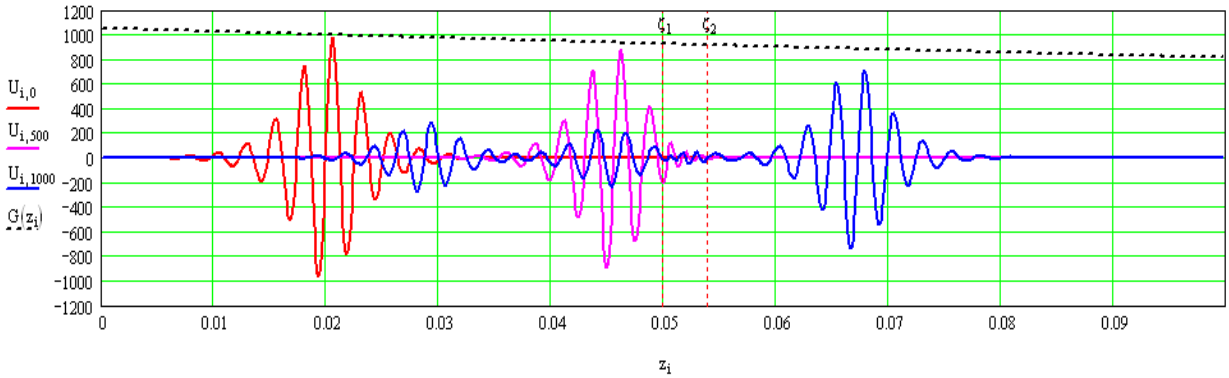


Рис. 3. Динамика волнового пакета

Пунктирной линией показана амплитуда огибающей волнового пакета в отсутствии дефекта.

Процесс распространения волны представлен на пространственно-временной карте (рис. 4). Волна преодолевает трещину, однако видны волновые пакеты, отражённые от передней и задней поверхностей трещины.

Если трещина заполнена воздухом с молярной массой $\mu = 0{,}029$ кг/моль и коэффициентом адиабаты $\gamma = 1{,}4$ Н/м^2 при температуре $T = 300$K, то наблюдается отражение волны от дефекта (рис. 5).

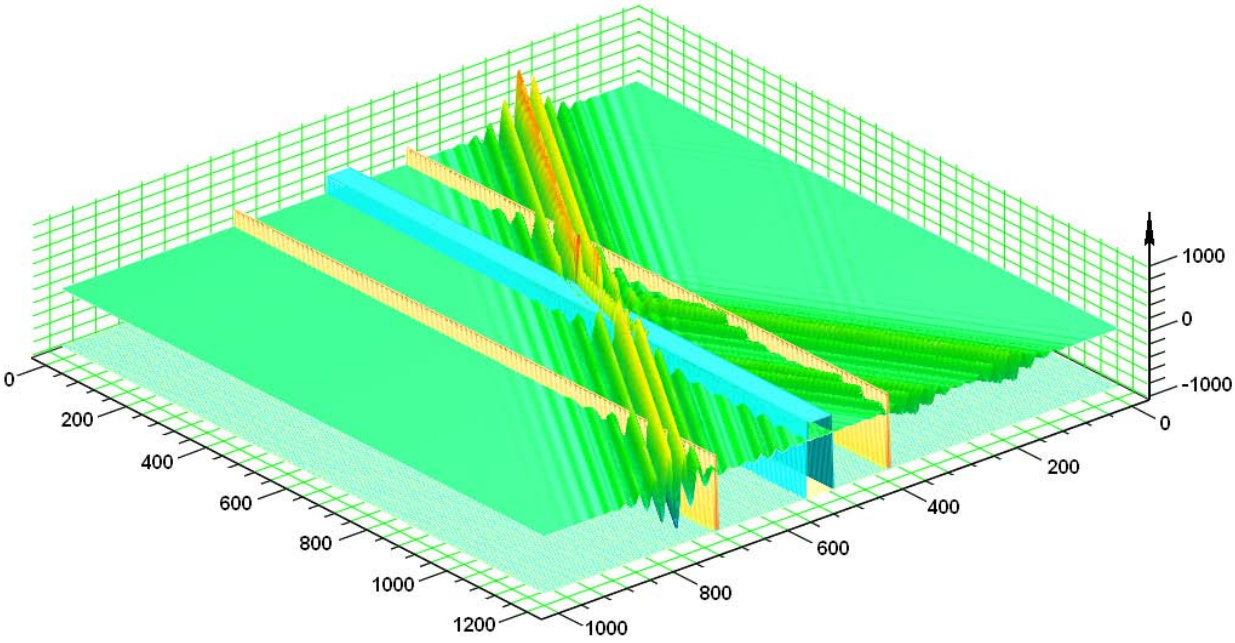


Рис. 4. Эволюция акустической волны, распространяющейся в стальном образце с трещиной, заполненной водой

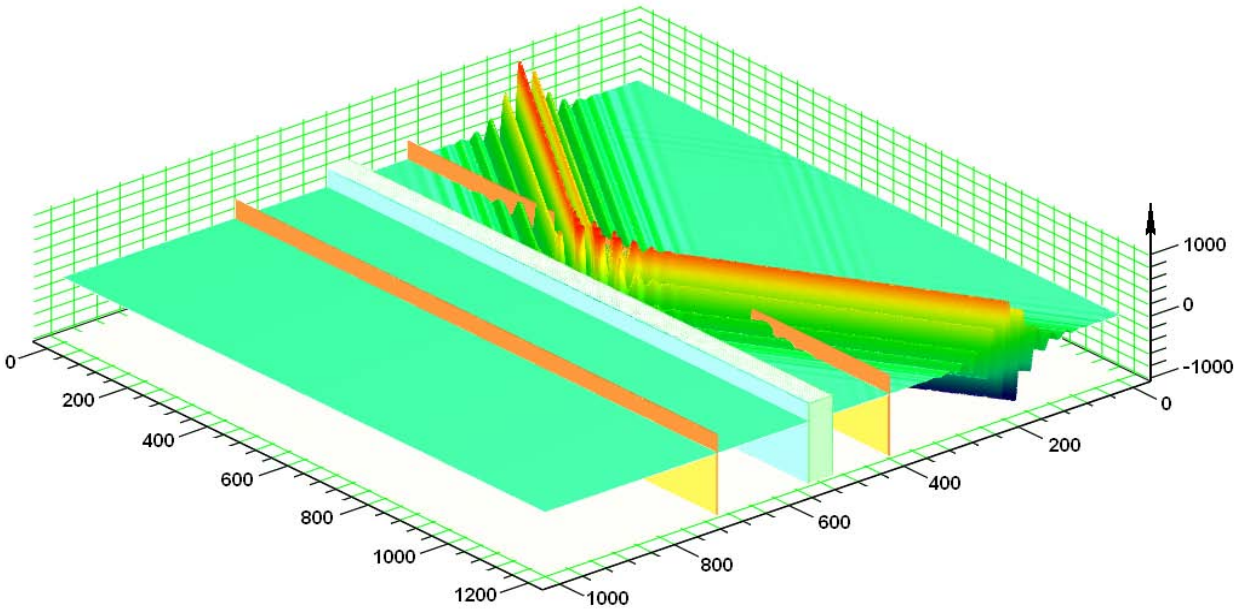


Рис. 5. Эволюция акустической волны, распространяющейся в стальном образце с трещиной, заполненной воздухом

В случае, когда плотность и модуль упругости дефекта мало отличается от характеристик среды, ультразвуковая волна проходит дефект, не испытывая отражения. Результаты расчёта для стального образца, содержащего слой алюминия с плотностью 2710 кг/м^3 и модулем упругости $E_d = 7{,}1 \cdot 10^{10}$ Н/м^2, представлены на рисунках 6, 7:

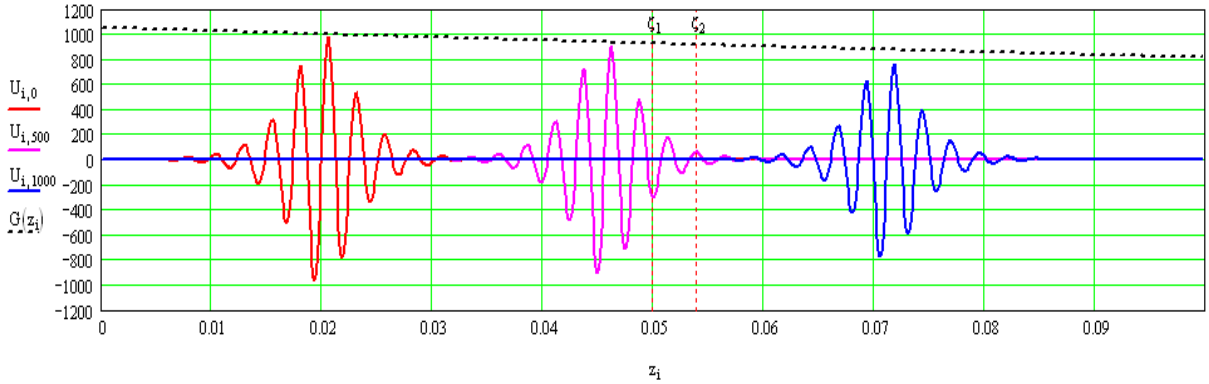


Рис. 6. Динамика волнового пакета, проходящего слой алюминия

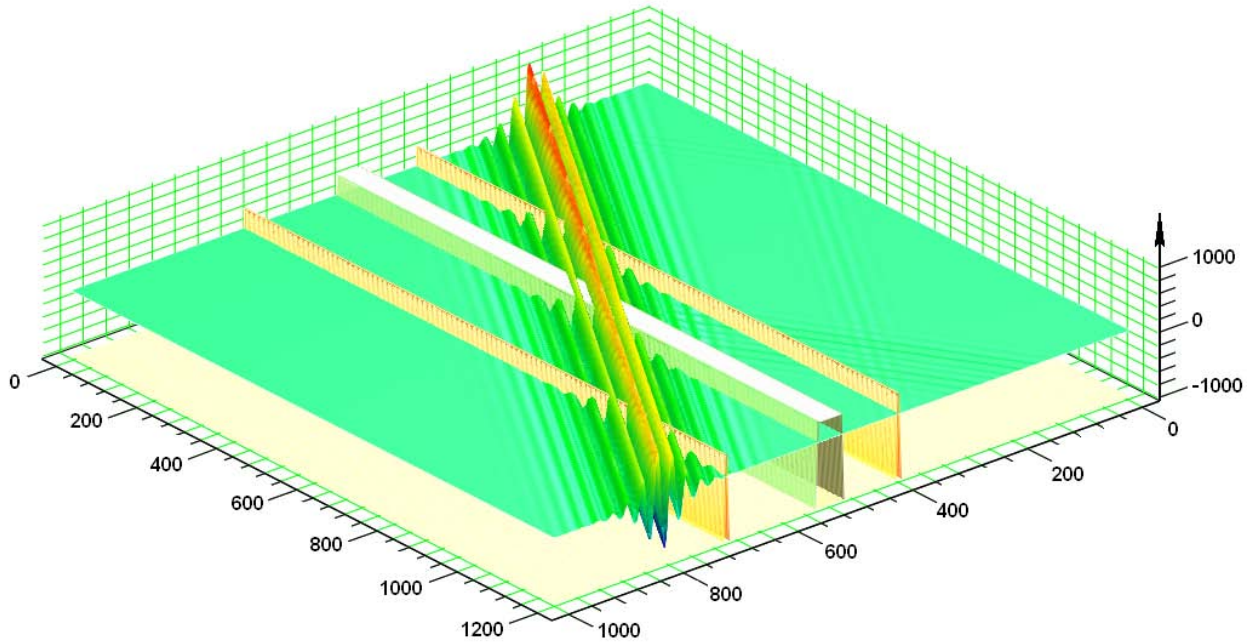


Рис. 7. Эволюция акустической волны, распространяющейся
в стальном образце с алюминиевым слоем

Обнаружение такого дефекта возможно по уменьшению амплитуды сигнала при прохождении волны сквозь трещину.

ЗАКЛЮЧЕНИЕ

Моделирование процессов распространения ультразвуковых акустических волн проведено при характерных параметрах сред и дефектов с различными начальными условиями. Для проверки корректности расчётов использовались условия Куранта и энергетические соотношения. Корректность проведённых вычислений подтверждается устойчивостью решения; сохранением энергии волны при $\alpha = 0$.

Результаты расчетов могут быть проверены экспериментальным путём и использованы при обработке результатов дефектоскопического анализа.

МОДЕЛИРОВАНИЕ ИЗМЕРИТЕЛЬНОГО КАНАЛА ВИРТУАЛЬНОГО ПРИБОРА ДЛЯ КОНТРОЛЯ КАЧЕСТВА СВАРНЫХ СОЕДИНЕНИЙ

М.А. Матыченко, С.М. Райлян – аспиранты
Волгоградского государственного технического университета
В.П. Шевчук – д-р техн. наук, профессор
филиала «МЭИ (ТУ)» в г. Волжском

Все программное обеспечение виртуального прибора по измерению качества сварных соединений может быть условно разделено на измерительное и обслуживающее. Измерительные алгоритмы должны быть реализованы с помощью промышленных технических средств (микросхемы) и, следовательно, реализованы в первичном преобразователе в виде, удобном для метрологической аттестации прибора в целом. Обслуживающее программное обеспечение должно быть реализовано на ЭВМ большой мощности и обеспечить контроль работы первичного преобразователя, диагностику его неисправностей и визуализацию процесса измерения. Измерение дефекта очень сложный процесс и, как показывают исследования, сложность алгоритма зависит, в первую очередь, от конфигурации дефекта. В работе рассмотрен «идеальный дефект» в виде пузырька, имеющего форму сферы. В этом случае геометрическая интерпретация процесса измерения представлена на рис. 1.

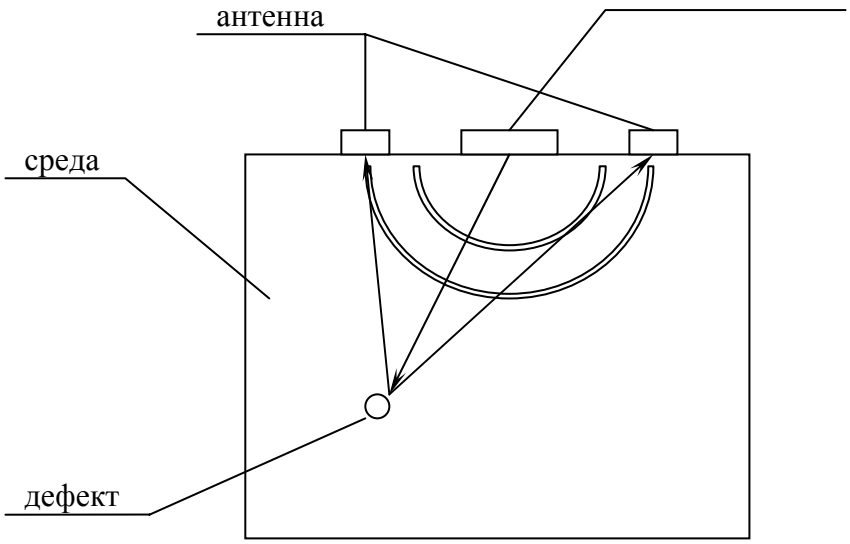


Рис. 1. Геометрическая интерпретация алгоритма измерения

Модель фиксирования положения дефекта строится на решении волнового уравнения. При этом уравнением измерения является система алгебраических уравнений, описывающая трехмерный случай распространения волны:

$$\begin{cases} x = \dfrac{k^2 - 2j^2 + a^2 + i^2}{2\sqrt{3} \cdot a} \\ y = \sqrt{\dfrac{\left(k^2 - 2j^2 + a^2 + i^2\right)^2 + 12 \cdot a^2 i^2 + 3\left(i^2 - k^2 + a^2\right)^2}{12a^2}} \\ z = \dfrac{i^2 - k^2}{2a} \end{cases}. \qquad (1)$$

Здесь i, j, k – приведенные расстояния от дефекта до приемника; x, y, z – искомые координаты дефекта; a – расстояние от излучателя до приемника (антенны). Полученная система уравнений базируется на решении волнового уравнения в среде с сильным дифференцированием плотностей базовой среды (металл) и дефекта (вакуум) и может выступать в качестве уравнения измерения пространственных координат пузырьковых дефектов. При этом измерительная часть виртуального прибора должна состоять из трех приемников, расположенных по окружности на одной плоскости с излучателем, под углом друг от друга в 120º.

Уравнения измерения не привязаны к физико-химическим свойствам исследуемого образца, а, следовательно, могут быть использованы при контроле и измерении любых видов сред. Кроме того, уравнения измерения могут быть использованы как математическая модель при создании программного комплекса визуализации процесса измерения и для моделирования измерительного канала. При этом (рис. 2) излучатель формирует волну вида:

$$P(z, 0) = P \sec h\left(\frac{z - zo}{L}\right) \cos\left(\frac{2\pi}{\lambda(z)} z\right).$$

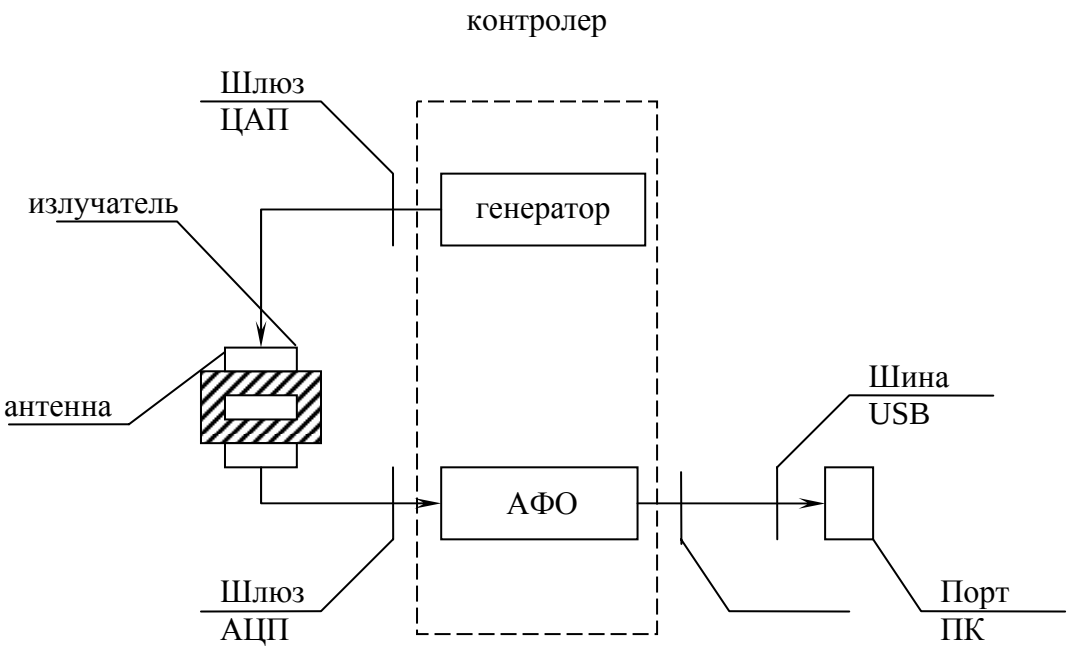


Рис. 2. Имитационная экспериментальная установка

Для этого на вход излучателя подается прямоугольный импульс длительностью T_s и амплитудой, равной 1/ T_s:

$$\delta_1(t) = \begin{cases} 1/T_s & \text{при} \quad 0 \le t < T_s; \\ 0 & \text{при} \quad t < 0,\ t \ge T_s. \end{cases}$$

Возбуждение излучателя, когда нет ограничений на мощность сигнала и измеряемые расстояния небольшие, может быть реализовано программно с помощью контроллера, а роль «молотка» исполнит цифро-аналоговый преобразователь. Причем программное обеспечение первичного преобразователя состоит из программы «возбуждение» и программы первичной обработки информации (алгоритмы формирования осциллограмм – АФО). То есть первичный преобразователь по своей сути является дефектоскопом и предназначен для поиска дефектов. И как только дефект найден, в работу подключается большая ЭВМ для реализации алгоритмов измерения. В нашем случае, поскольку проверка работоспособности алгоритмов измерения проводилась имитационным моделированием, измерительное программное обеспечение собрано в единый пакет прикладных программ «GENERATOR», блок-схема работы которого приведена на рис. 3. Программа GENERATOR работает следующим образом. Сигнал в виде прямоугольного импульса из блока 1 подается на вход измерительного канала, который состоит из блока 2 и блока 3, предназначенного для решения волнового уравнения и получения текущих значений координат распространения волны в образце. Текущие значения координат обрабатываются блоком 4 в соответствии с алгоритмом измерения, блоком 5 формируются в файл, удобный для передачи в алгоритмы визуализации дефекта (файл результата result.xml). ППП «DETECTOR» предназначен для реализации всей схемы имитационного моделирования процесса измерения по алгоритму (2) и визуализации этого процесса. Пример работы пакета прикладных программ представлен на рис. 4, где изображена часть экрана монитора (размером 450×450 мм), в центре которого расположены декартовы координаты с нулём в центре выбранной зоны. Нуль одновременно является местом установки излучателя. В левом верхнем углу расположена цветная калибровочная линейка длиной 0,01 м. В четвертом квадранте декартовых координат изображена цветная сфера (дефект), центр которой рассчитан по уравнению измерения (3,5) и помещен в декартовы координаты следующим образом: X – ось абсцисс; Y – ось ординат; Z – глубина залегания дефекта, отображаемая цветом. Таким образом, экспериментальная установка помогла разбить всё программное обеспечение на две части:

1. ППП «Генератор», который реализует программное обеспечение контроллера, см. рис. 3.

2. ППП «Детектор», который реализует программное обеспечение ЭВМ.

Рис. 3. Блок-схема работы ППП «GENERATOR»

ППП «Генератор» реализует измерительное программное обеспечение и должен подвергаться метрологической аттестации, согласно уравнению измерения (1). ППП «Детектор» предназначен для реализации «экспериментальной установки», относится к классу обслуживающих программ и может быть использован как для имитации работы акустического измерительного канала, так и для разработки алгоритмов визуализации процесса измерения (рис. 4).

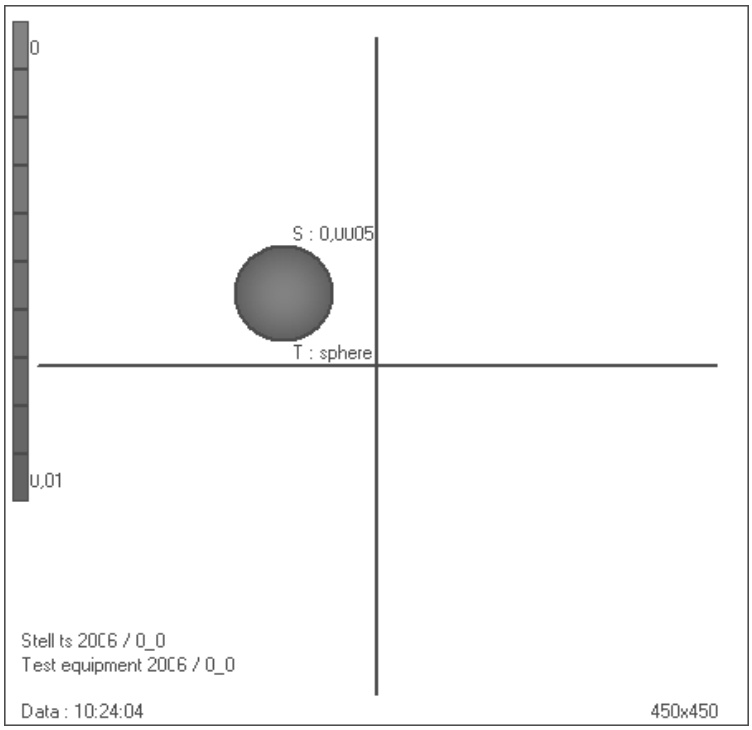


Рис. 4. Пример прорисовки дефекта

Данное программное обеспечение должно быть реализовано на ЭВМ большой мощности, гарантировать контроль работы первичного преобразователя, диагностику его неисправностей, и не должно подлежать метрологической аттестации. Систематическая погрешность измерения при этом, в основном, определяется динамической методической составляющей.

АЛГОРИТМ ИЗМЕРЕНИЯ ДИАМЕТРА В ТРУБНОМ ПРОИЗВОДСТВЕ

А.Н. Адаменко – аспирант
Волгоградского государственного технического университета
В.П. Шевчук – д-р техн. наук, профессор
филиала «МЭИ (ТУ)» в г. Волжском

В настоящее время ведется интенсивное строительство новых магистральных трубопроводов, увеличиваются темпы и объемы ремонта действующих трубопроводных систем. В связи с этим увеличиваются объемы

производства труб на трубных заводах. Одним из путей увеличения объемов производства является наращивание темпа производственного процесса, неотъемлемой частью которого является процесс контроля качества производимой продукции. Важным контролируемым параметром выпускаемой продукции (в нашем случае трубы), является показатель овальности. Одним из наиболее интересных исследований стало изучение влияния овальности труб на их несущую способность. Было установлено, что благодаря пластическим свойствам стали, овальность труб не оказывает влияния на несущую способность трубопроводов. Таким образом, при расчете трубопроводов отпала необходимость учитывать овальность труб и стало возможным уменьшить толщину стенок до 30 % [1]. Однако высокий показатель овальности значительно затрудняет, а порой и делает невозможным сварку труб между собой, и, как следствие, снижает темпы строительства трубопроводов.

Овальность определяется как выраженное в процентах отношение разности между наибольшим и наименьшим диаметром к номинальному диаметру. Процесс измерения овальности является довольно трудоемким и зависящим от человека, выполняющего процедуру контроля. На заводах-изготовителях труб измерение овальности производится обычной рулеткой, с помощью которой делается замер диаметра трубы в нескольких точках одного сечения. Использование рулетки становится еще более трудоемким при использовании ее на электросварных трубах большого диаметра (1 020 мм и более).

В целях сокращения времени, затрачиваемого на процесс измерения овальности, а также с целью повышения точности измерений (путем увеличения числа точек контроля) и исключения влияния человеческого фактора на результаты измерений, целесообразным является создание прибора для автоматизации данного процесса.

Для решения задачи определения овальности труб большого диаметра может быть создана экспериментальная установка, состоящая из следующих основных частей: платформа-держатель объекта измерения, 2 излучателя-приемника ультразвука, центрирующий штатив, микроконтроллер, устройство вывода информации.

Общий вид экспериментальной установки показан на рис. 1.

Как известно, диаметр – это хорда, проходящая через центр окружности, а значит, для того, чтобы измерить диаметр, необходимо разместить ультразвуковые датчики на его линии.

Платформа-держатель изготовлена таким образом, что ее направляющие (трубки или ролики) позволяют центрировать объект измерения по горизонтали. Таким образом, датчики измерительной системы всегда будут находиться на линии диаметра измеряемого цилиндрического объекта. Вращение диагностируемого объекта может осуществляться либо вручную (в случае неподвижных направляющих и малого веса объекта), либо с использованием специальных вспомогательных роликов.

Использование одновременно двух излучателей-приемников ультразвука обусловлено несколькими причинами: во-первых, данная схема позволяет на каждой итерации цикла измерений сразу получать значение диаметра, а во-вторых, она позволяет избежать влияния кривизны направляющих роликов, влияющей на вертикальное перемещение объекта.

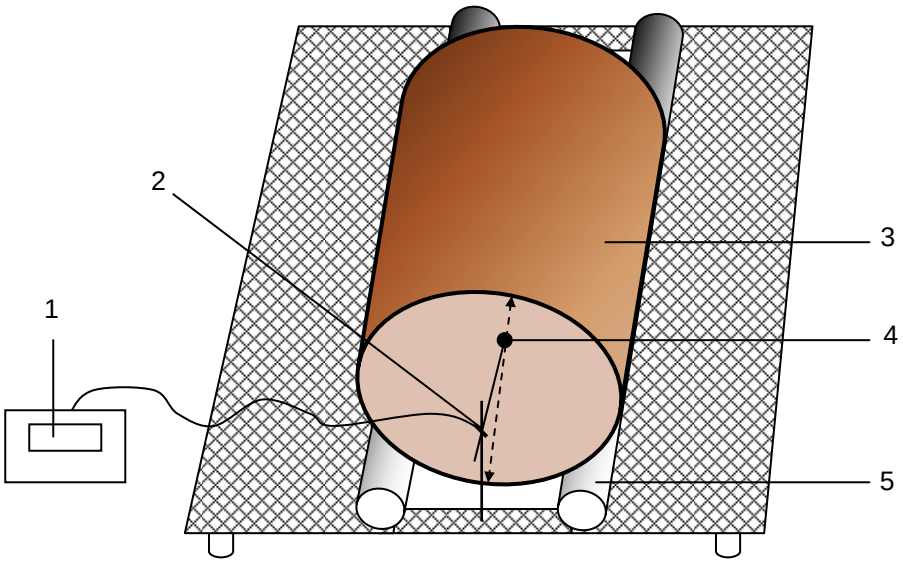


Рис. 1. Макет экспериментальной установки:

1 – микроконтроллер и устройство вывода информации; 2 – центрирующий штатив; 3 – объект измерения; 4 – излучатели-приемники ультразвука; 5 – платформа-держатель

Ультразвуковые датчики расположены «спина к спине», и каждый из них играет роль и излучателя и приемника ультразвука. Для решения поставленной задачи следует применять датчики с узкой диаграммой направленности и относительно малой величиной слепой зоны. Так, использование датчика с углом обзора равным 7°, приведет к озвучиванию дуги длиной около 30 мм (для трубы 530), и, соответственно, для вычисления диаметра система примет минимальное из расстояний от поверхности излучателя до точек данной дуги, а использование излучателя с углом в 20° для того же объекта, приведет к озвучиванию дуги длиной уже около 86 мм.

Величина так называемой «слепой» зоны ультразвукового преобразователя является не менее критичным параметром при выборе датчика для решения поставленной задачи. Зная свойства объекта измерения, а именно то, что его диаметр чаще всего находится в пределах от 530 до 1 420 мм, нетрудно подсчитать, что величина «слепой зоны» не должна превышать 0,2 м.

Задачей микроконтроллера является генерация колебаний ультразвуковой частоты, а также прием, обработка и накопление данных об измерениях, а затем вычисление показателя овальности измеряемого объекта и передача результата на устройство вывода информации.

Основной задачей при определении показателя овальности является задача измерения диаметра трубы. Диаметр трубы представляет собой некоторое расстояние, которое может быть измерено по времени прохождения его звуковыми волнами. Таким образом, задача измерения диаметра сводится к измерению времени распространения звука.

Звуковые колебания, в отличие от электромагнитных, могут распространяться только в какой-либо упругой среде.

В общем случае скорость распространения звука зависит от изменений плотности упругой среды (ρ) в пространстве и времени, давления (P) и температуры среды, а также от локальных изменений скорости отдельных частиц упругой среды. Скорость распространения ультразвуковых волн в газовой среде (C) определяется следующим выражением:

$$C = \left(k \cdot P/\rho\right)^{1/2} = \lambda \cdot f ,$$

где P – давление газовой среды; ρ – плотность упругой среды; λ и f – соответственно длина волны и частота ультразвуковых колебаний; k – адиабатический коэффициент для газов.

Для воздуха адиабатический коэффициент равен 1,4, а плотность имеет значение 1,29 кг/м^3 при давлении 1013 гПа.

Так как плотность воздуха уменьшается с увеличением температуры, то и скорость распространения звука в воздухе (C_B) является зависимым от температуры параметром. Для воздуха эта зависимость может быть представлена в следующем виде:

$$C_B = c_0 \cdot \left(1 + T/273\right)^{1/2},$$

где c_0 = 331,6 м/с (скорость распространения звука в воздухе при T = 0 °С); T – текущее значение температуры воздуха, представленное в градусах Цельсия.

Относительное изменение скорости распространения звука, как следует из этой формулы, составляет примерно 0,17 % на один градус. В табл. 1 представлена зависимость скорости распространения звука в воздухе от температуры.

Таблица 1

Зависимость скорости распространения звука от температуры воздуха

T, °С	-40	-30	-20	-10	0	10	20	30	40
C_B, м/с	306,35	312,85	319,22	325,47	331,60	337,62	343,53	349,34	355,06

Скорость распространения звука в воздушной среде существенно зависит и от давления воздуха: с ростом давления она увеличивается, а максимальное значение относительного изменения скорости звука во всём диапазоне колебания атмосферного давления на уровне моря составляет примерно 5 %.

Кроме того, скорость звука зависит от состава воздуха, например, от процентного содержания CO_2 в воздухе, и относительной влажности. Влияние относительной влажности является меньшим, чем влияние температуры или давления, и вносит максимальное дополнительное изменение скорости звука (сравниваются скорости в сухом и влажном насыщенном воздухе) около 2 % [2].

На практике достаточно компенсировать влияние температуры, так как именно температура имеет наибольшее влияние на скорость распространения звука.

Рассмотрим метод определения расстояния, основанный на измерении времени прохождения ультразвуковой волны от датчика до объекта и обратно. При таком способе определения расстояния излучение и прием отраженного сигнала происходят в одной точке одним преобразователем.

В момент времени t = 0 (рис. 2) ультразвуковой передатчик излучает сигнал – пачку импульсов продолжительностью Δt, которая распространяется в окружающей среде со скоростью звука C.

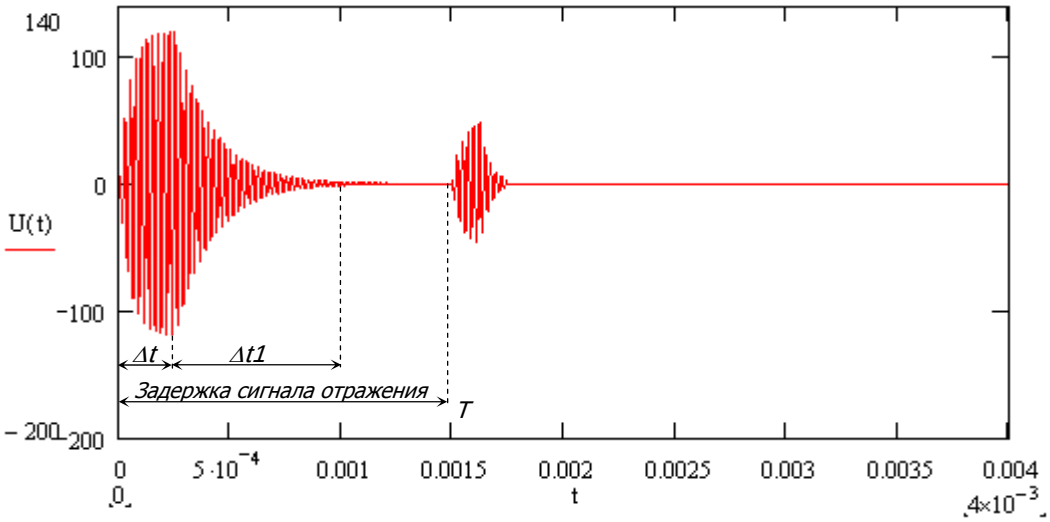


Рис. 2. Излученный и отраженный сигналы

Когда сигнал достигает объекта, часть сигнала отражается и приходит в приёмник в момент времени $t = T$. Электронная схема устройства обработки сигнала определяет расстояние до объекта, измеряя время T. Интервал времени Δt_1 часто называют «мертвым» временем излучателя. Он представляет собой время, в течение которого происходит «успокоение» излучателя, и зависит от его конструктивных особенностей. Интервал времени $\Delta t + \Delta t_1$ называют «слепой» зоной ультразвукового датчика, в которой невозможно обнаружить отраженный от объекта измерения сигнал. Таким образом, данный интервал определяет минимальное расстояние от излучателя до объекта, при котором последний может быть обнаружен. Величина «слепой» зоны может быть существенно уменьшена путем применения схемы измерения с раздельными излучателем и приемником сигнала.

Для решения поставленной задачи, а именно для измерения диаметра трубы, необходимо обеспечить точность измерений порядка 1 мм.

Учитывая скорость распространения ультразвука в воздухе, несложно подсчитать, как часто надо опрашивать приемник, определяя, пришел сигнал или нет, чтобы обеспечить заданную точность.

Для этого проведем расчет для температуры воздуха равной 0 °С, и определим время, за которое ультразвуковая волна пройдет расстояние 2 мм (расчет ведется для расстояния 2 мм, так как волна проходит двойное расстояние излучатель – объект – приемник):

$$t_{res} = \frac{S}{c_0} = \frac{0{,}002\ \text{м}}{331{,}6\ \text{м/с}} = 6{,}03 \cdot 10^{-6}\ \text{с},$$

где S – расстояние, пройденное волной.

Таким образом, нам необходимо опрашивать приемник с частотой ν, равной:

$$\nu = 1/t_{res} = 1/6{,}03 \cdot 10^{-6} = 165\,800\ \text{Гц}.$$

Для того чтобы получить направленное отражение, необходимо чтобы длина волны ультразвукового излучения была больше значения шероховатости объекта измерения.

Использование ультразвука частоты 40 кГц позволяет достигать направленного отражения от объектов, значение показателя шероховатости которых не превышает длину волны λ, рассчитанную по формуле (для температуры воздуха 0 °С):

$$\lambda = \frac{c_0}{f} = \frac{331{,}6\ \text{м/с}}{40\,000\ \text{Гц}} = 0{,}00829\ \text{м} = 8\,290\ \text{мкм}.$$

Объект измерения в нашем случае имеет значение шероховатости, заведомо не превышающее значения 1000 мкм, так как в противном случае оно бы уже превышало необходимую точность измерений.

Предлагаемая схема измерения приведена на рисунке 3.

На данной схеме введены следующие обозначения: Δt_1 – время прохождения ультразвуковой волной расстояния от поверхности верхнего излучателя-приемника до верхней границы объекта измерения и обратно: Δt_2 – аналогичное время для нижнего излучателя приемника и нижней границы объекта; s – расстояние между излучающими/приемными поверхностями преобразователей.

Используя описанную выше схему, уравнение измерения диаметра d диагностируемого объекта может быть определено как:

$$d = \left(\frac{\Delta t_1 + \Delta t_2}{2} \right) \cdot C + s,$$

где C – значение скорости звука, определенное для конкретных условий измерения.

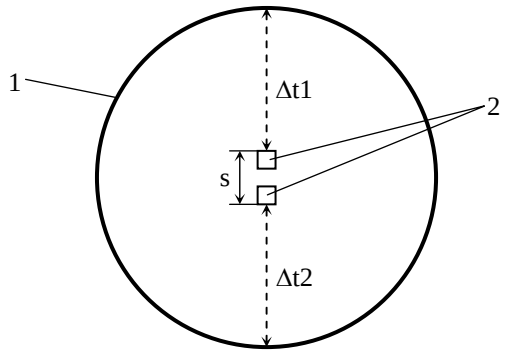


Рис. 3. Схема измерения диаметра

1 – объект измерения;
2 – излучатели-приемники ультразвука

Разрабатываемая установка может быть применена для контроля овальности не только труб, но и других цилиндрических объектов большого диаметра. Также может быть определено и отклонение от теоретической окружности исследуемого объекта.

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. *В.В. Рождественский*. Формула безопасности // Потенциал, № 3-4. – 1998.
2. *Жданкин В.К.* Приборы для измерения уровня // Современные технологии автоматизации. – 2002. – № 3.

ОПРЕДЕЛЕНИЕ ЭФФЕКТИВНОСТИ РАБОТЫ ГИДРОАГРЕГАТА

М.И. Шершеков – студент
филиала «МЭИ (ТУ)» в г. Волжском
Е.В. Капля – канд. физ-мат. наук, доцент
филиала «МЭИ (ТУ)» в г. Волжском

В современных условиях развития гидроэнергетики очень серьёзные требования предъявляются к эффективности использования гидрооборудования. Наибольший интерес представляет эффективность работы гидроагрегата. Одним из способов повышения эффективности работы гидротурбины является регулирование расхода гидротурбины. Умение оптимально управлять расходом является одной из ведущих задач в гидроэнергетике.

Целью настоящей работы является создание виртуального прибора по измерению эффективности работы гидроагрегата, которую можно оценивать как:

$$Э = \frac{I_n}{I_m},$$

где I_n – практическое значение тока; I_m – теоретическое значение тока.

Зная практические и теоретические значения тока можно найти эффективность работы гидроагрегата, которая и принимается за критерий качества управления гидротурбиной. Критерий качества включает в себя математическую модель, которая выглядит следующим образом:

$$J\frac{d\omega}{dt} = M_t - M_g, \tag{1}$$

$$N = \frac{A}{t} = \rho g \frac{V}{t} H = \rho g Q H, \tag{2}$$

$$\eta = \frac{N_x}{N_n} = \frac{(\omega_1 \cos\beta_1 - \omega_2 \cos\beta_2) u_x}{gH}, \tag{3}$$

$$M_{zi} = \frac{N}{\omega} = \rho g Q_i H \frac{\eta_t}{\omega}, \tag{4}$$

$$Q = \frac{\eta_t g H + r_2^2 \omega^2}{\omega\left(\frac{r_0 \cos\alpha_0}{a_0 b_0 z_0} + k_2 r_2 \operatorname{ctg}\left(180^\circ - \beta_2\right)\right)}, \tag{5}$$

$$L_i = K\omega_i, \tag{6}$$

$$Э = \frac{I_{пр}}{I_{теор}}. \tag{7}$$

где J – момент инерции ротора; ω – угловая скорость; M_t – момент турбины; M_g – момент генератора; ρ – плотность воды; g – ускорение свободного падения; H – напор воды; Q – расход воды; N_x – мощность струи; N_n – мощность потока; η – коэффициент полезного действия; ω_i – относительные скорости потока; β_i – угол между ω_i и u_x; u_x – скорость относительно 0X; M_{zi} – момент взаимодействия струи с лопастью; η_t – КПД турбины; r_i –плечи моментов от конвективных сил; α_i –угол между переносной и абсолютными скоростями; α_0 – открытие направляющего аппарата; b_0 – высота направляющего аппарата; k_2 – коэффициент площади; K – коэффициент пропорциональности.

В основе методики имитационного моделирования лежит статическое моделирование на ЭВМ, при котором функции времени моделируются как случайные процессы с заданными характеристиками.

Структура измерительного канала выглядит следующим образом:

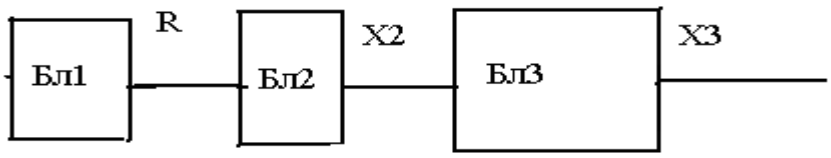


Рис. 1. Структура измерительного канала

Здесь Бл1 – генератор псевдослучайных чисел; Бл2 – RC-фильтр; Бл3 – формирование сигнала с учётом математического ожидания; R – сигнал генератора псевдослучайных чисел; X2 – отфильтрованный сигнал; X3 – случайная реализация расхода воды.

Основное уравнение гидротурбины выглядит следующим образом:

$$J\frac{d\omega(t)}{dt} = M_t(t) - M_g(t). \tag{8}$$

Вращающий момент турбины можно представить в виде:

$$M_t(t) = k_m \cdot R^m(t) + k_{m-1} \cdot R^{m-1}(t) + \ldots + k_2 \cdot R^2(t) + k \cdot R(t), \tag{9}$$

где k_m – коэффициент вращения.

Момент сопротивления можно представить в виде:

$$M_g(t) = \chi_n \cdot \omega^n(t) + \chi_{n-1} \cdot \omega^{n-1}(t) + \ldots + \chi_2 \cdot \omega^2(t) + \chi \cdot \omega(t), \tag{10}$$

где λ_n – коэффициент торможения.

Принимаем $M_t(t) \approx k{\cdot}R(t)$; $M_g(t) \approx \chi{\cdot}\omega(t)$; $k = 4{,}6$; $\lambda = 10$; $J = 7{,}35{\cdot}10^4$ (кгм^3).

Задаваясь расходом и решая уравнения:

$$\omega_{j+1} = \frac{(k \cdot R_j - \chi \cdot \omega_j) \cdot \Delta t}{J} + \omega_j, \tag{11}$$

$$v_j = \frac{\omega_j}{2\pi}, \tag{12}$$

получим графики, представленные на рис. 2 и 3.

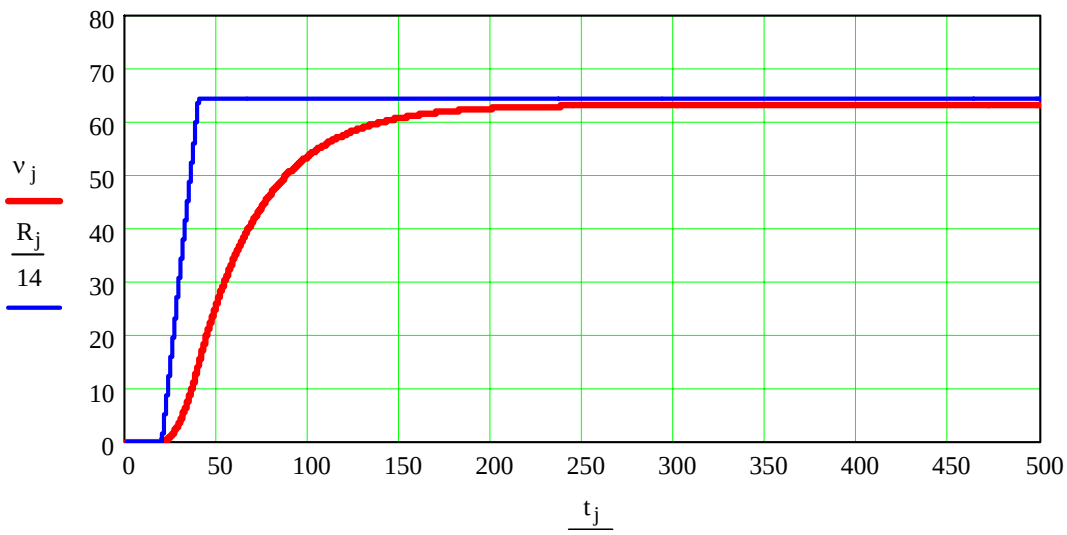


Рис. 2. Динамическая характеристика разгона

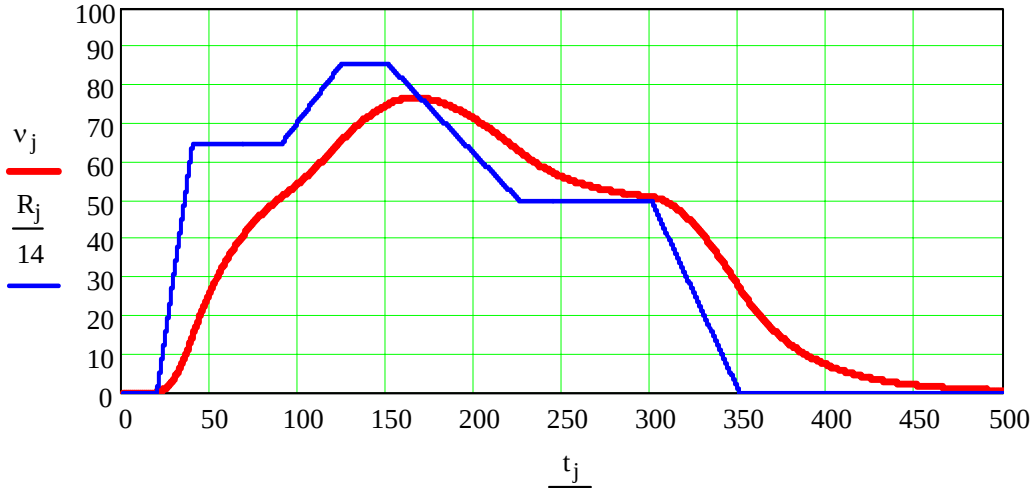


Рис. 3. Графическая зависимость скорости вращения от расхода

Выше была выведена имитационная модель измерительного канала, на основе которой был получен сигнал $x3_i$ (рис. 1).

Далее, чтобы создать имитационную модель гидроагрегата, на сигнал $x3_i$ наносим помеху и вносим его в математическую модель (рис. 4).

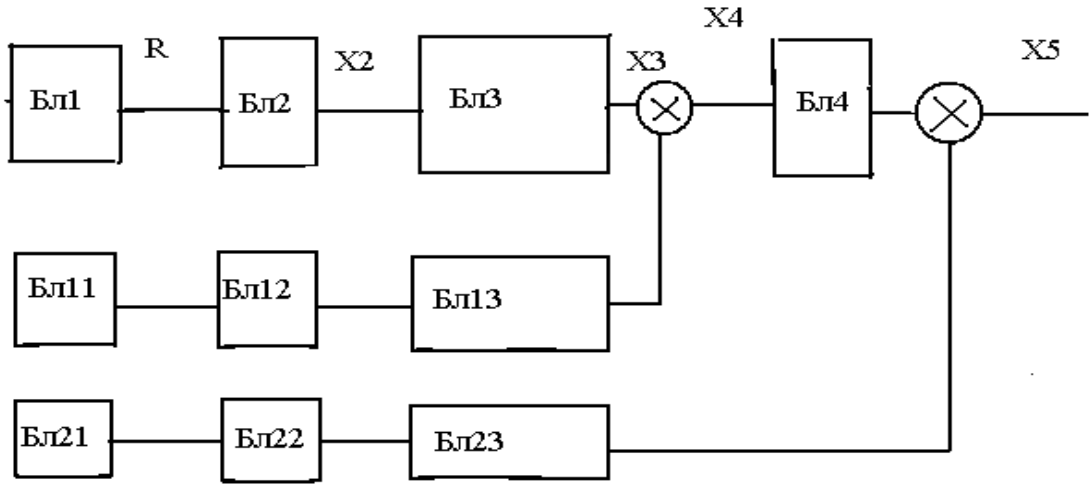


Рис. 4. Блок-схема имитационного моделирования

Здесь Бл1, Бл11, Бл21 – генераторы псевдослучайных чисел; Бл4 – математическая модель гидротурбины; Бл12, Бл22, Бл2 – RC-фильтр; Бл3 – формирование сигнала с учётом математического ожидания.

На сигнал $x3_i$ вносим помеху датчиком псевдослучайных чисел:

$$x4_i = x3_i + P, \tag{13}$$

$$P = rnd(1) + 0{,}5, \tag{14}$$

где $x4_i$ – зашумлённый сигнал; P – помеха.

График сигнала $x4_i$ представлен на рис. 5.

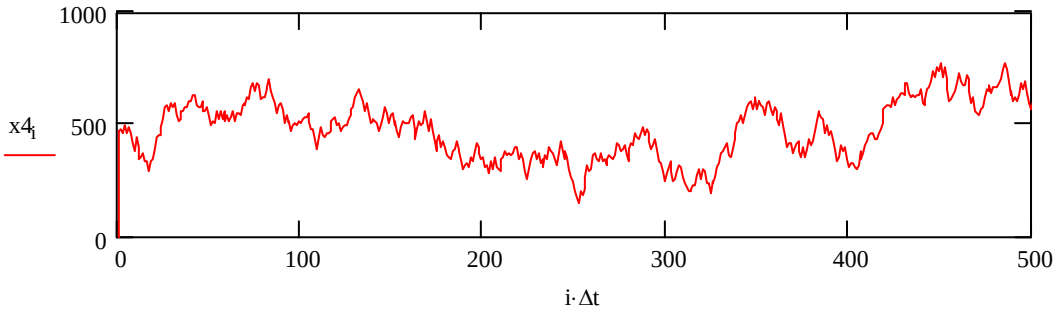


Рис. 5. Сигнал $x4_i$

Пропускаем сигнал $x4_i$ через математическую модель (рис. 4) гидротурбины и снова наносим помеху.

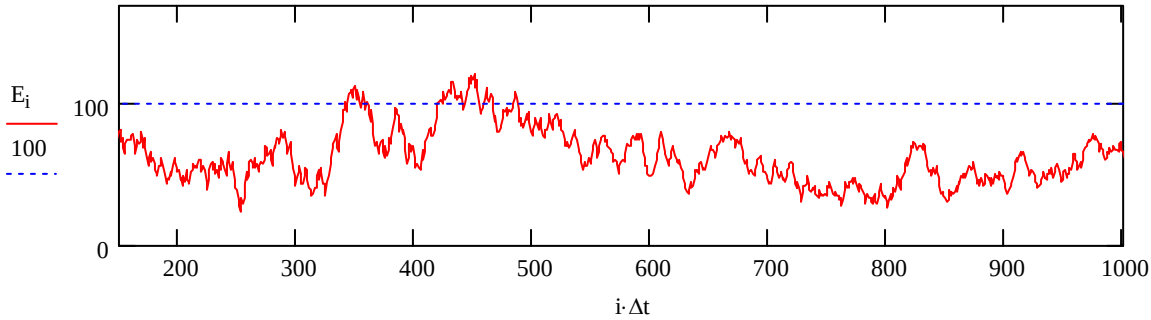


Рис. 6. Эффективность работы гидроагрегата

В итоге получаем искомый сигнал $x5_i$ (E_i), где $x5_i$ – эффективность работы гидроагрегата.

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. *Барков Н.К.* Автоматизация мощных гидротурбин. – Л.: Машиностроение, 1964. – 255 с.

2. *Ковалёв Н.Н.* Проектирование гидротурбин. – Л.: Машиностроение, 1974. – 279 с.

3. *Пиотровский Л.М.* Электрические машины. – Л.: ГосЭнергоИздат,1952. – 576 с.

4. *Шевчук В.П., Капля В.И., Желтоногов А.П., Лясин Д.Н.* Метрология интеллектуальных измерительных систем. – Волгоград: РПК «Политехник», 2005. – 242 с.

РЕШЕНИЕ ЗАДАЧИ О МАКСИМАЛЬНОМ БЫСТРОДЕЙСТВИИ ДЛЯ ЛИНЕЙНЫХ ОБЪЕКТОВ ПРОИЗВОЛЬНОГО ПОРЯДКА

П.В. Шамигулов – канд. техн. наук, доцент
филиала «МЭИ (ТУ)» в г. Волжском

Постоянно возрастающие возможности современной вычислительной техники позволяют все более широко применять численные методы вычислений для решения задач оптимального управления динамическими объектами.

Причем многократно возросшая эффективность современного программного обеспечения, разнообразие готовых, достаточно мощных процедур и функций, предлагаемых программами математических расчетов, заставляют по-новому подходить к решению, казалось бы, классических задач. В частности, хорошо известная задача о максимальном быстродействии, допускающая аналитическое решение лишь в простейших случаях, как правило, решается численно. Однако с использованием современных математических программ данная задача может иметь и более простое и универсальное решение, которое можно назвать численно-аналитическим. При этом определение динамики объекта осуществляется с использованием аналитических выражений, численные методы используются для решения системы нелинейных уравнений, из которой определяются моменты времени переключения управляющего воздействия. Такое сочетание аналитических и численных методов позволяет получить весьма эффективный и универсальный алгоритм решения задачи.

Ход решения задачи проиллюстрируем на следующем примере. Пусть имеется линейный объект управления n-го порядка с одним входным воздействием $x(t)$ и одним выходом $y(t)$. Требуется из заданного начального состояния перевести объект в требуемое конечное состояние за минимальное время, при условии ограниченности входного воздействия: $x(t) \in [x_{\min}, x_{\max}] \forall t \geq 0$.

Известно [1], что в случае, если характеристическое уравнение объекта управления не содержит комплексных корней (то есть объект является неколебательным), справедлива так называемая *теорема об n интервалах*, доказанная А.А. Фельдбаумом. Согласно этой теореме, управляющее воздействие, соответствующее решению задачи о максимальном быстродействии, принимает значения, принадлежащие границе области допустимых управлений (в нашем случае – $x_{\min}$ и $x_{\max}$), причем количество интервалов, на которых управляющее воздействие остается неизменным, равно порядку объекта управления, то есть n. Таким образом, теорема об n интервалах определяет качественный вид решения задачи. Для полного ее решения необходимо определить моменты времени переключения управляющего воздействия.

Для отыскания моментов переключения будем рассматривать движение объекта в терминах пространства состояний. Запишем математическую модель линейного объекта в векторно-матричной форме:

$$\frac{d\vec{z}}{dt} = A \cdot \vec{z} + \vec{B} \cdot x, \tag{1}$$

где $\vec{z}$ – вектор состояния; A – квадратная $n \times n$ матрица; $\vec{B}$ – n-мерный вектор.

Решение уравнения (1) при условии, что $x(t) = \text{const} = x$, может быть записано в виде:

$$\vec{z}(t) = e^{At} \cdot \vec{z}_0 + \left(e^{At} - E\right) \cdot A^{-1} \cdot \vec{B} \cdot x, \tag{2}$$

где $\vec{z}_0$ – вектор начальных условий; E – единичная $n \times n$ матрица; e^{At} – матричная экспонента.

Матричная экспонента представляет собой частный случай функции от матрицы $f(A)$, которая в общем случае определяется выражением [2]:

$$f(A) = a_1 \cdot E + a_2 \cdot A + a_3 \cdot A^2 + \ldots + a_n \cdot A^{n-1} = \sum_{k=1}^{n} a_k \cdot A^{k-1}, \qquad (3)$$

где коэффициенты a_k определяются решением системы уравнений

$$\begin{cases} a_1 + a_2 \cdot \lambda_1 + a_3 \cdot \lambda_1^2 + \ldots + a_n \cdot \lambda_1^{n-1} = f(\lambda_1) \\ a_1 + a_2 \cdot \lambda_2 + a_3 \cdot \lambda_2^2 + \ldots + a_n \cdot \lambda_2^{n-1} = f(\lambda_2) \\ \vdots \\ a_1 + a_2 \cdot \lambda_n + a_3 \cdot \lambda_n^2 + \ldots + a_n \cdot \lambda_n^{n-1} = f(\lambda_n) \end{cases}, \qquad (4)$$

в которой λ_i, $i = \overline{1, n}$ – собственные значения матрицы A.

В векторно-матричной форме систему (4) можно записать:

$$W \cdot \vec{a} = \vec{f}(\vec{\lambda}), \qquad (5)$$

где $\vec{f}(\vec{\lambda})$ – вектор-функция от собственных значений матрицы A; W – матрица Вандермонда для вектора собственных значений матрицы A:

$$W = \begin{pmatrix} 1 & \lambda_1 & \lambda_1^2 & \ldots & \lambda_1^{n-1} \\ 1 & \lambda_2 & \lambda_2^2 & \ldots & \lambda_2^{n-1} \\ \vdots & \vdots & \vdots & \ldots & \vdots \\ 1 & \lambda_n & \lambda_n^2 & \ldots & \lambda_n^{n-1} \end{pmatrix}. \qquad (6)$$

Из уравнения (5) можно определить вектор коэффициентов:

$$\vec{a} = W^{-1} \cdot \vec{f}(\vec{\lambda}),$$

а затем, по выражению (3), и функцию от матрицы – экспоненту e^{At}.

Таким образом, выражение (2) позволяет определять значения вектора состояния $\vec{z}$ в произвольный момент времени при известных начальных условиях и при постоянном входном воздействии x. Выражением (2) можно воспользоваться для определения состояния объекта в конце каждого участка при оптимальном управлении, определяемым в соответствии с теоремой об n интервалах. При этом используется метод, аналогичный методу припасовывания – конечное состояние объекта на предыдущем участке определяет начальные условия для следующего. Это позволяет составить замкнутую систему нелинейных уравнений для n компонент вектора состояния, из которой можно определить n неизвестных моментов времени переключения управляющего воздействия:

$$\begin{cases} \vec{z}_1 = e^{At_1} \cdot \vec{z}_0 + \left(e^{At_1} - E\right) \cdot A^{-1} \cdot \vec{B} \cdot x_1 \\ \vec{z}_2 = e^{At_2} \cdot \vec{z}_1 + \left(e^{At_2} - E\right) \cdot A^{-1} \cdot \vec{B} \cdot x_2 \\ \vdots \\ \vec{z}_T = e^{At_n} \cdot \vec{z}_{n-1} + \left(e^{At_n} - E\right) \cdot A^{-1} \cdot \vec{B} \cdot x_n \end{cases}, \qquad (7)$$

где $\vec{z}_i$, $i = \overline{1, n-1}$ – состояние объекта в конце i-го участка управления; t_i, $i = \overline{1, n}$ – длительность i-го участка управления; x_i, $i = \overline{1, n}$ – величина управляющего воздействия на i-ом участке управления – представляет собой чередующиеся значения $x_{\max}$ и $x_{\min}$; $\vec{z}_T$ – требуемое конечное состояние объекта.

Из системы (7) определяются n моментов времени t_i. Общее время управления:

$$T = \sum_{i=1}^{n} t_i .$$

Для моментов времени $t > T$ определяется величина управляющего воздействия, фиксирующая объект в требуемом состоянии $\vec{z}_T$ – $x_{уст}$. Для статических объектов в случае, если требуемое состояние представляет собой состояние покоя при значении выхода $y(t > T) = y_{уст}$, величину $x_{уст}$ можно определить по выражению:

$$x_{уст} = \frac{y_{уст}}{k},$$

где k – коэффициент передачи объекта.

Рассмотрим применение описанной методики на примере определения оптимального по быстродействию управления статическим объектом третьего порядка, описываемым передаточной функцией:

$$W(p) = \frac{2{,}28}{310p^3 + 137p^2 + 20{,}3p + 1}. \qquad (8)$$

Данный объект имеет только действительные корни характеристического уравнения и время установления переходной характеристики в границах ±5 % – 42,6 с.

Передаточной функции (8) соответствует дифференциальное уравнение:

$$310\frac{d^3y}{dt^3} + 137\frac{d^2y}{dt^2} + 20{,}3\frac{dy}{dt} + y = 2{,}28x. \qquad (9)$$

Переменные состояния введем по следующему правилу:

$$z_1 = y, \quad z_2 = \frac{dz_1}{dt} = \frac{dy}{dt}, \quad z_3 = \frac{dz_2}{dt} = \frac{d^2y}{dt^2}.$$

Тогда в векторно-матричной форме уравнений состояния уравнение (9) запишется в виде (1), где

$$A=\begin{pmatrix} 0 & 1 & 0 \\ 0 & 0 & 1 \\ -\dfrac{1}{310} & -\dfrac{20,3}{310} & -\dfrac{137}{310} \end{pmatrix},\quad \vec{B}=\begin{pmatrix} 0 \\ 0 \\ \dfrac{2,28}{310} \end{pmatrix}.$$

Пусть начальное состояние объекта: $\vec{z}(0)=\vec{z}_0=(0\quad 0\quad 0)^T$, требуемое конечное: $\vec{z}(T)=\vec{z}_T=(1\quad 0\quad 0)^T$. На управляющее воздействие наложены следующие ограничения: $x_{\min}=-5,\ x_{\max}=10$.

Решение задачи выполним с использованием программы математических расчетов MathCad.

Определяем исходные данные:

$$\mathrm{A}=\begin{pmatrix} 0 & 1 & 0 \\ 0 & 0 & 1 \\ -\dfrac{1}{310} & -\dfrac{20,3}{310} & -\dfrac{137}{310} \end{pmatrix}\quad \mathrm{B}:=\begin{pmatrix} 0 \\ 0 \\ \dfrac{2,28}{310} \end{pmatrix}\quad \mathrm{z0}:=\begin{pmatrix} 0 \\ 0 \\ 0 \end{pmatrix}\quad \mathrm{zT}:=\begin{pmatrix} 1 \\ 0 \\ 0 \end{pmatrix}\quad \begin{array}{l} \mathrm{xmin}:=-5 \\ \mathrm{xmax}:=10 \\ \mathrm{n}:=3 \\ \mathrm{E}:=\mathrm{identity}(\mathrm{n}) \end{array}$$

Функция identity(n) определяет единичную матрицу заданной размерности.

Опишем функцию, формирующую матрицу Вандермонда для вектора собственных значений указанной матрицы:

$$\mathrm{Won}(\mathrm{A}):=\left|\begin{array}{l} \text{л}\leftarrow \mathrm{eigenvals}(\mathrm{A}) \\ \mathrm{for}\ \mathrm{i}\in 1\ldots\mathrm{n} \\ \quad \mathrm{for}\ \mathrm{i}\in 1\ldots\mathrm{n} \\ \qquad \mathrm{W}_{\mathrm{i,j}}\leftarrow(\text{л}_{\mathrm{i}})^{\mathrm{j}-1} \\ \mathrm{W} \end{array}\right.$$

Используемая здесь функция eigenvals(A) возвращает вектор собственных значений указанной матрицы.

Определим в общем виде вектор коэффициентов для выражения (3):

$$\mathrm{a}(\mathrm{A}):=\mathrm{Won}(\mathrm{A})^{-1}\cdot\exp(\mathrm{eigenvals}(\mathrm{A})).$$

Тогда функцию от матрицы – матричную экспоненту – можно определить как:

$$\mathrm{ex}(\mathrm{A}):=\sum_{\mathrm{k}=1}^{\mathrm{n}}\mathrm{a}(\mathrm{A})_{\mathrm{k}}\cdot\mathrm{A}^{\mathrm{k}-1}.$$

Далее, в соответствии с выражением (2), определим функцию, возвращающую значение вектора состояния в произвольный момент времени t в зависимости от начальных условий (nu) и входного воздействия (xu):

$$ku(nu, xu, t) := ex(A \cdot t) \cdot nu + (ex(A \cdot t) - E) \cdot A^{-1} \cdot B \cdot xu .$$

Произвольно зададимся начальными приближениями для искомых моментов времени переключения управляющего воздействия:

$$T0 := \begin{pmatrix} 10 \\ 5 \\ 3 \end{pmatrix}.$$

Далее опишем условия численного решения системы нелинейных алгебраических уравнений и решим систему:

$$\text{Given}$$

$$ku(ku(ku(z0, xmax, T0_1), xmin, T0_2), xmax, T0_3) = zT$$

$$0 = 0 \quad 0 = 0 \quad T0 > \begin{pmatrix} 0 \\ 0 \\ 0 \end{pmatrix}$$

$$TR := Find(T0)$$

Первая после ключевого слова Given строка представляет собой последовательный вызов функции ku с чередующимися управляющими воздействиями и использованием на каждом последующем этапе в качестве начальных условий решения, полученного на предыдущем этапе. Эта функция вызывается *n* раз. Для систем высоких порядков (более 7-8) целесообразно применять рекурсивную конструкцию вызова этой функции. Результат последовательных вызовов функции должен равняться требуемому значению вектора состояния в конечный момент времени.

Во второй строке описываются дополнительные условия: два псевдоуравнения 0 = 0, записываемых для того, чтобы формально выполнялось условие равенства количества неизвестных количеству уравнений, и неравенство, определяющее условие положительности искомых временных интервалов.

В последней строке «запускается» вычислительная процедура (ключевое слово Find), результат работы которой присваивается вектору TR.

Искомые промежутки времени участков и общее время управления:

$$TR = \begin{pmatrix} 2{,}525 \\ 4{,}857 \\ 0{,}975 \end{pmatrix} \qquad Tall := \sum_{k=1}^{n} TR_k \qquad Tall = 8{,}358 .$$

Установившееся значение управляющего воздействия:

$$xust := \frac{1}{2{,}28} \qquad xust = 0{,}439 \ .$$

Управляющее воздействие, как функция времени, определится следующим образом:

$$x(t) := \left| \begin{array}{l} xmax \ \text{if} \ \ t < TR_1 \\ xmin \ \text{if} \ \ TR_1 \le t < (TR_1 + TR_2) \\ xmax \ \text{if} \ \ (TR_1 + TR_2) \le t < Tall \\ xust \ \text{otherwise} \end{array} \right. .$$

Реакция объекта управления на указанное управляющее воздействие изображена на рис. 1 сплошной линией. Пунктирной линией в масштабе 1:10 показано оптимальное управление, штрихпунктирными линиями – границы пятипроцентной области относительно цели управления. Время перехода из начального состояния в конечное составляет 8,358 с, в границы пятипроцентного допуска объект входит через 6,79 с.

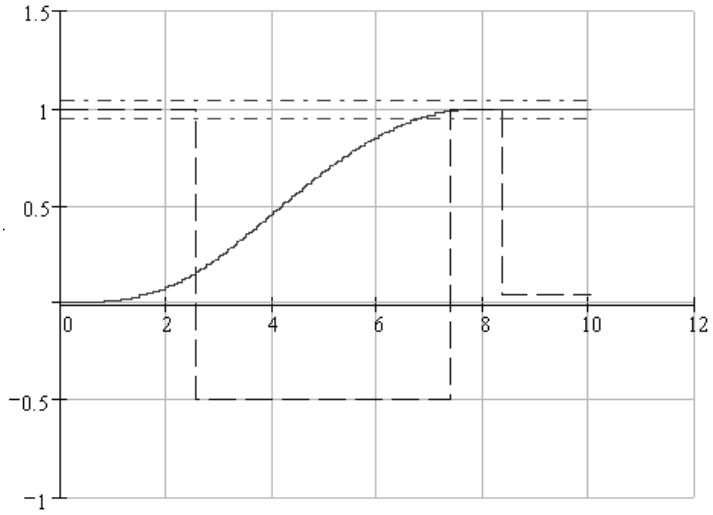


Рис. 1. Переходный процесс при оптимальном управлении

Для сравнения: тот же объект, управляемый ПИ-регулятором, параметры настройки которого определены по методике [3] при условии пятипроцентного перерегулирования, входит в границы пятипроцентного допуска только через 30,5 с после начала управления.

Таким образом, предлагаемая методика, основанная на применении численно-аналитического подхода, позволяет сравнительно просто определять оптимальное управление в задаче о максимальном быстродействии для линейных неколебательных объектов произвольного порядка. Автором были решены задачи для объектов до 15 порядка.

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. *Чураков Е.П.* Оптимальные и адаптивные системы. – М.: Энергоатомиздат, 1987. – 256 с.

2. *Корн Г., Корн Т.* Справочник по математике. – М.: Наука, 1973. – 832 с.

3. *Шамигулов П.В.* Расчет параметров настройки регуляторов систем автоматического управления // Энергетическая система России в национальном и глобальном измерениях: экономика, политика, информационные технологии. Сборник научных статей. – Волжский: Филиал ГОУ ВПО «МЭИ (ТУ)» в г. Волжском, 2006. – С. 168-176.

ИССЛЕДОВАНИЕ АЛГОРИТМОВ КОНТРОЛЯ КАЧЕСТВА СВАРНЫХ ШВОВ

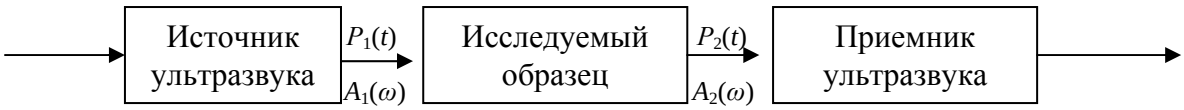
Ю.Е. Пронкина – ОАО «Волжский трубный завод»

Для исследования алгоритмов используется математическая модель процесса акустического исследования образца, содержащего плоскую трещину. Для построения математической модели процесса распространения акустической волны использовалось волновое уравнение.

$$\frac{\partial^2 P}{\partial z^2} - \frac{1}{v^2} \cdot \frac{\partial^2 P}{\partial t^2} - \alpha \cdot \frac{\partial P}{\partial t} - \beta \cdot P = 0,$$

где $P = P(z, t)$ – давление, созданное акустической волной в слое с координатой z в момент времени t; $v = v(z, co)$ – скорость распространения частотной составляющей волнового пакета; co – круговая частота составляющей; $a = a(z, t, co)$, (З $= p(z, t, co)$ – коэффициенты, характеризующие затухание частотной составляющей волнового пакета.

Источник ультразвуковых сигналов, исследуемый образец и приёмник ультразвука образуют измерительный канал.



Измерительный канал

Передаточная функция сигнала для исследуемого образца имеет вид:

$$K(\omega) = A_2(\omega)/A_1(\omega).$$

В однородной среде параметры A_2 и A_3 не зависят от координат и времени. Производные в узле (i, j) аппроксимируем конечными разностями. В результате аппроксимации волновое уравнение приводит к разностной схеме. Моделируя процесс распространения акустической волны в неоднородной среде, получаем начальные условия динамики волнового процесса и осциллограммы для приемника и излучателя.

Далее строим модель импульса ультразвуковой волны по формуле:

$$M = A_2 \cdot e^{k_2 \cdot t} + A_1 \cdot e^{k_1 \cdot t}.$$

Полученные в результате расчета данные позволяют оценивать амплитуды, частоты и периоды ультразвуковых колебаний, которые при прохождении через дефект размножаются, и этот эффект может быть использован для разработки измерительного устройства.

ИМИТАЦИОННОЕ МОДЕЛИРОВАНИЕ АСР ПАРАМЕТРОВ КОНТРОЛИРУЕМОЙ АТМОСФЕРЫ НА ОСНОВЕ РАЗНОСТНЫХ УРАВНЕНИЙ

Ю.В. Мокичева – аспирантка
кафедры АСУ ТП «МЭИ (ТУ)»

Как известно, термообработка является наиболее эффективным методом повышения качества металла. В настоящее время процесс термообработки предпочтительнее проводить в среде контролируемой атмосферы. Контролируемая атмосфера – это газообразная среда, состоящая из одного или нескольких газов, которая оказывает направленное контролируемое воздействие на поверхностный слой металлов и сплавов. В результате термообработки в среде контролируемой атмосферы на поверхности металла отсутствует окисная пленка (окисный слой), что исключает потери металла в окалину и делает ненужными операции по последующей очистке деталей, шлифовке и их механической обработке. Также отсутствие обезуглероженного слоя на поверхности стали обеспечивает получение необходимой поверхностной твердости.

Для получения контролируемых атмосфер применяют газогенерирующие установки. При генерации газа особенно важно поддерживать влажность и температуру на определенном уровне. Один из возможных алгоритмов регулирования этих параметров изображен на рис. 1.

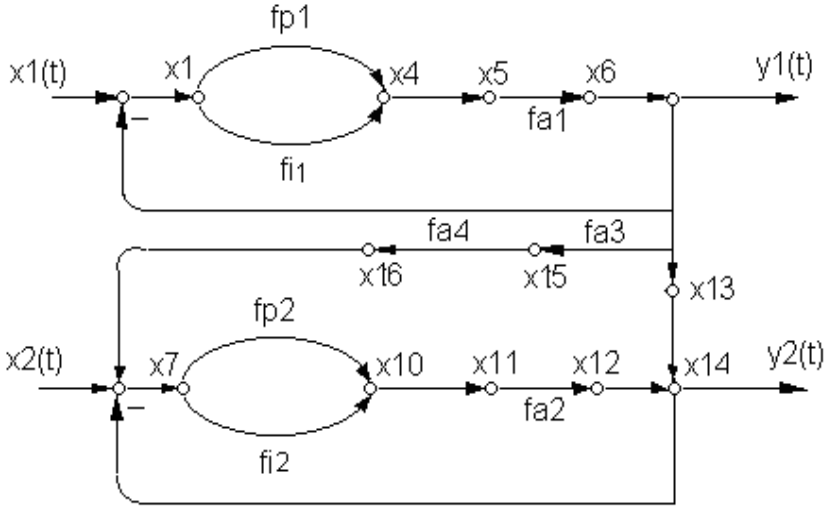


Рис. 1. Граф системы регулирования с компенсацией возмущения по температуре

Система, представленная в виде графа, состоит из двух контуров регулирования (контур регулирования влажности газа $y2(t)$ и контур регулирования температуры $y1(t)$; $x1(t)$, $x2(t)$ – задающие воздействия). На вход регулятора влажности, помимо отклонения регулируемой величины, подается сигнал от возмущения со стороны температуры, сформированный в блоке компенсации возмущения.

Идентификация объекта управления произведена по экспериментально полученным данным, оптимальные параметры настройки ПИ-регуляторов получены стандартным методом расширенной АФЧХ, передаточная функция компенсатора – из условия идеальной компенсации [1]. Для моделирования системы передаточные функции регуляторов разбиваются на пропорциональные $fp1$, $fp2$ и интегрирующие $fi1$, $fi2$ составляющие:

$$fi1(dt, x, y) = dt \cdot \frac{0{,}024}{0{,}266} \cdot x + y,$$

$$fi2(dt, x, y) = dt \cdot \frac{1{,}258}{0{,}414} \cdot x + y,$$

$$fp1(x) = 0{,}024,$$

$$fp2(x) = 1{,}258,$$

где x – соответствующие входные сигналы; y – соответствующие выходные сигналы; dt – интервал квантования по времени.

Передаточные функции объектов управления разбиваются на апериодические звенья $fa1$, $fa2$ и звенья запаздывания. Запаздывание моделируется с использованием условного оператора.

$$fa1(dt, x, y) = 2{,}1 \cdot \left(1 - \exp\left(\frac{-dt}{3{,}8}\right)\right) \cdot x + \exp\left(\frac{-dt}{3{,}8}\right) \cdot y,$$

$$fa2(dt, x, y) = 0{,}808 \cdot \left(1 - \exp\left(\frac{-dt}{1{,}06}\right)\right) \cdot x + \exp\left(\frac{-dt}{1{,}06}\right) \cdot y.$$

Передаточная функция компенсатора представляется в виде произведения передаточных функций апериодического $fa3$ и дифференцирующего звеньев.

$$fa3(dt, x, y) = -0{,}71 \cdot \left(1 - \exp\left(\frac{-dt}{0{,}401}\right)\right) \cdot x + \exp\left(\frac{-dt}{0{,}401}\right) \cdot y.$$

В соответствии с графом построена программа расчета переходных процессов (рис. 2).

$$
H := \left|
\begin{array}{l}
\begin{pmatrix} x80 \leftarrow 0 & x9_0 \leftarrow 0 & x10_0 \leftarrow 0 & x1_0 \leftarrow 0 & x2_0 \leftarrow 0 \\ x3_0 \leftarrow 0 & x4_0 \leftarrow 0 & x5_0 \leftarrow 0 & x6_0 \leftarrow 0 & x7_0 \leftarrow 0 \end{pmatrix} \\
\begin{pmatrix} x11_0 \leftarrow 0 & x12_0 \leftarrow 0 \\ x13_0 \leftarrow 0 & x14_0 \leftarrow 0 \\ x15_0 \leftarrow 0 & x16_0 \leftarrow 0 \end{pmatrix} \\
\text{for } j \in 0..N \\
\quad \left|
\begin{array}{l}
x1_{j+1} \leftarrow 2.1 - x6_j \\
x2_{j+1} \leftarrow x1_j \cdot 0.024 \\
x3_{j+1} \leftarrow fi1(dt, x1_j, x3_j) \\
x4_{j+1} \leftarrow x2_{j+1} + x3_{j+1} \\
x5_{j+1} \leftarrow if(t_j < 0.785, 0, x4_j) \\
x6_{j+1} \leftarrow fa1(dt, x5_j, x6_j) \\
x7_{j+1} \leftarrow 0.8 - x14_j - x16_j \\
x8_{j+1} \leftarrow x7_j \cdot 1.258 \\
x9_{j+1} \leftarrow fi2(dt, x7_j, x9_j) \\
x10_{j+1} \leftarrow x8_{j+1} + x9_{j+1} \\
x11_{j+1} \leftarrow if(t_j < 0.224, 0, x10_j) \\
x12_{j+1} \leftarrow fa2(dt, x11_j, x12_j) \\
x13_{j+1} \leftarrow x6_j \cdot (-0.99) \\
x14_{j+1} \leftarrow x13_{j+1} + x6_{j+1} \\
x15_{j+1} \leftarrow fa3(dt, x6_j, x15_j) \\
x16_{j+1} \leftarrow 0.54 \cdot (x15_{j+1} - x15_j) + 0.51 \cdot x15_j + x16_j
\end{array}
\right. \\
\begin{pmatrix} x6 \\ x14 \end{pmatrix}
\end{array}
\right.
$$

Рис. 2. Программа расчета переходных процессов

На рис. 3 представлены результаты имитационного моделирования переходных процессов в системе регулирования параметров контролируемой атмосферы с компенсацией возмущений по температуре.

Анализ переходных процессов показывает, что значение влажности устанавливается за 2 часа, перерегулирование составляет не более 4 %.

Температура устанавливается за 3 часа, перерегулирование по температуре не более 7 %.

Реализация данной системы регулирования с компенсацией возмущения позволит сократить время разогрева реторты на 9 часов и время установления влажности на один час.

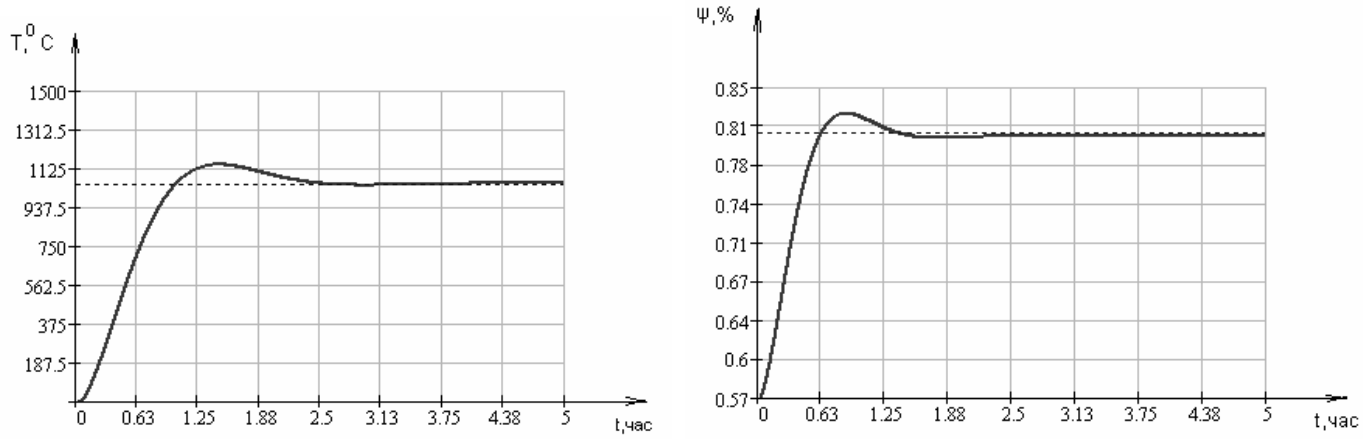


Рис. 3. Переходные процессы системы

Однако время регулирования достаточно велико, поэтому требуется ввести каскадное регулирование. Граф системы изображен на рис. 4.

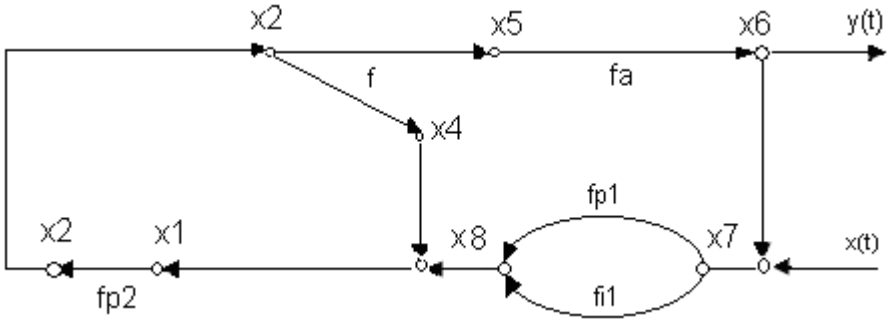


Рис. 4. Граф каскадной системы регулирования

В графе системы выделено два контура регулирования: внутренний контур – контур регулирования температуры контролируемой атмосферы, внешний – контур регулирования влажности. В качестве регулятора температуры используется П-регулятор с передаточной функцией *fp*2:

$$fp2(x) = 1{,}748.$$

Расчет оптимального значения коэффициента передачи вспомогательного П-регулятора произведен по КЧХ обобщенного объекта. Поиск осуществляется путем выбора положения центра М-окружности *u* так, чтобы произошло касание этой окружности с КЧХ обобщенного объекта. Такое касание произошло при $u = 5{,}2$, что дает значение коэффициента передачи регулятора: k_n = 1,748.

Командное воздействие этому регулятору формирует ПИ-регулятор влажности с передаточной функцией ($fp1 + fi1$):

$$fp1(x) = 1{,}269\,,$$

$$fi1(dt, x, y) = dt \cdot \frac{1{,}269}{0{,}344} \cdot x + y\,.$$

Настройка ПИ-регулятора выполнена по комплексно-частотной характеристике (КЧХ) виртуального объекта.

Передаточные функции объекта управления получены в результате аппроксимации в среде MathCad экспериментально полученных кривых разгона [2]:

$$fa(dt, x, y) = 2{,}1 \cdot (1 - \exp(\frac{-dt}{4})) \cdot x + \exp(\frac{-dt}{4}) \cdot y$$

$$f(x) = -0{,}086\,.$$

В соответствии с графом построена программа имитационного моделирования каскадной системы регулирования.

```
H(x) := | ( x8_0 ← 0  μi_0 ← 0  μp_0 ← 0  x1_0 ← 0  x2_0 ← 0 )
        | ( x3_0 ← 0  x4_0 ← 0  x5_0 ← 0  x6_0 ← 0  x7_0 ← 0 )
        | for  j ∈ 0.. N
        |   | x1_(j+1) ← x8_j − x4_j
        |   | x2_(j+1) ← x1_j · 1.748
        |   | x4_(j+1) ← x2_j · (−0.086)
        |   | x5_(j+1) ← if(t_j < 0.785, 0, x2_j)
        |   | x6_(j+1) ← fa(dt, x5_j, x6_j)
        |   | x7_(j+1) ← x − x6_j
        |   | μi_(j+1) ← fi(dt, x7_j, μi_j)
        |   | μp_(j+1) ← x7_j · (−1.269)
        |   | x8_(j+1) ← μi_(j+1) + μp_(j+1)
        | x6
```

Рис. 5. Программа имитации работы каскадной системы

Результаты имитационного моделирования показаны на рис. 6.

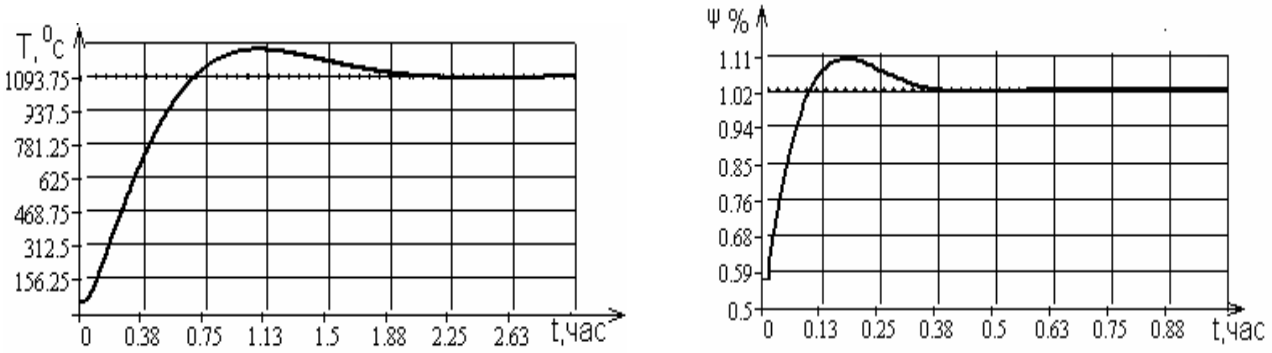


Рис. 6. Переходные процессы в каскадной системе регулирования

Анализ переходных процессов при каскадном регулировании показывает, что значение влажности устанавливается за 0,38 часа, что в пять раз быстрее, чем у системы с компенсацией. Перерегулирование по влажности составляет не более 10 %, что в два раза больше, чем у системы с компенсацией. Значение температуры при каскадном регулировании устанавливается за 2,25 часа, что в 1,3 раза быстрее, чем у системы с компенсацией. Перерегулирование при этом не более 8 %, что примерно то же, что у системы с компенсацией.

Если учесть, что качество переходных процессов по температуре примерно одинаково в обеих схемах, а перерегулирование не влияет на качество продукции, то, конечно, второй алгоритм лучше, потому что он более быстродействующий (примерно в пять раз).

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. Теория и практика построения и функционирования АСУ ТП: Труды Международной научной конференции. – М.: МЭИ, 2005. – 216 с., ил.

2. Радиоэлектроника, электротехника и энергетика // Двенадцатая Международная научно-техническая конференция студентов и аспирантов: Тез. докл. В 3-х т. – М.: МЭИ, 2006. Т. 1. –560 с.

3. *Панько М.А.* Расчет и моделирование автоматических систем регулирования в среде MathCad: Учебное пособие. – М.: МЭИ, 2004. –112 с.

4. *Ротач В.Я.* Теория автоматического управления: Учебник для вузов. – 2-е изд., перераб. и доп. – М.: МЭИ, 2004. – 400 с.

ГИДРОМЕХАНИЧЕСКАЯ МОДЕЛЬ ВЗАИМОДЕЙСТВИЯ СФЕРИЧЕСКИХ ОБЪЕКТОВ В ЖИДКОСТИ

А.В. Шоричев **–** канд. техн. наук, доцент
филиала «МЭИ (ТУ)» в г. Волжском

В природе и технике существует множество различных сферических объектов, вращающихся в жидкости и взаимодействующих между собой.

В процессе вращения сферические объекты индуцируют в жидкости возмущенное неравномерное поле скоростей.

Для решения некоторых практических задач необходимо знать возмущенное поле скоростей, индуцированное вращающимися сферическими объектами в жидкости, а также их силовое взаимодействие. Рассмотрим взаимодействие вращающихся сферических объектов в жидкости (сферические вихри) между собой и их взаимодействие с невращающимися сферическими объектами (сферическими частицами). При исследовании взаимодействия примем следующие допущения:

1) взаимодействия происходят в идеальной потенциальной жидкости;

2) жидкость является сплошной средой, непрерывно распределенной в выделенном объеме;

3) индуцируемые сферическими вихрями скорости (рис. 1) изменяются по закону:

$$\vec{V} = \frac{\tilde{J}_o\left(\vec{i}_\omega \cdot \vec{i}_R\right)}{R^n}, \tag{1}$$

где $\tilde{J}_o = J_o r_o^{n-1} = \frac{2}{3}\pi\omega r_o^{n+1}$ – интенсивность сферического вихря; $\vec{i}_\omega$ – орт вектора угловой скорости $\vec{\omega}$; $\vec{i}_R$ – орт вектора $\vec{R}$; n – показатель степени, зависящий от свойств жидкости; R – расстояние от центра вихря до рассматриваемой точки пространства; r_o – радиус сферической частицы (вихря).

Определим силы и моменты, действующие на сферические объекты, находящиеся в возмущенном поле скоростей.

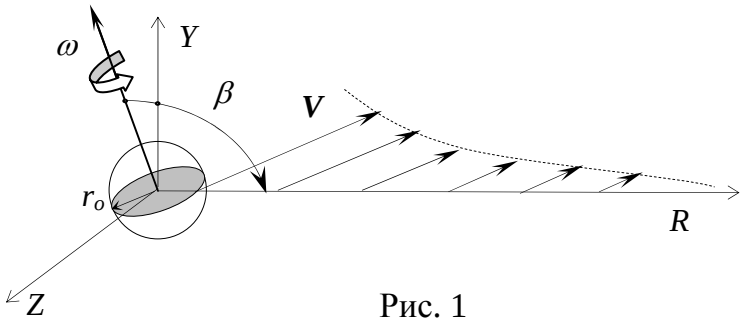


Рис. 1

На основании допущения 1 пренебрегаем силами вязкости и используем уравнения движения идеальной жидкости [1], которые, с учетом допущения 2 о потенциальности жидкости, можно записать так:

$$F_x = m\left(\frac{\partial V_x}{\partial t} + V_x\frac{\partial V_x}{\partial x} + V_y\frac{\partial V_y}{\partial x} + V_z\frac{\partial V_z}{\partial x}\right) = -\frac{m}{\rho}\frac{\partial p}{\partial x},$$

$$F_y = m\left(\frac{\partial V_y}{\partial t} + V_x\frac{\partial V_x}{\partial y} + V_y\frac{\partial V_y}{\partial y} + V_z\frac{\partial V_z}{\partial y}\right) = -\frac{m}{\rho}\frac{\partial p}{\partial y},$$

$$F_z = m\left(\frac{\partial V_z}{\partial t} + V_x\frac{\partial V_x}{\partial z} + V_y\frac{\partial V_y}{\partial z} + V_z\frac{\partial V_z}{\partial z}\right) = -\frac{m}{\rho}\frac{\partial p}{\partial z}, \tag{2}$$

где m – масса выделенного объема в жидкости; ρ – плотность жидкости; V – скорость движения жидкости; p – давление жидкости.

Для определения сил давления на поверхности сферической частицы выделим элементарную площадку dS и определим силу давления dF (рис. 2).

Элементарная сила давления, направленная по координате X, равна

$$dF_x = \left\{ \left[P_o - \left(\frac{\partial P}{\partial x} \right)_o dx \right] - \left[P_o + \left(\frac{\partial P}{\partial x} \right)_o \right] dx \right\} dy\, dz,$$

где P_o – давление жидкости в центре сферической частицы (в точке О); $\left(\frac{\partial P}{\partial x} \right)_o$ – частная производная давления по координате X в центре сферической частицы (в точке О).

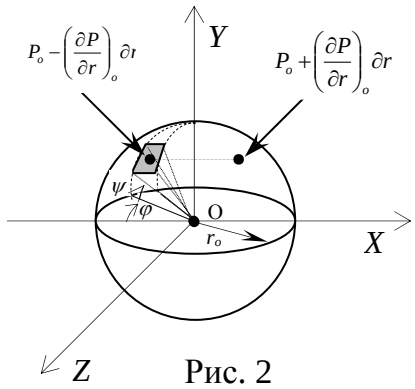


Рис. 2

Предположим, что данная частная производная остается постоянной при изменении координат y, z. Учитывая, что $dz = r_o \cos\varphi \cos\psi\, d\varphi$, $dy = r_o \cos\psi\, d\psi$, $dx = r_o \cos\psi\, d\varphi$, где φ, ψ – углы, характеризующие положение площадки dS на поверхности сферической частицы, определим силу $F_x = -8 r_o^3 \int_0^{\frac{x}{2}} \int_0^{\frac{x}{2}} \left(\frac{\partial P}{\partial x} \right)_o \cos^3\psi \cos^2\varphi\, \partial\psi\, \partial\varphi$. Выполнив интегрирование, получим $F_x = -\frac{4\pi}{3} \left(\frac{\partial P}{\partial x} \right)_o r_o^3$. Аналогично можно получить выражения для определения сил F_y и F_z, действующих на сферическую частицу. Запишем полученные выражения с учетом того, что масса сферической частицы равна $m_o = \frac{4}{3} \pi \rho_o r_o^3$:

$$F_x = -\frac{m_o}{\rho_o} \left(\frac{\partial P}{\partial x} \right)_o, \quad F_y = -\frac{m_o}{\rho_o} \left(\frac{\partial P}{\partial y} \right)_o, \quad F_z = -\frac{m_o}{\rho_o} \left(\frac{\partial P}{\partial z} \right)_o, \tag{3}$$

где m_o – масса сферической частицы; ρ_o – плотность сферической частицы. Тогда уравнения движения идеальной жидкости (2), с учетом того, что размеры выделенного объема в жидкости совпадают с размерами сферической частицы, и с учетом уравнений (3), можно записать:

$$F_x = m_o \left(\frac{\partial V_x}{\partial t} + V_x \frac{\partial V_x}{\partial x} + V_y \frac{\partial V_y}{\partial x} + V_z \frac{\partial V_z}{\partial x} \right) = -\frac{m_o}{\rho_o} \left(\frac{\partial p}{\partial x} \right)_o,$$

$$F_y = m_o \left(\frac{\partial V_y}{\partial t} + V_x \frac{\partial V_x}{\partial y} + V_y \frac{\partial V_y}{\partial y} + V_z \frac{\partial V_z}{\partial y} \right) = -\frac{m_o}{\rho_o} \left(\frac{\partial p}{\partial y} \right)_o,$$

$$F_z = m_o \left(\frac{\partial V_z}{\partial t} + V_x \frac{\partial V_x}{\partial z} + V_y \frac{\partial V_y}{\partial z} + V_z \frac{\partial V_z}{\partial z} \right) = -\frac{m_o}{\rho_o} \left(\frac{\partial p}{\partial z} \right)_o. \tag{4}$$

Уравнения (4) показывают, что для определения сил, действующих на сферическую частицу, находящуюся в жидкости, можно использовать известные уравнения движения идеальной жидкости [1].

Из уравнений движения идеальной жидкости (2) выводится уравнение Эйлера [1]:

$$P + \frac{\rho V^2}{2} = \text{const}, \quad \text{где } \rho - \text{плотность жидкости}, \qquad (5)$$

которое представляет собой закон сохранения энергии – сумма энергий (потенциальной – P и кинетической – $V^2/2$), отнесенных к единице массы жидкости, во всех точках жидкости имеет одну и ту же величину. Если при переходе от одной точки жидкости к другой увеличивается потенциальная энергия P, то обязательно должна уменьшиться кинетическая энергия $V^2/2$ так, что сумма их остается неизменной, и наоборот.

Рассмотрим взаимодействие двух сферических вихрей. На основании допущения о потенциальности жидкости можно использовать принцип суперпозиции, согласно которому результирующий эффект сложного процесса воздействия представляет собой сумму эффектов, вызываемых каждым воздействием в отдельности, при условии, что последние не влияют друг на друга. Для анализа сил, возникающих в результате взаимодействия вихрей, используем уравнение Эйлера (5). Каждый сферический вихрь (рис. 3) индуцирует в районе другого вихря скорости согласно закону (1).

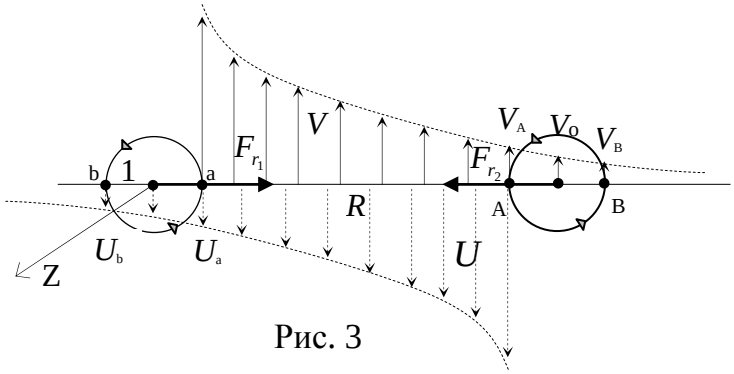


Рис. 3

Так, вихрь-1 индуцирует в точке А вихря-2 скорость $\vec{V}_A$, а в точке В – скорость $\vec{V}_B$.

Согласно закону (1) $\left|\vec{V}_A\right| > \left|\vec{V}_B\right|$, поэтому давление жидкости в точке А меньше, чем давление в точке В ($P_A < P_B$), что следует из закона сохранения энергии (5). В результате этого на вихрь-2 будет действовать сила давления $\vec{F}_{r_2}$, направленная к вихрю-1. Аналогично вихрь-2 действует на вихрь-1 ($\left|\vec{U}_A\right| > \left|\vec{U}_B\right| \Rightarrow P_A < P_B$), и сила $\vec{F}_{r_1}$ направлена к вихрю-2. Таким образом, в результате взаимодействия двух сферических вихрей возникают силы давления, направленные навстречу друг другу, что обеспечивает их взаимное притяжение. Кроме этого, каждый сферический вихрь индуцирует собственные скорости (рис. 4). Для упрощения анализа рассмотрим случай, когда векторы $\vec{\omega}_1$ и $\vec{\omega}_2$ находятся в одной плоскости и углы между векторами $\vec{\omega}_1$, $\vec{R}$ и $\vec{\omega}_2$, $\vec{R}$ равны 90°.

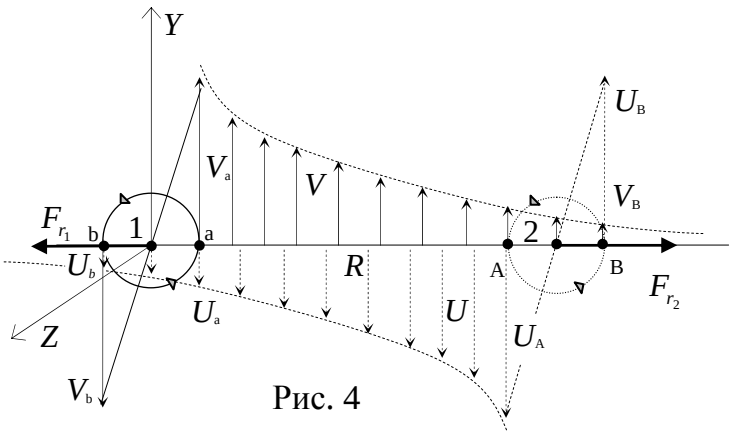


Рис. 4

Тогда вихрь-1 индуцирует в точке А скорость $\vec{V}_A$, а в точке В – $\vec{V}_B$. Согласно закону (1) $\left|\vec{V}_A\right| > \left|\vec{V}_B\right|$. В то же время вихрь-2 индуцирует в точке А скорость $\vec{U}_A$, а в точке В – скорость $\vec{U}_B$. Скорости $\vec{U}_A$ и $\vec{U}_B$ равны по модулю, но противоположны по направлению ($\left|\vec{U}_A\right| = \left|\vec{U}_B\right|$). Если интенсивность вихрей одинаковая ($\tilde{J}_1 = \tilde{J}_2$), то $\left|\vec{U}_A\right| > \left|\vec{V}_A\right|$ и $\left|\vec{U}_B\right| > \left|\vec{V}_B\right|$. Для определения суммарных индуцируемых скоростей в точках А и В необходимо выполнить векторное сложение. Если векторы $\vec{\omega}_1$ и $\vec{\omega}_2$ коллинеарные и имеют одинаковые знаки, то $\left|V_{Az}\right| = \left|V_A - U_A\right|$ и $\left|V_{Bz}\right| = \left|V_B + U_B\right|$. Очевидно, что $\left|V_{Bz}\right| > \left|V_{Az}\right|$, поэтому давление жидкости в точке В меньше, чем в точке А ($P_B < P_A$). В результате этого на вихрь-2 будет действовать сила F_{r_2}, направленная от вихря-1. Аналогично вихрь-2 воздействует на вихрь-1, и сила давления F_{r_1} направлена от вихря-2. Если же векторы коллинеарны, но имеют противоположные знаки, то, рассуждая аналогично, легко убедиться в том, что на вихрь-1 и вихрь-2 будут действовать силы F_{r_1} и F_{r_2}, направленные навстречу друг другу, что обеспечивает их взаимное притяжение (рис. 5).

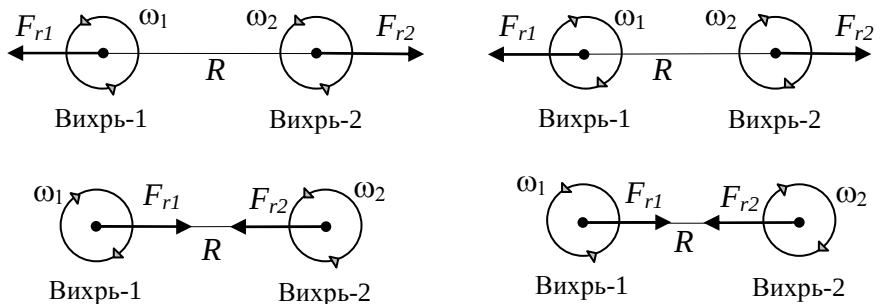


Рис. 5

В общем случае силы взаимодействия зависят от положения векторов $\vec{\omega}_1$, $\vec{\omega}_2$ в пространстве, от интенсивности вихрей $\tilde{J}_1$, $\tilde{J}_2$ и от расстояния между ними *R*. Причем, если $\tilde{J}_1 \neq \tilde{J}_2$, то силы взаимного притяжения могут, в зависимости от расстояния, меняться на силы взаимного отталкивания (рис. 6), в чем нетрудно убедиться, проведя аналогичные рассуждения.

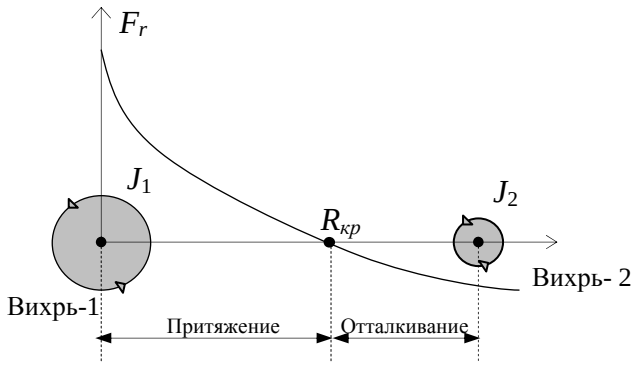


Рис. 6

Если угол β (рис. 1) между вектором $\vec{\omega}$, $\vec{R}$ не равен 90°, то на сферическую частицу, находящуюся в индуцируемом поле скоростей, будет действовать также сила F_y, а если угол β не равен 0, то также будет действовать сила F_z. Определим силы и моменты в связанной системе координат, ось *r* которой направлена по $\vec{R}$, и проходит через центры сферических вихрей, ось *Y* находится в одной плоскости с $\vec{\omega}$ одного из сферических вихрей, ось *Z* образует правую тройку (рис. 7).

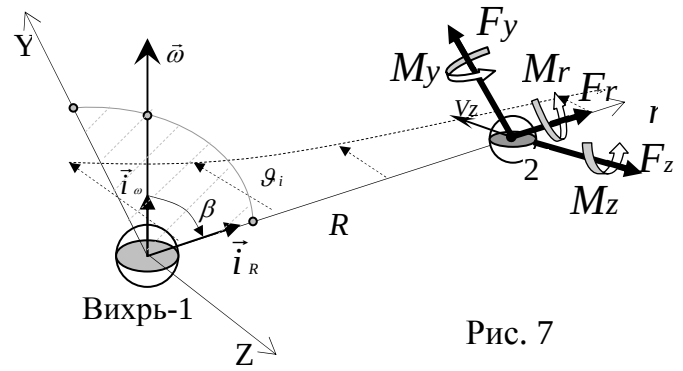


Рис. 7

К определению силы F_r

Определим данную силу применительно к сферическому вихрю-2 (рис. 7), находящемуся в поле скоростей, индуцируемых вихрем-1. Тогда, согласно выражениям (3) для связанной системы координат, можно записать:

$$F_r = m_o\left[\left(\frac{\partial V_r}{\partial t}\right)_o + V_o\left(\frac{\partial V}{\partial R}\right)_o\right] = -\frac{m_o}{\rho_o}\left(\frac{\partial P}{\partial r}\right)_o, \qquad (6)$$

где V_o – скорость, индуцируемая вихрем-1 в центре сферического вихря-2; $\left(\frac{\partial V}{\partial r}\right)_o$ – производная индуцируемой скорости по координате *r* в центре сферического вихря-2; $\left(\frac{\partial V_r}{\partial t}\right)_o$ – частная производная индуцируемой скорости по времени *t* в центре сферического вихря-2.

Согласно выражению (1):

$$\overrightarrow{V_o} = \frac{\tilde{J}_1\left(\vec{i}_{\omega 1} \cdot \vec{i}_R\right)}{R^n}, \tag{7}$$

где $\tilde{J}_1$ – интенсивность сферического вихря-1; R – расстояние между центрами вихрей.

Определим производную $\left(\frac{\partial V}{\partial r}\right)_o$.

Учитывая, что $U_B = -U_A$ (рис. 4), получим:

$$\left(\frac{\partial V}{\partial r}\right)_o = \lim_{\Delta r \to 0} \frac{\left(V_B + U_B\right) - \left(V_A + U_A\right)}{2\Delta r} = \lim_{\Delta r \to 0} \frac{V_B - V_A}{2\Delta r} + \lim_{\Delta r \to 0} \frac{U_B}{2\Delta r}, \tag{8}$$

где Δr – расстояние до рассматриваемых точек А и В от центра сферического вихря-2.

Подставив в первое слагаемое выражения для частной производной (8) вместо V_A и V_B значения согласно выражению (1), получим:

$$\lim_{\Delta r \to 0}\left(\frac{V_B - V_A}{2\Delta r}\right) = \lim_{\Delta r \to 0}\left(\frac{\tilde{J}_1\left|\tilde{i}_{\omega 1} \cdot \tilde{i}_R\right|}{2\Delta r\left(R + \Delta r\right)^n} - \frac{\tilde{J}_1\left|\tilde{i}_{\omega 1} \cdot \tilde{i}_R\right|}{2\Delta r\left(R - \Delta r\right)^n}\right) =$$

$$= \lim_{\Delta r \to 0}\left(\frac{\tilde{J}_1\left|\tilde{i}_{\omega 1} \cdot \tilde{i}_R\right|}{2\Delta r}\left[\frac{R^n\left(1 - \frac{\Delta r}{R}\right)^n - R^n\left(1 + \frac{\Delta r}{R}\right)^n}{\left(R^2 - \Delta r^2\right)^n}\right]\right).$$

Разложив $\left(1 - \frac{\Delta r}{R}\right)^n$ и $\left(1 + \frac{\Delta r}{R}\right)^n$ по биному Ньютона

$$\left(1 + \frac{\Delta r}{R}\right)^n = 1 + n\frac{\Delta r}{R} + \frac{n(n-1)}{1 \cdot 2}\left(\frac{\Delta r}{R}\right)^2 + \ldots; \left(1 - \frac{\Delta r}{R}\right)^n = 1 - n\frac{\Delta r}{R} - \frac{n(n-1)}{1 \cdot 2}\left(\frac{\Delta r}{R}\right)^2 - \ldots,$$

ограничившись первыми двумя членами и выполнив преобразования, получим: $\lim_{\Delta r \to 0} \frac{V_B - V_A}{2\Delta r} = -\frac{n\tilde{J}_1\left|\vec{i}_{\omega_1} \cdot \vec{i}_R\right|}{R^{n+1}}$.

При определении данного предела не учитывалось изменение индуцированных скоростей V_A и V_B в процессе обтекания сферической частицы. Известно, что при обтекании цилиндрического тела равномерным идеальным потоком, скорости на поверхности цилиндра изменяются по закону [1] $V = 2V_\infty \sin\varphi$ (рис. 8).

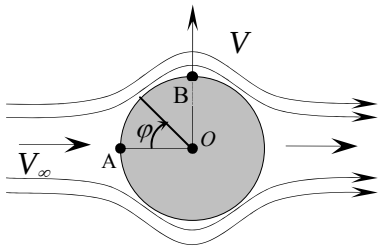


Рис. 8

Поэтому в точке А, где $\varphi = 0$ $V = 0$, а в точке В, где $\varphi = 90^{o}$ $V = 2V_{\infty}$, то есть в процессе обтекания цилиндрического тела идеальным равномерным потоком, скорость потока максимально увеличивается в два раза по сравнению со скоростью невозмущенного потока. При обтекании сферической частицы неравномерным потоком, индуцируемым сферическим вихрем, складываются условия обтекания, аналогичные условиям при обтекании бесконечного цилиндра равномерным потоком. Это связано с тем, что индуцируемые сферическим вихрем скорости зависят от угла β между векторами $\vec{\omega}$ и $\vec{R}$ (рис. 9).

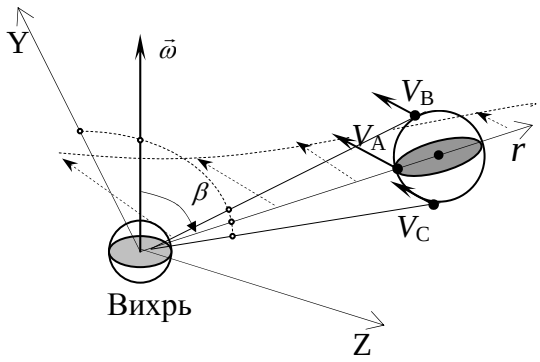


Рис. 9

Если угол $\beta = 90^{o}$, то индуцированная скорость будет максимальной при заданном расстоянии до рассматриваемой точки, а давление минимальным. Тогда скорости V_B и V_C будут меньше скорости V_A, а давление, наоборот, в точках В и С больше, чем в точке А. Поэтому не будет происходить перетекание потока из точки А в точки В и С сферической частицы. Таким образом, в процессе обтекания сферической частицы индуцированным неравномерным потоком можно рассматривать элементарные участки сферической частицы как участки бесконечного цилиндра, а при определении производной необходимо учитывать увеличение индуцированных скоростей V_A и V_B (рис. 4) в два раза. Тогда

$$\lim_{\Delta r \to 0} \frac{V_B - V_A}{2\Delta r} = -\frac{2n\tilde{J}_1 \left| \vec{i}_{\omega_1} \cdot \vec{i}_R \right|}{R^{n+1}}. \qquad (9)$$

Определим значение второго члена $\lim\limits_{\Delta r \to 0} \frac{U_B}{\Delta r}$ выражения (8). Учитывая конечные размеры сферического вихря-2, значение скорости U_B можно определить по выражению $U_B = \omega_2 \cdot r_o$, где ω_2 – угловая скорость вращения сферического вихря-2; r_o – радиус сферического вихря-2. С учетом значения для интенсивности сферического вихря $\tilde{J}$ (1) и пространственного положения векторов $\vec{\omega}_1$ и $\vec{\omega}_2$ относительно выбранной связанной системы координат можно получить:

$$\lim_{\Delta r \to r_o} \frac{U_B}{\Delta r} = \frac{3\tilde{J}_2 \left(\vec{i}_{\omega_2} \cdot \vec{i}_y \right)}{2\pi\, r_o^{n+1}}, \qquad (10)$$

где $\left(\vec{i}_{\omega_2} \cdot \vec{i}_y \right)$ – скалярное произведение ортов векторов $\vec{\omega}_2$ и координаты Y.

Подставляя полученные значения (9) и (10) в выражение для производной (8), получим:

$$\left(\frac{\partial V}{\partial r}\right)_o = -\frac{2n\tilde{J}_1\left|\vec{i}_{\omega_1}\cdot\vec{i}_R\right|}{R^{n+1}} + \frac{3\tilde{J}_2\left(\vec{i}_{\omega_2}\cdot\vec{i}_y\right)}{2\pi r_o^{n+1}}, \qquad (11)$$

где $\tilde{J}_1$ – интенсивность сферического вихря-1; $\tilde{J}_2$ – интенсивность сферического вихря-2.

Подставляя значения выражений (7) и (11) в выражение (6), получим выражение для определения силы F_r, действующей на сферический вихрь-2:

$$F_r = m_o\left(\frac{\partial V_r}{\partial t}\right)_o - \frac{2nm_o\tilde{J}_1^2\left|\vec{i}_{\omega_1}\cdot\vec{i}_R\right|}{R^{2n+1}} + \frac{3m_o\tilde{J}_1\tilde{J}_2\left(\vec{i}_{\omega_2}\cdot\vec{i}_y\right)\left|\vec{i}_{\omega_1}\cdot\vec{i}_R\right|}{2\pi R^n r_o^{n+1}}. \qquad (12)$$

К определению силы F_y

Определим данную силу применительно к сферическому вихрю-2 (рис. 7), находящемуся в поле скоростей, индуцируемых вихрем-1. Согласно выражениям (4) для связанной системы координат можно записать:

$$F_y = m_o\left[\left(\frac{\partial V_y}{\partial t}\right)_o + V_o\left(\frac{\partial V}{\partial y}\right)_o\right] = -\frac{m_o}{\rho_o}\left(\frac{\partial P}{\partial y}\right)_o, \qquad (13)$$

где V_o – скорость, индуцируемая вихрем-1 в центре сферического вихря-2; $\left(\frac{\partial V}{\partial y}\right)_o$ – производная индуцируемой скорости по координате y в центре сферического вихря-2; $\left(\frac{\partial V_y}{\partial t}\right)_o$ – частная производная индуцируемой скорости по времени t в центре сферического вихря-2; m_o – масса сферического вихря-2.

Согласно выражению (1):

$$\overrightarrow{V_o} = \frac{\tilde{J}_1\left(\vec{i}_{\omega 1}\cdot\vec{i}_R\right)}{R^n}, \qquad (14)$$

где $\tilde{J}_1$ – интенсивность сферического вихря-1; R – расстояние между центрами вихрей.

Определим производную $\left(\frac{\partial V}{\partial y}\right)_o$:

$$\left(\frac{\partial V}{\partial y}\right)_0 = \lim_{\Delta y\to 0}\frac{\left(V_{Z_A}+U_A\right)-\left(V_{Z_B}+U_B\right)}{2\Delta y} = \lim_{\Delta y\to 0}\frac{V_{Z_A}-V_{Z_B}}{2\Delta y} + \lim_{\Delta y\to 0}\frac{U_A-U_B}{2\Delta y}, \qquad (15)$$

где (рис. 10) V_{Z_A} – проекция на ось Z индуцируемой скорости вихрем-1 в точке А вихря-2; V_{Z_B} – проекция на ось Z индуцируемой скорости вихрем-1 в точке В вихря-2; U_A и U_B – проекции на ось Z собственных индуцируемых скоростей вихрем-2.

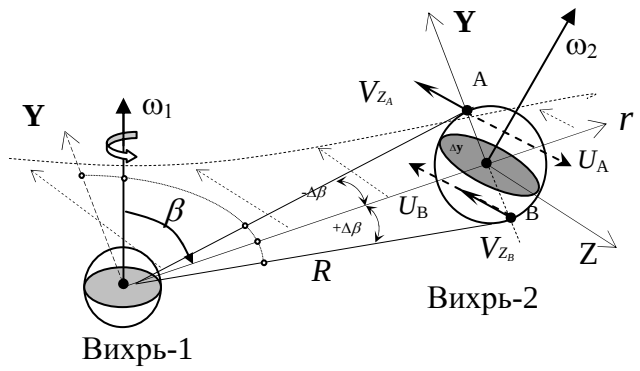


Рис. 10

Согласно выражению (1) можно записать:

$$V_{Z_A} = \frac{\tilde{J}_1 \sin(\beta - \Delta\beta)}{(R^2 + \Delta y^2)^{\frac{n}{2}}}, \text{ а } V_{Z_B} = \frac{\tilde{J}_1 \sin(\beta + \Delta\beta)}{(R^2 + \Delta y^2)^{\frac{n}{2}}},$$

где $\sin(\beta \pm \Delta\beta) = \left|\vec{i}_{\omega_1} \cdot \vec{i}_R\right|$.

Тогда

$$\lim_{\Delta y \to 0} \frac{V_{Z_A} - V_{Z_B}}{2\Delta y} = \lim_{\Delta y \to 0} \left[\frac{\tilde{J}_1 \sin(\beta - \Delta\beta)}{2\Delta y (R^2 + \Delta y^2)^{\frac{n}{2}}} - \frac{\tilde{J}_1 \sin(\beta + \Delta\beta)}{2\Delta y (R^2 + \Delta y^2)^{\frac{n}{2}}} \right] =$$

$$= \lim_{\Delta y \to 0} \left\{ \frac{\tilde{J}_1 \left[\sin(\beta - \Delta\beta) - \sin(\beta + \Delta\beta)\right]}{2\Delta y (R^2 + \Delta y^2)^{\frac{n}{2}}} \right\}.$$

Выполнив преобразования, учитывая эффект увеличения индуцированных скоростей при обтекании сферической частицы (рис. 8), а также то, что $\sin(\beta + \Delta\beta) = \sin\beta \cos\Delta\beta + \cos\beta \sin\Delta\beta$,

$\sin(\beta - \Delta\beta) = \sin\beta \cos\Delta\beta - \cos\beta \sin\Delta\beta$, $\sin\Delta\beta \approx \dfrac{\Delta y}{R}$ при $R >> \Delta y$, получим:

$$\lim_{\Delta y \to 0} \frac{V_{Z_A} - V_{Z_B}}{2\Delta y} = \lim_{\Delta y \to 0} \left[-\frac{2\tilde{J}_1 \cos\beta \sin\Delta\beta}{\Delta y (R^2 + \Delta y^2)^{\frac{n}{2}}} \right] = -\frac{2\tilde{J}_1 \cos\beta}{R^{n+1}} = -\frac{2\tilde{J}_1 \left(\vec{i}_{\omega 1} \cdot \vec{i}_R\right)}{R^{n+1}}. \quad (16)$$

Определим вторую составляющую выражения (15). Учитывая, что $\left|U_A\right| = \left|U_B\right| = U$, но противоположны по направлению, можно записать $\lim\limits_{\Delta y \to 0} \dfrac{U_A - U_B}{2\Delta y} = \lim\limits_{\Delta y \to 0} \dfrac{U}{\Delta y}$, где U – модуль скорости, индуцируемой вихрем-2 в точках А и В.

Рассуждая аналогично, как и при определении предела $\lim\limits_{\Delta r \to 0} \frac{U_B}{\Delta r}$ (выражение 10), получим;

$$\lim_{\Delta y \to r_o} \frac{U}{\Delta y} = -\frac{3\tilde{J}_2 (\vec{i}_{\omega_2} \cdot \vec{i}_R)}{2\pi\ r_o^{n+1}}, \tag{16}$$

где $(\vec{i}_{\omega_2} \cdot \vec{i}_R)$ – скалярное произведение ортов векторов $\vec{\omega}_2$ и $\vec{R}$; r_o – радиус сферического вихря-2.

Подставляя полученные выражения (16) и (17) в выражение (15), получим:

$$\left(\frac{\partial V}{\partial y}\right)_o = -\frac{2\tilde{J}_1\left(\vec{i}_{\omega 1} \cdot \vec{i}_R\right)}{R^{n+1}} - \frac{3\tilde{J}_2(\vec{i}_{\omega_2} \cdot \vec{i}_R)}{2\pi\ r_o^{n+1}}. \tag{18}$$

С учетом полученных выражений (14) и (18) выражение для силы F_y в связанной системе координат запишется:

$$F_y = m_o\left(\frac{\partial V_y}{\partial t}\right)_o - \frac{2m_o\tilde{J}_1^2\left(\vec{i}_{\omega 1} \cdot \vec{i}_R\right)\left|\vec{i}_{\omega 1} \cdot \vec{i}_R\right|}{R^{2n+1}} - \frac{3m_o\tilde{J}_1\tilde{J}_2\ (\vec{i}_{\omega_2} \cdot \vec{i}_R)\left|\vec{i}_{\omega 1} \cdot \vec{i}_R\right|}{2\pi\ R^n\ r_o^{n+1}}. \tag{19}$$

К определению силы F_z

Определим данную силу применительно к сферическому вихрю-2 (рис. 7), находящемуся в поле скоростей, индуцируемых вихрем-1. Согласно выражениям (4) для связанной системы координат можно записать:

$$F_z = m_o\left[\left(\frac{\partial V_z}{\partial t}\right)_o + V_o\left(\frac{\partial V}{\partial z}\right)_o\right] = -\frac{m_o}{\rho_o}\left(\frac{\partial P}{\partial z}\right)_o, \tag{20}$$

где V_o – скорость, индуцируемая вихрем-1 в центре сферического вихря-2, которая в связанной системе координат совпадает по направлению с осью Z; $\left(\frac{\partial V}{\partial z}\right)_o$ – производная индуцируемой скорости по координате Z в центре сферического вихря-2; $\left(\frac{\partial V_z}{\partial t}\right)_o$ – частная производная индуцируемой скорости по времени t в центре сферического вихря-2; m_o – масса сферического вихря-2.

Согласно выражению (1) так же, как и при определении сил F_r и F_y,

$$\overrightarrow{V_o} = \frac{\tilde{J}_1\left(\vec{i}_{\omega 1} \cdot \vec{i}_R\right)}{R^n}. \tag{21}$$

Определим производную $\left(\frac{\partial V}{\partial z}\right)_o$. Учитывая то, что взаимодействия сферических вихрей рассматриваются в рамках идеальной жидкости, и то,

что в данном случае сила F_z есть ни что иное, как сила сопротивления, которая равна нулю в рамках идеальной жидкости (известный Парадокс Эйлера-Даламбера [1]), значение производной можно определить по выражению:

$$\left(\frac{\partial V}{\partial z}\right)_o = -c_Z \frac{V_o}{2r_o} = -c_z \frac{\tilde{J}_1(\vec{i}_{\omega_1} \cdot \vec{i}_R)}{2\, r_o R^n}, \tag{22}$$

где C_z – безразмерный коэффициент. Данный коэффициент учитывает форму обтекаемого тела и свойства жидкости и определяется, как правило, экспериментально.

Подставляя полученные выражения (21) и (22) в выражение (20), получим выражение для определения силы F_z:

$$F_z = m_o\left(\frac{\partial V_z}{\partial t}\right)_o - \frac{C_z m_o \tilde{J}_1^2 \left|\vec{i}_{\omega 1} \cdot \vec{i}_R\right|^2}{2r_o\, R^{2n}}. \tag{23}$$

К определению моментов

Моменты, действующие на сферическую частицу (сферический вихрь), определяются неравномерностью индуцированного поля скоростей, в котором находится исследуемая частица, и зависят только от интенсивности сферического вихря, индуцирующего неравномерное поле скоростей, расстояния от центра вихря до исследуемой частицы и ее углового положения. Для упрощения анализа действующих моментов рассмотрим сферическую частицу, условно состоящую из шести связанных между собой массовых центров, к которым приложены силы F_r, F_y, F_z (рис. 11). Точки условных массовых центров находятся на осях координат на расстоянии $r_o/2$ от центра исследуемой сферической частицы, и масса сферической частицы равномерно распределена между центрами.

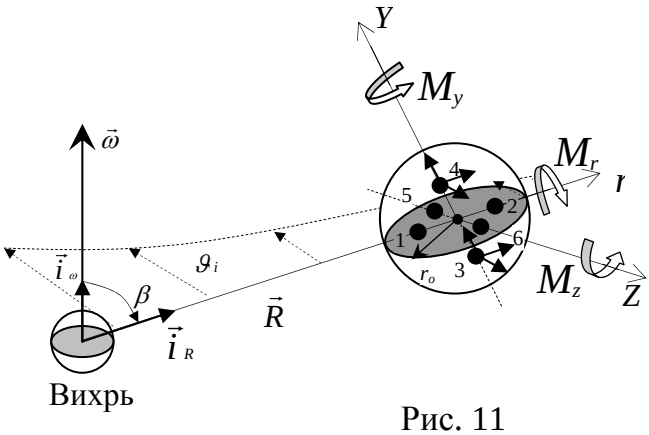


Рис. 11

Тогда моменты, действующие на сферическую частицу, равны (рис. 11):

$$M_r = \frac{1}{2}\left(F_{z_4} - F_{z_3}\right) r_o - \frac{1}{2}\left(F_{y_6} - F_{y_5}\right) r_o;$$

$$M_y = \frac{1}{2}\left(F_{r_6} - F_{r_5}\right) r_o - \frac{1}{2}\left(F_{z_2} - F_{z_1}\right) r_o;$$

$$M_z = \frac{1}{2}\left(F_{y_2} - F_{y_1}\right) r_o - \frac{1}{2}\left(F_{r_4} - F_{r_3}\right) r_o.$$

Полученные уравнения моментов можно переписать так:

$$M_r = \frac{1}{2}\left(\Delta F_{z_y} - \Delta F_{y_z}\right) r_o; \quad M_y = \frac{1}{2}\left(\Delta F_{r_z} - \Delta F_{z_r}\right) r_o; \quad M_z = \frac{1}{2}\left(\Delta F_{y_r} - \Delta F_{r_y}\right) r_o,$$

где, к примеру, ΔF_{z_y} – приращение силы F_z вдоль оси Y.

В дифференциальной форме уравнения примут следующий вид:

$$M_r = \frac{1}{2}\left(\frac{\partial F_z}{\partial y} - \frac{\partial F_y}{\partial z}\right) r_o^{\,2}; \; M_y = \frac{1}{2}\left(\frac{\partial F_r}{\partial z} - \frac{\partial F_z}{\partial r}\right) r_o^{\,2}; \; M_z = \frac{1}{2}\left(\frac{\partial F_y}{\partial r} - \frac{\partial F_r}{\partial y}\right) r_o^{\,2}. \quad (24)$$

Определим частные производные сил, действующих на сферическую частицу, по соответствующим координатам. Для определения частных производных силы F_r по координатам y и z запишем значения силы F_r в точках 3, 4, 5 и 6 рассматриваемой сферической частицы (рис. 12).

Исходя из выражения (12) и считая, что процесс взаимодействия является установившимся (первый член уравнения равен нулю), а также учитывая, что собственные индуцируемые скорости не оказывают влияния на значения моментов (третий член уравнения равен нулю), получим:

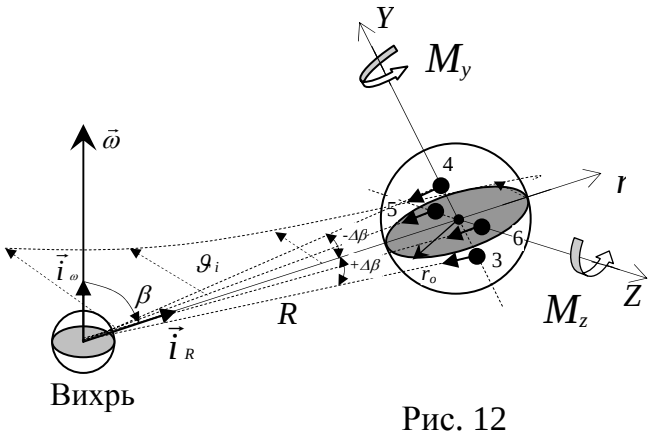


Рис. 12

$$F_{r3} = -m_3 \frac{2n\tilde{J}_1^{\,2} \sin^2(\beta + \Delta\beta)}{R_3^{\,2n+1}}; \qquad F_{r_4} = -m_4 \frac{2n\tilde{J}_1^{\,2} \sin^2(\beta - \Delta\beta)}{R_4^{\,2n+1}};$$

$$F_{r_5} = -m_5 \frac{2n\tilde{J}_1^{\,2} \sin^2 \beta}{R_5^{\,2n+1}}; \qquad F_{r_6} = -m_6 \frac{2n\tilde{J}_1^{\,2} \sin^2 \beta}{R_6^{\,2n+1}}.$$

Учитывая, что $R_3 = R_4 = R_5 = R_6 \approx R$ при условии, что $R >> r_o$, а также, что $m_3 = m_4 = m_5 = m_6 = m_o/6$, производные силы F_r равны:

$$\frac{\partial F_r}{\partial z} = \lim_{\Delta z \to 0}\left(\frac{\Delta F_r}{2\Delta z}\right) = \lim_{\Delta z \to 0}\left(\frac{F_{r_6} - F_{r_5}}{2\Delta z}\right) = \lim_{\Delta z \to 0}\left(\frac{m_o\, n\tilde{J}_1^{\,2} \sin^2 \beta}{6R_5^{\,2n+1}\Delta z} - \frac{m_o\, n\tilde{J}_1^{\,2} \sin^2 \beta}{6R_6^{\,2n+1}\Delta z}\right) = 0; \quad (25)$$

$$\frac{\partial F_r}{\partial y}=\lim_{\Delta y\to 0}\left(\frac{\Delta F_r}{2\Delta y}\right)=\lim_{\Delta y\to 0}\left(\frac{F_{r_4}-F_{r_3}}{2\Delta y}\right)=\lim_{\Delta y\to 0}\left(\frac{m_o\, n\tilde{J}_1^{\,2}\sin^2(\beta+\Delta\beta)}{6R^{2n+1}\Delta y}-\frac{m_o\, n\tilde{J}_1^{\,2}\sin^2(\beta-\Delta\beta)}{6R^{2n+1}\Delta y}\right), \quad (26)$$

где Δz и Δy – расстояние до рассматриваемых точек от центра сферической частицы по соответствующим координатам.

Подставив в выражение (26) вместо $\sin(\beta+\Delta\beta)=\sin\beta\cos\Delta\beta+\cos\beta\sin\Delta\beta$ $\sin(\beta-\Delta\beta)=\sin\beta\cos\Delta\beta-\cos\beta\sin\Delta\beta$ и выполнив преобразования с учетом того, что при $R >> r_o$ $\sin\Delta\beta\approx\Delta\beta$, $\cos\Delta\beta\approx 1$ и $\Delta\beta\approx\dfrac{\Delta y}{R}$, получим:

$$\frac{\partial F_r}{\partial y}=\lim_{\Delta y\to 0}\left(\frac{2m_o n\tilde{J}_1^{\,2}\sin\beta\cos\beta\,\Delta y}{3R^{2(n+1)}\Delta y}\right)=\frac{2m_o n\tilde{J}_1^{\,2}\sin\beta\cos\beta}{3R^{2(n+1)}}. \quad (27)$$

Для определения частных производных силы F_y по координатам r и z запишем значения силы F_y в точках 1, 2, 5 и 6 рассматриваемой сферической частицы (рис. 13).

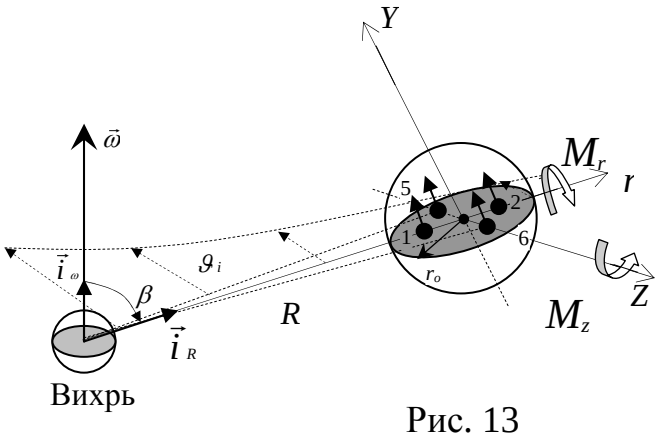


Рис. 13

Исходя из выражения (18) и считая, что процесс взаимодействия является установившимся (первый член уравнения равен нулю), а также учитывая, что собственные индуцируемые скорости не оказывают влияния на значения моментов (третий член уравнения равен нулю), получим:

$$F_{y_1}=-m_1\frac{2\tilde{J}_1^{\,2}\cos\beta\sin\beta}{\left(R-\dfrac{r_o}{2}\right)^{2n+1}};\ F_{y_2}=-m_2\frac{2\tilde{J}_1^{\,2}\cos\beta\sin\beta}{\left(R+\dfrac{r_o}{2}\right)^{2n+1}};$$

$$F_{y_5}=-m_5\frac{2\tilde{J}_1^{\,2}\cos\beta\sin\beta}{(R_5)^{2n+1}};\ F_{y_6}=-m_6\frac{2\tilde{J}_1^{\,2}\cos\beta\sin\beta}{(R_6)^{2n+1}}.$$

Учитывая, что $R_5 = R_6$, а также, что $m_1 = m_2 = m_5 = m_6 = m_o/6$, $r_o/2 = \Delta r$, производные силы F_y равны:

$$\frac{\partial F_y}{\partial z}=\lim_{\Delta z\to 0}\left(\frac{\Delta F_y}{2\Delta z}\right)=\lim_{\Delta z\to 0}\left(\frac{F_{y_6}-F_{y_5}}{2\Delta z}\right)=\lim_{\Delta z\to 0}\left(\frac{m_o\,\tilde{J}_1^{\,2}\sin\beta\cos\beta}{6R_5^{\,n+1}\Delta z}-\frac{m_o\,\tilde{J}_1^{\,2}\sin\beta\cos\beta}{6R_6^{\,n+1}\Delta z}\right)=0. \quad (28)$$

$$\frac{\partial F_y}{\partial r} = \lim_{\Delta r \to 0}\left(\frac{\Delta F_y}{2\Delta r}\right) = \lim_{\Delta r \to 0}\left(\frac{F_{y_2} - F_{y_1}}{2\Delta r}\right) = \lim_{\Delta y \to 0}\left(\frac{m_o\ \tilde{J}_1^{\,2}\sin\beta\cos\beta}{6\left(R - \frac{r_o}{2}\right)^{2n+1}\Delta r} - \frac{m_o\ \tilde{J}_1^{\,2}\sin\beta\cos\beta}{6\left(R + \frac{r_o}{2}\right)^{2n+1}\Delta r}\right) =$$

$$= \frac{m_o\tilde{J}_1^{\,2}\sin\beta\cos\beta}{6R^{2n+1}}\lim_{\Delta r \to 0}\left[\frac{1}{\left(1 - \frac{r_o}{2R}\right)^{2n+1}\Delta r} - \frac{1}{\left(1 + \frac{r_o}{2R}\right)^{2n+1}\Delta r}\right] =$$

$$= \frac{m_o\tilde{J}_1^{\,2}\sin\beta\cos\beta}{6R^{n+1}}\lim_{\Delta r \to 0}\left[\frac{1}{\left(1 - \frac{\Delta r}{R}\right)^{2n+1}\Delta r} - \frac{1}{\left(1 + \frac{\Delta r}{R}\right)^{2n+1}\Delta r}\right].$$

Разложив $\left(1-\frac{\Delta r}{R}\right)^{2n+1}$ и $\left(1+\frac{\Delta r}{R}\right)^{2n+1}$ по биному Ньютона

$$\left(1+\frac{\Delta r}{R}\right)^{2n+1} = 1+(2n+1)\frac{\Delta r}{R}+\frac{(2n+1)2n}{1\cdot 2}\left(\frac{\Delta r}{R}\right)^2+\ldots;$$

$\left(1-\frac{\Delta r}{R}\right)^{2n+1} = 1-(2n+1)\frac{\Delta r}{R}-\frac{(2n+1)2n}{1\cdot 2}\left(\frac{\Delta r}{R}\right)^2-\ldots$, ограничившись первыми двумя членами и выполнив преобразования, получим:

$$\frac{\partial F_y}{\partial r} = \frac{m_o\tilde{J}_1^{\,2}\sin\beta\cos\beta}{6R^{2n+1}}\lim_{\Delta r \to 0}\left\{\frac{2(2n+1)R\ \Delta r}{\left[R^2-(2n+1)^2\Delta r^2\right]\Delta r}\right\} = \frac{m_o\tilde{J}_1^{\,2}(2n+1)\sin\beta\cos\beta}{3R^{2(n+1)}}. \quad (29)$$

Для определения частных производных силы F_z по координатам r и y запишем значения силы F_z в точках 1, 2, 3 и 4 рассматриваемой сферической частицы (рис. 14). Исходя из выражения (23) и считая, что процесс взаимодействия является установившимся (первый член уравнения равен нулю), получим:

$$F_{z_1} = -m_1\frac{C_z\tilde{J}_1^{\,2}\sin^2\beta}{2r_o\left(R-\frac{r_o}{2}\right)^{2n}}; \quad F_{z_2} = -m_2\frac{C_z\tilde{J}_1^{\,2}\sin^2\beta}{2r_o\left(R+\frac{r_o}{2}\right)^{2n}};$$

$$F_{z_3} = -m_3\frac{C_z\tilde{J}_1^{\,2}\sin^2(\beta+\Delta\beta)}{2r_oR_3^{\,2n}}; \quad F_{z_4} = -m_4\frac{C_z\tilde{J}_1^{\,2}\sin^2(\beta-\Delta\beta)}{2r_oR_4^{\,2n}}.$$

Учитывая, что $R_3 = R_4$, а также, что $m_1 = m_2 = m_3 = m_4 = m_o/6$, $r_o/2 = \Delta r$, производные силы F_z равны:

$$\frac{\partial F_z}{\partial y} = \lim_{\Delta y \to 0}\left(\frac{\Delta F_z}{2\Delta y}\right) = \lim_{\Delta y \to 0}\left(\frac{F_{z_4} - F_{z_3}}{2\Delta y}\right) = \frac{C_z m_o \tilde{J}_1^{\,2}}{12\, r_o R^{2n}} \lim_{\Delta y \to 0}\left(\frac{\sin^2(\beta + \Delta\beta) - \sin^2(\beta - \Delta\beta)}{2\Delta y}\right)$$

где Δy – расстояние до рассматриваемых точек от центра сферической частицы. Подставив в данное выражение вместо $\sin(\beta + \Delta\beta) = \sin\beta\cos\Delta\beta + \cos\beta\sin\Delta\beta$ $\sin(\beta - \Delta\beta) = \sin\beta\cos\Delta\beta - \cos\beta\sin\Delta\beta$ и выполнив преобразования с учетом того, что при $R >> r_o$ $\sin\Delta\beta \approx \Delta\beta$, $\cos\Delta\beta \approx 1$ и $\Delta\beta \approx \dfrac{\Delta y}{R}$, получим:

$$\frac{\partial F_z}{\partial y} = \frac{C_z m_o \tilde{J}_1^{\,2}}{12 r_o R^{2n}} \lim_{\Delta y \to 0}\left(\frac{4\sin\beta\cos\beta\ \Delta y}{\Delta y\ R}\right) = \frac{C_z m_o \tilde{J}_1^{\,2} \sin\beta\cos\beta}{6 r_o R^{2n+1}}. \qquad (30)$$

$$\frac{\partial F_z}{\partial r} = \lim_{\Delta r \to 0}\left(\frac{\Delta F_z}{2\Delta r}\right) = \lim_{\Delta r \to 0}\left(\frac{F_{z_2} - F_{z_1}}{2\Delta r}\right) = \frac{C_z m_o \tilde{J}_1^{\,2} \sin^2\beta}{12 r_o} \lim_{\Delta r \to 0}\left(\frac{1}{\left(R - \frac{r_o}{2}\right)^{2n} 2\Delta r} - \frac{1}{\left(R + \frac{r_o}{R}\right)^{2n} 2\Delta r}\right) =$$

$$= \frac{C_z m_o \tilde{J}_1^{\,2} \sin^2\beta}{24 r_o\ R^{2n}} \lim_{\Delta r \to 0}\left(\frac{1}{\left(1 - \frac{\Delta r}{R}\right)^{2n} \Delta r} - \frac{1}{\left(1 + \frac{\Delta r}{R}\right)^{2n} \Delta r}\right)$$

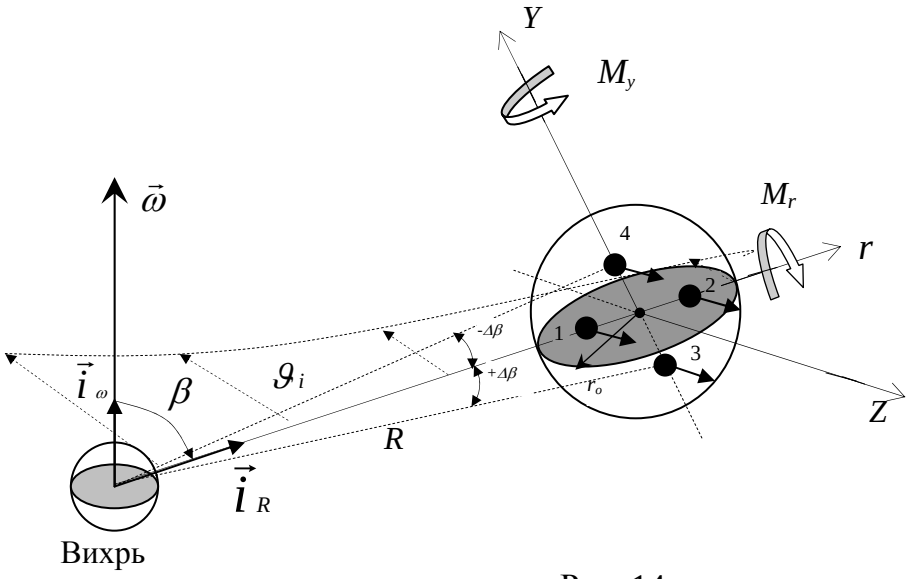


Рис. 14

Разложив $\left(1-\frac{\Delta r}{R}\right)^{2n}$ и $\left(1+\frac{\Delta r}{R}\right)^{2n}$ по биному Ньютона

$$\left(1+\frac{\Delta r}{R}\right)^{2n}=1+2n\frac{\Delta r}{R}+\frac{2n(2n-1)}{1\cdot 2}\left(\frac{\Delta r}{R}\right)^{2}+\ldots;$$

$$\left(1-\frac{\Delta r}{R}\right)^{2n}=1-2n\frac{\Delta r}{R}-\frac{2n(2n-1)}{1\cdot 2}\left(\frac{\Delta r}{R}\right)^{2}-\ldots,$$ ограничившись первыми двумя членами и выполнив преобразования, получим:

$$\frac{\partial F_z}{\partial r}=\frac{C_z m_o \tilde{J}_1^{\,2}\sin^2\beta}{24 r_o\, R^{2n}}\lim_{\Delta r\to 0}\left[\frac{4R\,\Delta r}{\left(R^2-4n\,\Delta r^2\right)\Delta r}\right]=\frac{C_z m_o \tilde{J}_1^{\,2}\sin^2\beta}{6 r_o R^{2n+1}}. \qquad (31)$$

Подставив полученные значения частных производных сил по координатам (25), (27), (28), (29), (30) и (31) в выражения для определения моментов, действующих на сферическую частицу (24), выполнив преобразования, окончательно получим:

$$\left.\begin{aligned}
M_r &= \frac{C_z m_o \tilde{J}_1^{\,2} r_o \cos\beta\sin\beta}{12R^{2n+1}}=\frac{C_z m_o \tilde{J}_1^{\,2} r_o\left(\vec{i}_{\omega_1}\cdot\vec{i}_R\right)\left|\vec{i}_{\omega_1}\cdot\vec{i}_R\right|}{12R^{2n+1}};\\
M_y &= -\frac{C_z m_o \tilde{J}_1^{\,2} r_o \sin^2\beta}{12R^{2n+1}}=-\frac{C_z m_o \tilde{J}_1^{\,2} r_o\left|\vec{i}_{\omega_1}\cdot\vec{i}_R\right|^2}{12R^{2n+1}};\\
M_z &= \frac{m_o \tilde{J}_1^{\,2} r_o^{\,2}\cos\beta\sin\beta}{6R^{2(n+1)}}=\frac{m_o \tilde{J}_1^{\,2} r_o^{\,2}\left(\vec{i}_{\omega_1}\cdot\vec{i}_R\right)\left|\vec{i}_{\omega_1}\cdot\vec{i}_R\right|}{6R^{2(n+1)}}
\end{aligned}\right\} \qquad (32)$$

Если сферическая частица или (и) сферический вихрь относительно друг друга перемещаются и находятся на расстоянии, при котором необходимо учитывать скорость распространения возмущений, то при определении сил и моментов необходимо вместо R подставлять эффективный радиус взаимодействия $\vec{R}_{эф}=\vec{R}+\vec{W}\frac{\Delta R}{c}$, где $\vec{W}$ – вектор скорости движения сферического вихря относительно сферического тела; c – скорость распространения возмущений в жидкости; ΔR – изменение R за рассматриваемый промежуток времени.

Выражения для определения сил и моментов (32), действующих на сферические вихри и частицы при их взаимодействии, получены в связной системе координат. При решении некоторых задач, касающихся перемещения сферических частиц в абсолютном пространстве, необходимо знать значения сил и моментов относительно абсолютной системы координат.

$$
\left.
\begin{aligned}
F_r &= m_0\left(\frac{\partial V_r}{\partial t}\right)_0 - \frac{2n\, m_o\, \tilde{J}_1^2 \left|\vec{i}_{\omega_1}\cdot\vec{i}_R\right|^2}{R^{2n+1}} + \frac{3m_o\, \tilde{J}_1\, \tilde{J}_2\, (\vec{i}_{\omega_2}\cdot\vec{i}_y)\left|\vec{i}_{\omega_1}\cdot\vec{i}_R\right|}{2\pi R^n r_o^{n+1}};\\
F_y &= m_o\left(\frac{\partial V_y}{\partial t}\right)_0 - \frac{2m_o \tilde{J}_1^2\left(\vec{i}_{\omega_1}\cdot\vec{i}_R\right)\left|\vec{i}_{\omega_1}\cdot\vec{i}_R\right|}{R^{2n+1}} - \frac{3m_o \tilde{J}_1 \tilde{J}_2\ (\vec{i}_{\omega_2}\cdot\vec{i}_R)\left|\vec{i}_{\omega_1}\cdot\vec{i}_R\right|}{2\pi\ R^n\ r_o^{n+1}};\\
F_z &= m_o\left(\frac{\partial V_z}{\partial t}\right)_0 - \frac{C_z m_o \tilde{J}_1^2\left|\vec{i}_{\omega_1}\cdot\vec{i}_R\right|^2}{2r_o R^{2n}}\\
M_r &= \frac{C_z m_o \tilde{J}_1^{\,2} r_o\left(\vec{i}_{\omega_1}\cdot\vec{i}_R\right)\left|\vec{i}_{\omega_1}\cdot\vec{i}_R\right|}{12R^{2n+1}};\\
M_y &= -\frac{C_z m_o \tilde{J}_1^{\,2} r_o\ \left|\vec{i}_{\omega_1}\cdot\vec{i}_R\right|^2}{12R^{2n+1}};\\
M_z &= \frac{m_o \tilde{J}_1^{\,2} r_o^{\,2}\left(\vec{i}_{\omega_1}\cdot\vec{i}_R\right)\left|\vec{i}_{\omega_1}\cdot\vec{i}_R\right|}{6R^{2(n+1)}}.
\end{aligned}
\right\}
\qquad (33)
$$

Для перехода от связанной системы координат, ось r которой направлена по $\vec{R}$ и проходит через центры сферических вихрей, ось Y находится в одной плоскости с $\vec{\omega}$ одного из сферических вихрей, ось Z образует правую тройку (рис. 7), достаточно знать углы θ, φ (рис. 15) в абсолютной системе координат. Тогда значения сил и моментов в абсолютной системе координат X_a, Y_a, Z_a будут равны:

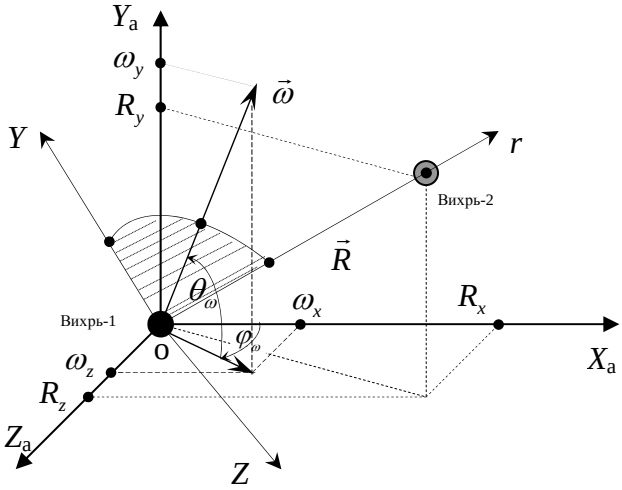


Рис. 15

$$
\left.
\begin{aligned}
F_{x_a} &= F_r\cos\theta_r\cos\varphi_r + F_y\cos\theta_y\cos\varphi_y + F_z\cos\theta_z\cos\varphi_z;\\
F_{y_a} &= F_r\sin\theta_r + F_y\sin\theta_y + F_z\sin\theta_z;\\
F_{z_a} &= F_r\cos\theta_r\sin\varphi_r + F_y\cos\theta_y\sin\varphi_y + F_z\cos\theta_z\sin\varphi_z;\\
M_{x_a} &= M_r\cos\theta_r\cos\varphi_r + M_y\cos\theta_y\cos\varphi_y + M_z\cos\theta_z\cos\varphi_z;\\
M_{y_a} &= M_r\sin\theta_r + M_y\sin\theta_y + M_z\sin\theta_z;\\
M_{z_a} &= M_r\cos\theta_r\sin\varphi_r + M_y\cos\theta_y\sin\varphi_y + M_z\cos\theta_z\sin\varphi_z,
\end{aligned}
\right\}
\qquad (34)
$$

где углы θ – углы между соответствующими осями связанной системы координат (or, oY, oZ) и плоскостью X_a o Z_a абсолютной системы координат, а углы φ – углы между проекциями соответствующих осей связанной системы координат (or, oY, oZ) на плоскость X_a o Z_a абсолютной системы координат

и осью оX_a абсолютной системы координат (рис. 15). Для определения данных углов можно использовать следующие выражения:

$$\theta_r = \mathrm{arct}\left(\frac{R_y}{\sqrt{R_x{}^2 + R_z{}^2}}\right);$$

$$\varphi_r = \mathrm{arct}\left(\frac{R_z}{R_x}\right).$$

Для определения θ_z и φ_z запишем:

$$\vec{Z} = \vec{R} \times \vec{\omega} = \begin{vmatrix} x_a & y_a & z_a \\ R_x & R_y & R_z \\ \omega_x & \omega_y & \omega_z \end{vmatrix}.$$

Используя данную матрицу, можно определить проекции вектора $\vec{Z}$ связанной системы координат (ось оZ) на абсолютную систему координат:

$$Z_x = R_y\omega_z - R_z\omega_y; \quad Z_y = R_z\omega_x - R_x\omega_z; \quad Z_z = R_x\omega_y - R_y\omega_x.$$

Тогда углы равны:

$$\theta_z = \mathrm{arct}\left(\frac{Z_y}{\sqrt{Z_x{}^2 + Z_z{}^2}}\right) = \mathrm{arct}\left(\frac{R_z\omega_x - R_x\omega_z}{\sqrt{\left(R_y\omega_z - R_z\omega_y\right)^2 + \left(R_x\omega_y - R_y\omega_x\right)^2}}\right);$$

$$\varphi_z = \mathrm{arct}\left(\frac{Z_z}{Z_x}\right) = \mathrm{arct}\left(\frac{R_x\omega_y - R_y\omega_x}{R_y\omega_z - R_z\omega_y}\right).$$

Для определения θ_y и φ_y запишем:

$$\vec{Y} = \vec{Z} \times \vec{R} = \begin{vmatrix} x_a & y_a & z_a \\ Z_x & Z_y & Z_z \\ R_x & R_y & R_z \end{vmatrix}.$$

Используя данную матрицу, можно определить проекции вектора $\vec{Y}$ связанной системы координат (ось оY) на абсолютную систему координат:

$$Y_x = R_zZ_y - R_yZ_z; \quad Y_y = R_xZ_z - R_zZ_x; \quad Y_z = R_yZ_x - R_xZ_y.$$

Тогда углы равны:

$$\theta_y = \mathrm{arct}\left(\frac{Y_y}{\sqrt{Y_x^{\,2} + Y_z^{\,2}}}\right) =$$

$$= \mathrm{arct}\left\{\frac{R_x\left(R_x\omega_y - R_y\omega_x\right) - R_z\left(R_y\omega_z - R_z\omega_y\right)}{\sqrt{\left[R_z\left(R_z\omega_x - R_x\omega_z\right) - R_y\left(R_x\omega_y - R_y\omega_x\right)\right]^2 + \left[R_y\left(R_y\omega_z - R_z\omega_y\right) - R_x\left(R_z\omega_x - R_x\omega_z\right)\right]^2}}\right\};$$

$$\varphi_y = \mathrm{arct}\left(\frac{Y_z}{Y_x}\right) = \mathrm{arct}\left[\frac{R_y\left(R_y\omega_z - R_z\omega_y\right) - R_x\left(R_z\omega_x - R_x\omega_z\right)}{R_z\left(R_z\omega_x - R_x\omega_z\right) - R_y\left(R_x\omega_y - R_y\omega_x\right)}\right].$$

В данных выражениях R_x, R_y, R_z – проекции вектора $\vec{R}$ (R – расстояние между взаимодействующими сферическими вихрями) на оси абсолютной системы координат, а $\omega_x = \omega\cos\theta_\omega\cos\varphi_\omega$, $\omega_y = \omega\sin\theta_\omega$, $\omega_z = \omega\cos\theta_\omega\sin\varphi_\omega$ – проекции вектора угловой скорости одного из вихрей, к которому привязана связанная система координат на оси абсолютной системы координат.

Полученные уравнения в рамках идеальной потенциальной жидкости позволяют эффективно анализировать, а также исследовать процессы взаимодействия сферических объектов с использованием ЭВМ.

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

Мельников А.П. Основы теоретической аэродинамики. – ЛКВВИА, 1.

СЕКЦИЯ № 5
ИНФОРМАЦИОННЫЕ ТЕХНОЛОГИИ В ЭНЕРГЕТИКЕ И ОБРАЗОВАНИИ

Руководители секции: ***Ладыгин Игорь Иванович***
д-р техн. наук, профессор
Грошев Александр Иванович
канд. техн. наук, доцент

ИНФОРМАЦИОННЫЕ ПОТОКИ В БАЗЕ ЗНАНИЙ АВТОМАТИЗИРОВАННОГО РАБОЧЕГО МЕСТА МЕТРОЛОГА

Е.Н. Гудкова, ***Е.Н. Кириенко*** – аспиранты
Волгоградского государственного технического университета
П.В. Осипов – студент ВПИ (филиала) ВолгГТУ

Факт того, что применение автоматизированных систем управления (АСУ) на предприятиях различных отраслей дает огромное преимущество, сегодня не требует доказательств. Создание АСУ позволяет переложить на программное обеспечение часть ответственных операций, требующих точности исполнения, тем самым повысить качество работы, продлить срок службы производственного оборудования, увеличить объем и гибкость производства, улучшить условия труда, снизить влияние человеческого фактора.

Целью работы является создание программного обеспечения экспертной системы диагностики АСУ. Каждое предприятие эксплуатирует большое количество контрольно-измерительных приборов, устройств и систем, находящихся в различных подразделениях. Поэтому создаваемое программное обеспечение должно представлять информацию в удобной для оператора форме и выполнять следующие функции: учитывать наличие, движение и состояние приборов; контролировать графики поверки и калибровки средств измерений; генерировать отчеты и графики поверки средств измерений; анализировать состояние и применение оборудования.

Для достижения поставленной цели необходимо решить следующие задачи: разработать структуру базы данных о метрологических характеристиках средств измерений; разработать удобный интерфейс для работы с базой данных (добавление, редактирование данных о средствах измерения); разработать программное обеспечение для контроля и анализа состояния приборов. Для эффективной работы системы база данных должна обеспечивать полную информацию о характеристиках приборов в соответствии с назначением и областью использования. Информацию в системе необходимо представить в виде наборов данных для групп типов средств измерений. Каждая группа включает в себя технические условия, каталоги и другую документацию на каждый тип и модификацию приборов. Эта информация содержит: вид измерений; наименование группы; обозначение типа прибора; класс точности; пределы измерения с указанием единиц измерения; пределы основной

допускаемой погрешности. Целесообразно также указывать пределы погрешности и для лабораторных условий.

Основная суть метода решения поставленных задач заключается в том, что группы комплектуются по участкам, цехам или другим объектам, где эксплуатируются средства измерения.

Следовательно, программное обеспечение экспертной системы диагностики АСУ является сетевым и рассчитано на несколько рабочих мест с разграничением доступа по группам. Каждый отдел работает в программе со своим набором средств измерений, то есть со своей группой. С другой стороны, метрологическая служба предприятия должна иметь возможность контролировать и анализировать работу каждого участка, получать информацию о поверке и калибровке в соответствии с нормативными документами. Разрабатываемое программное обеспечение должно генерировать основные и вспомогательные выходные формы.

В программное обеспечение экспертной системы диагностики планируется заложить основные алгоритмы расчета работоспособности приборов на основе библиотек метрологических характеристик и лабораторных показателей. Это позволит повысить качество работы средств измерений. За счет контроля корректности вводимой информации повышается эффективность работы участков и сокращается время разработки графиков поверки и калибровки.

В состав базы знаний, являющейся частью экспертной системы, входит база экспериментальных данных, которая содержит информацию об основных показателях приборов. Данная информация может вводиться как в ручном режиме (посредством СУБД), так и в автоматическом (при помощи измерительных приборов). Эти данные представляют большую ценность, так как на их основе могут быть получены эмпирические модели, связывающие показатели условий эксплуатации приборного парка и его технические характеристики. На протяжении всего срока существования прибора на предприятии автоматически ведется его паспорт, фиксируются все его перемещения по предприятию, поверки, аттестации, калибровки.

Основную часть базы данных составляют 11 таблиц (см. рис. 1):

1) список модификаций средств измерений на основании внутреннего кодификатора предприятия;
2) список модификаций средств измерений на основании кодификатора МИ2314-00;
3) таблица соответствия кодов внутреннего кодификатора предприятия и кодификатора МИ2314-00;
4) таблица партий средств измерений;
5) список предприятий-изготовителей;
6) таблица описаний устройств в партиях;
7) таблица описаний конкретных средств измерений в партиях;
8) таблица о передвижения средств измерений по позициям на предприятии;
9) список позиций на предприятии;
10) список проведенных поверок средств измерений;
11) список лиц ответственных за поверки.

Помимо этого перечня существуют дополнительные таблицы, предназначенные для работы с кодификаторами.

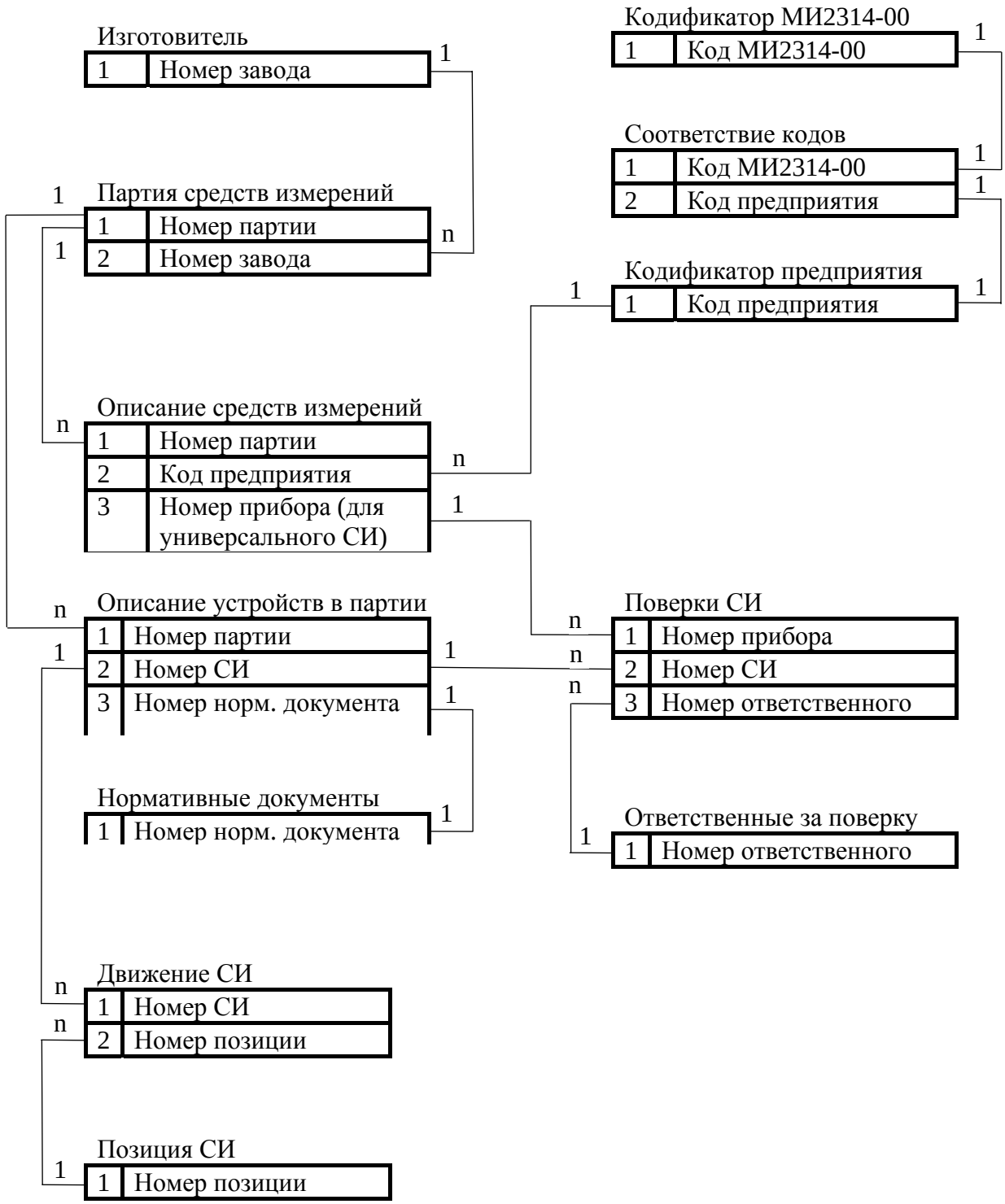


Рис. 1. Схема связи таблиц базы данных автоматизированного рабочего места метролога

Работа с базой данных происходит следующим образом: при поступлении новой партии приборов вносятся данные об этой партии (предприятие-изготовитель, марка приборов, дата прихода партии и т.п.). Затем вносятся записи в таблицу описаний устройств (например, мультиметры), пришедших в данной партии, и в таблицу описания конкретных средств измерения (например, вольтметры, амперметры, входящие в состав мультиметров). При описании средств измерений вводится код на основании одного из кодификаторов, информация о единицах измерения, верхнем и нижнем пределах измерений, характеристики точности, требуемая периодичность поверок. Далее, при перемещении приборов с одной позиции предприятия на другую, в соответствующую таблицу вносятся данные о дате перемещения, номере позиции, о состоянии прибора (работает, не работает, находится в резерве). При проведении поверки вводится информация о дате поверки, организации, проводящей поверку, о лице, ответственном за поверку, верхний и нижний пределы погрешности по итогам поверки, заключение об итогах поверки, ссылка на протокол поверки, стоимость поверки. Таблицы с перечнем предприятий-изготовителей, позиций средств измерений, ответственных за поверку, таблица соответствия кодов и сами кодификаторы заполняются перед вводом системы в эксплуатацию, либо по мере необходимости.

Данная система позволит повысить эффективность использования метрологического оборудования, принадлежащего предприятию, а также повысит эффективность работы метрологической службы в целом.

ПРОГРАММНОЕ ОБЕСПЕЧЕНИЕ ДЛЯ СТРУКТУРНОГО ПРОЕКТИРОВАНИЯ СЛОЖНЫХ ИНФОРМАЦИОННО-ИЗМЕРИТЕЛЬНЫХ СИСТЕМ

В.А. Секачёв – аспирант
Волгоградского государственного технического университета

Информационно-измерительные системы (ИИС) широко используются для контроля энергетических объектов, начиная от первичного производства энергии (турбины-генераторы) и до конечных распределительных подстанций. Автоматизированный контроль выполняется при помощи вычислительных систем, содержащих в себе универсальную или специализированную ЭВМ, систему датчиков, усилители, фильтры, АЦП – ЦАП для преобразования измеряемых величин. ИИС имеют распределённый характер. Эффективность контроля зависит от надёжности датчиков, точностных параметров элементной базы, а также от взаимосвязи этих компонент друг с другом. Взаимосвязь определяется структурой ИИС, оптимальность которой выражается минимальным, но необходимым наличием компонент и связей между ними.

Для того чтобы представить эту взаимосвязь, используется направленный граф [3]. Для достижения указанного условия оптимальности используется

аппарат переменных экстремальных структур, описанный в [2], ключевым алгоритмом которого является получение множества наименьшей внешней устойчивости (МНВУ), списка наименований компонент, которые войдут в будущую структуру ИИС. Согласно [2] для одного и того же графа существует несколько вариантов МНВУ, при этом, чем больше количество компонент и связей между ними, тем больше будет вариантов МНВУ. При построении оптимизированной структуры используется исходная, построение идёт по следующему алгоритму.

Берётся исходный граф. Над множеством вершин исходного графа X и МНВУ T производится операция разности X\T = T0, где T0 не принадлежит T.

Восстановим на основании исходного графа и МНВУ T оптимизированную структуру, используя блочно-функциональное распределение. Это выполняется по следующему алгоритму.

Если у вершины, не вошедшей в МНВУ, один выход и один вход, или число выходов равно числу входов, то она заменяется связями между вершинами, принадлежащими МНВУ.

Если у вершины входов меньше выходов, или наоборот, то выходы от остающихся вершин идут к входным вершинам, причем количество связей равно максимальному числу входов/выходов. При этом выбираются вершины с наименьшим количеством связей. Блочные функции тоже претерпевают процесс преобразования. Функция вершины, не вошедшей в МНВУ, подвергается, если представляется возможным, разрезанию. Если разрезание на n частей осуществить невозможно, а разрезание необходимо, в недостающих частях пишется *1. Разрезанные части функции или сама функция распределяются к остающимся вершинам, причём выбираются вершины с наименьшей сложностью функций. И удаление вершин, и разрезание функций происходит одновременно в одном и том же цикле. Процесс происходит циклически до тех пор, пока из исходного графа не будут удалены все вершины, не вошедшие в МНВУ. Далее происходит распределение разрезанных частей функции по смежным вершинам и формирование матрицы функций, при объединении строк которой получается новое функциональное распределение.

Первоначальное представление структуры задаётся вручную.

При ручной реализации этого алгоритма проектирования ИС, которая будет содержать несколько десятков компонент и полторы сотни связей между ними, выбор оптимального варианта будет затруднён из-за необходимости сохранять функциональное распределение и множества подходящих вариантов реализации. Именно наличие математической модели, графа, легко формализуемого при помощи матрицы инцидентности [3], позволяет программно реализовать указанный алгоритм.

На основании реализации построена программная система ФОС (функциональный оптимизатор структур), которая содержит в себе:

1) программный модуль для создания и редактирования структур ИС в виде направленных графов;

2) программный модуль, реализующий в себе аппарат переменных экстремальных структур;

3) программный модуль для сохранения и загрузки файлов, представляющих данную структуру;

4) программный модуль, реализующий интерфейс с пользователем.

Внешний вид окна редактора структур систем ФОС показан на рис. 1.

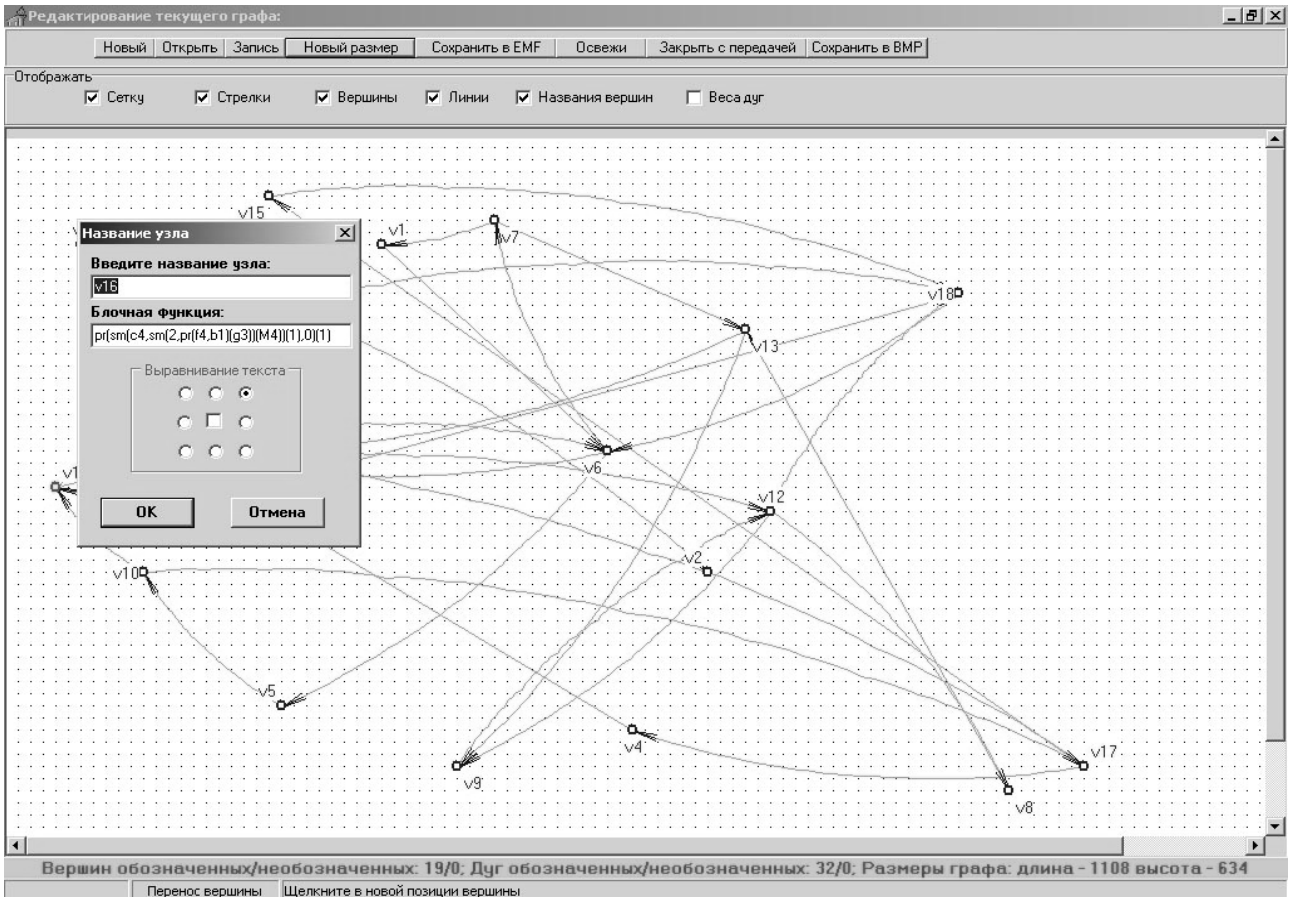


Рис. 1. Внешний вид диалогового окна редактора структур систем ФОС

В диалоговом окне «Название узла» можно задать имя, функцию и положение текста названия.

ФОС реализован в среде Delphi 5 Enterprise Edition. Использование ФОС позволяет в 3-4 раза сократить время на структурное проектирование и получить в конечном итоге структуру с оптимальным блочно-функциональным распределением.

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. *Касьянов В.Н.*, *Евстигнеев В.А.* Графы в программировании: обработка, визуализация и применение. – СПб.: БХВ – Петербург, 2003. – 1104 с.

2. *Муха Ю.П.*, *Авдеюк О.А.*, *Королёва И.Ю.* Алгебраическая теория синтеза сложных систем: Монография / ВолгГТУ. – 2003. – 320 с.

3. *Новиков Ф.А.* Дискретная математика для программистов. – СПб.: Питер, 2001. – 304 с.

МОДЕЛЬ ТЕЗАУРУСНОГО ПРЕДСТАВЛЕНИЯ ЗНАНИЙ ДЛЯ ЭКСПЕРТНО-ПОЗНАВАТЕЛЬНЫХ СИСТЕМ

А.А. Рыбанов – канд. техн. наук, доцент
ВПИ (филиала) ВолгГТУ
А.А. Макаров – магистрант
Волгоградского государственного технического университета

Анализ современного состояния в области проектирования экспертно-познавательных систем позволяет выделить следующие группы проблем:

1) разработка модели структуры учебного материала: база знаний учебно-методических материалов;

2) разработка модели процесса обучения: индивидуальная траектория обучения;

3) разработка модели процесса контроля знаний: база тестовых заданий и оценка качества усвоения учебного курса;

4) разработка модели обучаемого: начальные знания и психофизические особенности обучаемого.

Все эти проблемы находятся в тесной взаимосвязи и для эффективного решения требуют единого подхода к проектированию экспертно-познавательной системы.

Решение проблемы предлагается на основе составления тезауруса. Тезаурус явным образом отражает структуру учебного курса и методы передачи знаний обучающимся. Проектирование содержания обучения на основе тезауруса позволяет четко выделить структурно-логические основания учебной дисциплины, круг базовых понятий, что позволяет повысить эффективность обучения. Модель тезаурусного представления знаний для экспертно-познавательных систем (*ТПЗ*) представляет собой объединение множества всех объектов тезауруса *O* и матрицы инцидентности *I*:

$$ТПЗ = \{O, I\}.$$

Каждый объект *O* тезауруса представляет собой:

$$O = (N, CO, S, Des, Def, NC),$$

где *N* – название объекта; *CO* – класс объекта; *S* – множество синонимов объекта; *Des* – обозначение объекта; *Def* – определение объекта; *NC* – количественная характеристика объекта.

Матрица инцидентности тезауруса задает отношение объект-объект и представляет собой квадратную матрицу $n \times n$:

$$I = \begin{pmatrix} i_{11} & \dots & i_{1n} \\ \dots & \dots & \dots \\ i_{n1} & \dots & i_{nn} \end{pmatrix},$$

$$i_{jk} = \begin{cases} 1, \text{ если } O_j \text{ определяющий объект для } O_k \\ 0, \text{ если } O_j, O_k \text{ не связаны} \end{cases},$$

где n – количество объектов в тезаурусе; O_k, O_j – объекты тезауруса.

В модель тезаурусного представления вводятся следующие ограничения на структуру тезауруса: в тезаурусе нет одинаковых объектов; объект не может иметь связи с самим собой.

Каждый объект тезауруса характеризуется семантической сложностью и семантической продуктивностью.

Семантическая сложность *Sc* – насыщенность интенсионала его значения. Определяется количеством семантических компонентов слова, то есть количеством лексических единиц, значения которых входят в значение данного слова в качестве его непосредственных или опосредованных семантических составляющих.

Семантическая продуктивность *Se* – роль слова в формировании соответствующей логико-семантической системы (терминологии). Определяется количеством семантических дериватов (лексических единиц), значения которых содержит значение данного слова в качестве непосредственной или опосредованной семантической составляющей.

Семантическая сложность *Sc* и семантическая продуктивность *Se* объекта тезауруса определяется как:

$$Se_j = M(j, I), \qquad Sc_j = M(j, I^T),$$

$$M(j, I) = \left\{ |A| \, O_k \in A, \text{ если } i_{jk} = 1 \text{ или } i_{nk} = 1, \text{ где } O_n \in A \right\}.$$

Семантические координаты $Scor_i = (Sc_i, Se_i)$ однозначно определяют положение объекта тезауруса при отображении семантической сети на плоскость.

Мера близости объектов тезауруса определяется по формуле:

$$d_{ij} = \sqrt{\sum_{k=1}^{2} \left(Scor_{ik} - Scor_{jk} \right)^2},$$

где $Scor_{ik}$ – k-я семантическая координата i-го объекта тезауруса; $Scor_{jk}$ – k-я семантическая координата j-го объекта тезауруса.

Семантический потенциал *Sp* – определяет положение объекта тезауруса относительно объекта с нулевыми семантическими координатами. Определяется как мера близости объекта тезауруса к точке (0, 0).

Семантический потенциал i-го объекта тезауруса определяется по формуле:

$$Sp_i = \sqrt{Se_i^2 + Sc_i^2}.$$

Семантический потенциал *Sp* является числовой характеристикой для объектов тезауруса и определяет важность объекта.

Для определения коэффициентов объема учебного материала, количества тестов по материалу в базе тестов и в базе учебных понятий предлагается ввести в модель в виде числовой характеристики связи двух объектов тезауруса меру близости между этими объектами, в виде числовой характеристики важности объекта использовать семантический потенциал.

Множество всех объектов терминополя определяют тезаурус учебного курса. Тезаурус учебного курса можно представить совокупностью локальных тезаурусов, где *i*-й тезаурус *n*-го уровня – это множество объектов терминополя:

$$T_i^n = \left\{ O_m \middle| O_m \in T_k^{n-1},\ T_i^n \cap T_j^n = 0,\ i \neq j \right\}.$$

Количество тезаурусов *n*-ого уровня равно числу Парето-эффективных объектов тезауруса *n* – 1-го уровня.

Парето-эффективные объекты тезауруса – объекты тезауруса с наибольшим семантическим потенциалом. То есть объекты, определяющие «северо-восточную» границу графа, изображенного в семантических координатах.

Тогда *i*-ый объект тезауруса является *k*-м Парето-эффективным объектом *m*-го тезауруса *n*-го уровня, при выполнении условия:

$$\bar{\exists}\, O_j \middle| Se_j > Se_i,\, Sc_i > Sc_l,\, Sc_j > Sc_l,$$

$$Sc_l = \begin{cases} Sc_{k-1}, \text{ если } k \geq 2, \\ 0, \text{ если } k = 1, \end{cases}$$

где O_i, O_j – объекты *m*-го тезауруса *n*-го уровня; $Sc_{k\text{-}1}$ – семантическая сложность *k* – 1 Парето-эффективного объекта *m*-го тезауруса *n*-го уровня.

Принадлежность *m*-го объекта к *i*-му тезаурусу *n*-го уровня определяется:

$$d_{im} = \min(d_{im}),$$

где d_{jm} – мера близости между *m*-м объектом тезауруса и *j*-м Парето-эффективным объектом тезауруса ($O_m, O_j \in T_k^{n-1}$).

Выделение подтезаурусов производится до тех пор, пока коэффициент связанности графа, определяемого тезаурусом, не равен 0.

Дерево понятий представляет собой древовидную структуру, в узлах которой расположены Парето-эффективные объекты тезауруса разного уровня. Дерево понятий отражает иерархичность структуры тезауруса учебного курса, наглядно показывает вложенность тезаурусов разного уровня. Обход дерева понятий позволяет определить последовательность изучения объектов тезауруса.

Последовательность изучения объектов тезауруса в пошаговой процедуре обучения внутри группы определяют в процессе пересчета семантических координат.

Вектор $\overline{V}_i$ – вектор *i*-го объекта тезауруса, координаты которого равны семантическим координатам этого объекта. Длина вектора $\overline{V}_i$ равна семантическому потенциалу *i*-го объекта тезауруса.

Косинус угла между вектором $\overline{V}_i$ и осью Sc_i определяет позиция объекта тезауруса в последовательности изучения.

Позиция i-го объекта тезауруса в последовательности изучения определяется формулой:

$$p_i = \frac{Sp_i}{Sc_i},$$

где Sp_i – семантический потенциал i-го объекта тезауруса; Sc_i – семантическая сложность i-го объекта тезауруса.

Объект тезауруса k-й занимает i-ю позицию в последовательности изучения при выполнении условия:

$$\overline{\exists}\, O_j \in O \,\Big|\, n \le p_j \le p_k,\ O_m \in O, Sp_i \le Sp_k,$$

$$n = \begin{cases} p_m, \text{ если } i \ge 2, \\ 0, \text{ если } i = 1, \end{cases}.$$

где O_m – объект тезауруса, занимающий i – 1 позицию в последовательности изучения.

Отображение графа из семантических координат в координаты «важность понятия – последовательность» дает наглядное представление о последовательности изучения понятий внутри группы и времени, необходимой для изучения каждого понятия.

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. *Браславский П.И., Гольдштейн С.Л., Ткаченко Т.Я.* Тезаурус как средство описания систем знаний [Текст] // НТИ. Сер. 2, Информ. процессы и системы. – 1997. – № 11. – С. 16-22. – ISSN 0548-0027.

2. *Бельков С.А., Гольдштейн С.Л., Ткаченко Т.Я.* Гипертекстовый тезаурус системных знаний [Текст] // НТИ. Сер. 2, Информ. процессы и системы. – 1998. – № 3. – С. 1-11. – ISSN 0548-0027.

3. *Жмайло С.В.* К разработке современных информационно-поисковых тезаурусов [Текст] // НТИ. Сер. 1, Орг. и методика информ. работы. – 2004. – № 1. – С. 23-31. – ISSN 0548-0019.

4. *Скороходько Э.Ф.* Семантическая продуктивность и семантическая емкость слова в общеупотребительной и терминологической лексике: некоторые количественные закономерности знаний [Текст] // НТИ. Сер. 2, Информ. процессы и системы. – 1997. – № 2. – С. 1-13. – ISSN 0548-0027.

5. *Скороходько Э.Ф.* Информационная ценность термина в научном тексте (индикативные и информационные маркеры) [Текст] // НТИ. Сер. 2, Информ. процессы и системы. – 1998. – № 9. – С. 13-22. – ISSN 0548-0027.

6. *Гольдштейн С.Л., Кудрявцев А.Г.* Идея рациональной структуризации знаний (на примере из математики) [Текст] // НТИ. Сер. 2, Информ. процессы и системы. – 1997. – № 2. – С. 13-17. – ISSN 0548-0027.

7. *Антонов А.В., Мешков В.С.* Аналитические проблемы поисковых систем и «лингвистические анализаторы» [Текст] // НТИ. Сер. 1, Орг. и методика информ. работы. – 2000. – № 6. – С. 6-13. – ISSN 0548-0019.

8. *Белоногов Г.Г., Гиляревский Р.С., Хорошилов Ал-др А., Хорошилов Ал-сей А.* Автоматическое распознавание смыслового тождества и смысловой близости русских слов на основе их словообразовательного и словоизменительного анализа и синтеза [Текст] // НТИ. Сер. 2, Информ. процессы и системы. – 2003. – № 1. – С. 30-33. – ISSN 0548-0027.

9. *Белоногов Г.Г., Быстров И.И., Новоселов А.П., Козачук М.В., Хорошилов Ал-др А., Хорошилов Ал-сей А.* Автоматический концептуальный анализ текстов [Текст] // НТИ. Сер. 2, Информ. процессы и системы. – 2002. – № 10. – С. 26-32. – ISSN 0548-0027.

10. *Нгуен М.Х., Аджиев А.С.* Описание и использование тезаурусов в информационных системах, подходы и реализация [Текст] // Электронные библиотеки. – 2004. – Том 7. – № 1. – ISSN 1562-5419.

ВИРТУАЛЬНЫЙ ЛАБОРАТОРНЫЙ ПРАКТИКУМ В ЭНЕРГЕТИЧЕСКОМ ОБРАЗОВАНИИ – ЗА И ПРОТИВ

А.С. Поляков – ассистент кафедры ЭОП
филиала «МЭИ (ТУ)» в г. Волжском
П.Д. Васильев – канд. техн. наук, доцент,
зав. кафедрой ЭОП филиала «МЭИ (ТУ)» в г. Волжском

В настоящее время в Российской Федерации функционирует более 1100 государственных и негосударственных высших учебных заведений и их филиалов. Среди них более 500 вузов осуществляют подготовку специалистов по 79 направлениям и почти 300 специальностям в области техники и технологий [1, с. 407].

Основная особенность технического образования состоит в необходимости организации и проведения занятий с применением реального исследовательского и технологического оборудования. В качестве традиционных элементов обучения в учебных заведениях используются лекции, практические занятия, семинары, лабораторные занятия, расчетные задания, курсовое проектирование, прохождение технологических и производственных практик. Но лабораторный практикум – наиболее значимый и результативный компонент естественно-научной, общей профессиональной и специальной подготовки в области техники и технологий, предназначенный для приобретения навыков работы на реальном оборудовании, с аналогом которого будущему специалисту придется иметь дело в своей практической деятельности.

Рассмотрение существующих способов проведения лабораторных практикумов позволяет выделить некоторые общие группы, например, *идеальный практикум* – когда обучаемому предлагается перед проведением экспериментов комплектовать установку из множества разнообразных компонентов оборудования. *Традиционный практикум* предлагает обучаемому

установку, уже готовую для проведения эксперимента. Обе группы требуют много свободного оборудования и времени для проведения работы. Существует риск порчи оборудования при плохой подготовке обучаемого. Также велики денежные затраты на поддержание установок в рабочем состоянии [1, с. 413].

Альтернативой данным группам является *виртуальный лабораторный практикум*, который позволяет при наличии одной установки работать большому числу обучаемых, что снижает затраты на эксплуатацию и позволяет уберечь оборудование от неумелого использования. Установки виртуальных лабораторных практикумов являются относительной новинкой на рынке образовательных услуг Российской Федерации, поэтому остается открытым вопрос о недостатках и достоинствах данных систем.

У авторов существует возможность провести анализ эффективности виртуального лабораторного практикума на базе интернет-лаборатории «Основы электроники», созданной специалистами МЭИ (ТУ). Сбор данных проводился в течение полутора семестров в условиях реального образовательного процесса. Сразу следует обратить внимание на то, что при работе с системой не рассматривались как недостатки ошибки программного обеспечения и ошибки, которые возможно исправить с помощью разработчиков. Вопрос ставился в более общем масштабе – полезен ли виртуальный лабораторный практикум в образовательной деятельности или нет.

Основным достоинством лаборатории является возможность подключения большого числа пользователей как по локальным вычислительным сетям, так и через сеть Интернет. То есть обучаемый может проводить лабораторные исследования из любого удобного ему места и в любое удобное время. Также следует выделить систему помощи обучаемому, которая позволяет при отсутствии требуемых навыков получить их в процессе работы. Пользователям предоставлен широкий спектр объектов изучения в разных областях электроники. При этом оборудование состоит всего лишь из одного небольшого по объему комплекса, который прост в обслуживании и защищен от неумелого обращения.

В процессе эксплуатации данного лабораторного практикума был выявлен серьезный недостаток системы. Проблема заключается в том, что обучаемый не может сопоставить свои действия при работе в клиентском программном обеспечении с работой реальной лабораторной установки. Как показала практика, студенты не могут отличить результаты работы систем моделирования от результатов, полученных при проведении реального эксперимента.

Еще один глобальный минус – к сожалению, еще не все студенты умеют пользоваться персональными компьютерами даже на самом базовом уровне, а работа с комплексом требует хотя бы умения пользоваться гиперссылками.

Итак, можно сформировать общие выводы по эксплуатации данного лабораторного практикума.

Достоинства:

– низкая стоимость установки и эксплуатации оборудования;

– защита от неумелого пользования;

– удобный доступ к лабораторному комплексу;

– простая и понятная система помощи.

Недостатки:

– отсутствие понимания результатов работы у студента, взаимосвязи схемы на экране и реального оборудования, установленного в комплексе;

– для пользования комплексом необходимы базовые навыки работы с компьютером и умение навигации в системе помощи.

Таким образом, наличие виртуального лабораторного практикума не всегда позволяет полностью отказаться от проведения работ на классическом оборудовании. Приемлем вариант использования практикума для дистанционного обучения студентов (для слушателей заочной формы обучения и центров переподготовки или повышения квалификации) и формирования так называемой «системы открытого образования» [1, с. 409].

Возможно, что данные выводы получились из-за недостаточного срока эксплуатации оборудования. Поэтому работа над анализом эффективности лабораторного практикума продолжается, и после накопления большего количества информации достоверность результатов будет пересмотрена.

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

Информатизация образования: направления, средства, технологии: Пособие для системы повышения квалификации / Под общ. ред. *С.И. Маслова*. – М.: МЭИ, 2004. – 868 с.

ИНФОРМАЦИОННЫЕ ПОТОКИ ПРИ ПРОВЕДЕНИИ ЭНЕРГОАУДИТА ПРЕДПРИЯТИЙ

Ю.В. Камышин – доцент
филиала «МЭИ (ТУ)» в г. Волжском

Коренное повышение энергетической эффективности экономики является центральной задачей Энергетической стратегии России. Без ее решения топливно-энергетический комплекс неизбежно будет сдерживать оздоровление и, тем более, подъем экономики.

В свою очередь, темпы роста и особенно структурной перестройки национальной экономики будут вместе с технологическим прогрессом определять динамику повышения ее энергетической эффективности. Чем выше темпы роста валового внутреннего продукта (ВВП) и чем больше роль сферы услуг и высокотехнологичных производств (то есть, чем меньше вклад в него ресурсо- и энергоемких производств), тем больше роль энергоэффективности, и тем меньшую часть экономического роста потребуется обеспечивать увеличением расхода энергетических ресурсов.

При реализации технологического потенциала энергосбережения выделяются три категории энергосберегающих мероприятий.

• *Малозатратные мероприятия*, которые сводятся к наведению порядка при использовании топлива и энергии: устранение потерь энергоносителей при транспортировке и хранении, соблюдение энергоэкономичных технологических режимов, замена энергооборудования избыточной мощности, оснащение потребителей счетчиками энергоносителей и т.п.

• *Капиталоемкие мероприятия*, требующие значительных целевых инвестиций и осуществляемые, только если эффект от энергосбережения в приемлемые сроки окупит затраты на их реализацию.

• *Сопутствующие мероприятия*, выполняемые в процессе технического перевооружения отраслей народного хозяйства, когда энергосбережение является сопутствующим фактором; к ним относится также изменение структуры используемых материалов, технологий и конечных продуктов.

Основное внимание при проведении энергоаудита необходимо обратить на проблему сбора и обработки информации, так как довольно часто представляемая предприятиями информация не отличается достоверностью. Поэтому необходимо проводить собственные измерения целым рядом соответствующих приборов и методов.

Тепловизионная съемка играет важную роль в техническом обслуживании объектов и широко применяется во всех областях промышленности. Этот метод получения изображений (термограмм) в тепловом излучении, испускаемом объектами и не воспринимаемом глазом, оказывает двойную услугу: без соприкосновения с объектом выявляет механические и электрические компоненты, чрезмерно разогретые вследствие развития дефекта, ведущего к отказу оборудования, а также дает возможность обнаруживать излишне большие потери тепла, что, как правило, признак неисправной или недостаточной изоляции.

Измерение расхода. Использование неврезных расходомеров позволяет быстро и точно определить расход различных сред, протекающих по трубопроводу, невзирая на диаметр этого трубопровода.

Анализ уходящих газов определяет эффективность сжигания, то есть показатели, позволяющие поверить (оценить) и оперативно настроить процесс горения. Результатом настройки процесса горения является экономия топлива, повышение КПД и качества продукции, уменьшение выброса вредных веществ в атмосферу.

Измерение скорости, влажности и температуры воздуха. Измерения параметров воздуха в помещениях позволяют контролировать и налаживать работу различных видов кондиционеров, что, в свою очередь, благотворно скажется на производительности рабочего персонала, находящегося в данном помещении, или поможет скорректировать технологический процесс.

Контактное и бесконтактное измерение температуры объекта. Контактное измерение осуществляется при помощи различных видов термопар, а там, где закрепление термопар невозможно, измерения осуществляются при помощи инфракрасных термометров. Такие способы измерений значительно расширяют среду применения данного оборудования.

Измерение давления в трубопроводе.

Измерение кислотности среды позволяет оценить степень агрессивности различных сред.

Измерение освещенности помещения. Измерение и оценка степени освещенности рабочего места (помещения) позволяет повысить работоспособность персонала, либо скорректировать технологический процесс.

Ультразвуковая локация. Утечки в системах трубопровода, неисправности клапанов в системах гидравлики и пневматики – все это создает узконаправленные высокочастотные колебания – ультразвук. Используя приборы, эти колебания легко выделить из общего шума и определить местоположение источника. Анализируя характерный звук, можно уточнить причину неисправности, оценить степень ее развития.

Анализ электрических параметров. Анализ показателей электропотребления дает возможность оптимизировать графики работы потребителей и экономить на снабжении электроэнергией.

Информационно-аналитическая система управления (ИАСУ)

Эффективность деятельности служб Госэнергонадзора и органов государственной власти и управления существенно зависит от уровня информационного обеспечения.

Применение новых информационных технологий улучшает оперативность оценки информации о контролируемых организациях и повышает качество управленческих решений. В связи с изменением цен на энергоносители и ориентацией на региональные программы энергосбережения существует объективная необходимость в оперативном контроле за потреблением энергии на предприятиях и организациях с последующей разработкой и внедрением энергосберегающих мероприятий. Сегодня становятся актуальными такие задачи, как:

– оперативный доступ к данным об энергии, фактически потребляемой предприятиями;

– накопление статистических данных о потребляемой энергии;

– оценка реальной потребности в энергоресурсах на основе статистических данных для последующего установления лимитов;

– анализ эффективности использования энергетических ресурсов;

– автоматизация подготовки отчетных форм по статистике энергопотребления.

ИАС органов Госэнергонадзора имеет распределенную структуру и включает в себя два основных компонента: серверную и клиентскую части.

Серверная часть устанавливается в территориальном управлении Госэнергонадзора и предназначена для централизованного хранения информации о контролируемых предприятиях и ее аналитической обработки. Здесь должны формироваться статистические данные, создаваться отчеты по статистике энергопотребления, планироваться энергосберегающие мероприятия, храниться и актуализироваться нормативные документы.

Клиентская часть предназначена для ввода и хранения информации об энерготехнологическом оборудовании и энергопотреблении конкретной организации. Клиентская часть устанавливается в организации, где и происходит заполнение основных баз данных (БД) ИАС.

Банк данных серверной части включает в себя следующие базы данных:

- БД производителей и потребителей энергии.
- БД теплового оборудования.
- БД нормативной документации.

Клиентская часть выполняет следующие основные функции:

– ввод и редактирование информации в БД электрооборудования, БД теплового и БД топливоиспользующего оборудования;

– администрирование всех БД клиентской части ИАС, ведение и поддержка их целостности;

– формирование выборок из всех БД;

– выполнение аналитических расчетов над данными из БД предприятия;

– генерация отчетов по результатам выборок из всех БД и аналитических расчетов;

– перенос данных для поддержания актуальности информации на серверной части ИАС;

– хранение и просмотр предписаний инспекторов энергонадзора, полученных от серверной части ИАС.

И, наконец, самое главное. В переводе экономики России на энергосберегающий путь развития важное место занимает всестороннее комплексное обследование всех потребителей энергетических ресурсов (энергоаудит). По большому счету, именно с него и должна начинаться всякая работа по энергосбережению, поскольку здесь, как нигде, надо знать: где, что, сколько, куда и почему теряется.

Альтернативы энергосбережению, безусловно, нет. Развитие экономической ситуации в последние десятилетия со всей очевидностью демонстрирует бесперспективность одного только бесконечного наращивания добычи и производства энергетических ресурсов. Их все равно не будет хватать, если вовремя не позаботиться об эффективном и бережном использовании предложенного нам природой. Помня, что кладовые Земли не бездонны, человечество обречено на то, чтобы научиться рачительно использовать источники своего существования.

Осознание всего этого вряд ли позволит кому-то возражать против самого принципа энергосбережения. А между тем на практике оно далеко не так просто пробивает себе дорогу.

Конечно, тому есть много причин. И одна из них, едва ли не самая главная, – отсутствие должной координации в деятельности всех причастных к этой проблеме структур, их разобщенность. Изменить ситуацию к лучшему может только объединение усилий.

ПОСТРОЕНИЕ ПРОСТРАНСТВЕННЫХ ИЗОБРАЖЕНИЙ ЭНЕРГЕТИЧЕСКИХ ОБЪЕКТОВ

В.В. Староверов – канд. техн. наук, доцент
филиала «МЭИ (ТУ)» в г. Волжском
Л.В. Староверова – канд. техн. наук, доцент
ВПИ (филиала) ВолгГТУ

Использование современной электронно-вычислительной техники позволяет перейти от традиционного ручного конструирования к новым технологиям. Широкие возможности для выполнения конструкторских документов представляет КОМПЬЮТЕРНАЯ ГРАФИКА – область информатики, предназначенная для создания и обработки моделей геометрических образов и их изображений с помощью ЭВМ. Использование компьютера в конструкторской деятельности значительно облегчает подготовку конструкторских и других графических документов, связанных с изготовлением изделий, сокращает сроки их разработки и улучшает качество.

Существует множество графических программ для специалиста, работающего с технической графикой. Наиболее удобной из них является универсальная графическая система проектирования AutoCAD, разработанная фирмой AutoDesk.

Из прикладной системы автоматизации чертежно-графических работ с удобными и эффективными средствами AutoCAD превратился в универсальную графическую программу, позволяющую не только разрабатывать двухмерные, плоские чертежи, но и моделировать сложные объемные конструкции, используемые в самых различных областях человеческой деятельности.

Создание объемных моделей более трудоемкий процесс, чем построение их проекций. Однако в конструкторских разработках такое моделирование открывает ряд новых возможностей:

– возможность рассмотрения модели из любой точки;
– автоматическая генерация основных и дополнительных видов на плоскости;
– построение сечений и разрезов на плоскости;
– проверка взаимодействия нескольких деталей;
– экспорт модели в анимационные приложения и программы;
– инженерный анализ.

Трехмерные модели существенно отличаются от аксонометрического рисунка.

1. На аксонометрическом рисунке мы можем видеть изображение объекта, выполненного с одной точки зрения, трехмерная модель позволяет видеть объект с любой стороны.

2. На плоском экране мы получаем плоское отображение модели, однако в памяти компьютера модель характеризуется реальной объемной формой.

3. Для твердотельной модели мы можем автоматически определить массу, объем и другие параметры.

Твердотельное моделирование – это самое современное и наиболее совершенное средство создания компьютерных трехмерных моделей. Твердотельная модель описывается объемом, который она занимает, а, следовательно, обеспечивает полное и однозначное определение трехмерной геометрической формы.

Безусловными преимуществами твердотельной модели являются:

1) полное определение объема и формы;

2) обеспечение автоматического удаления невидимых (скрытых) линий;

3) автоматизированное построение трехмерных разрезов проектируемого изделия, что особенно важно при анализе сложных сборочных единиц;

4) получение значений массы, площади поверхности, центра тяжести, момента инерции для любой детали или изделия в целом, которые необходимы для прочностных расчетов или могут экспортироваться в такие приложения, как системы числового программного управления;

5) наличие разнообразной палитры цветов, управление цветовой гаммой, получение тоновых эффектов – всего того, что способствует качественному получению изображения формы;

6) несмотря на кажущуюся сложность, их легче строить и редактировать.

Один из методов твердотельного конструирования основан на построении модели из набора базовых твердотельных примитивов, находящихся в библиотеке системы. На рис. 1 приведен чертеж котельного агрегата, выполненного с помощью твердотельного моделирования.

Для получения других проекций, дополнительных видов или отдельных элементов изображенного объекта не требуется дополнительных построений, достаточно выполнить необходимые операции редактирования (рис. 2).

С помощью команд редактирования твердотельных объектов можно быстро и с высокой точностью произвести перекомпоновку изображения любой сложности. Например, на основе предыдущего чертежа котла П-образной компоновки, может быть получен чертеж котла Т-образной компоновки (рис. 3).

На основе имеющегося сборочного чертежа может быть выполнена деталировка объекта с необходимыми видами, разрезами и сечениями, с простановкой всех необходимых размеров и допусков, а также определением объема и массы деталей сколь угодно сложной формы с высочайшей точностью (рис. 4).

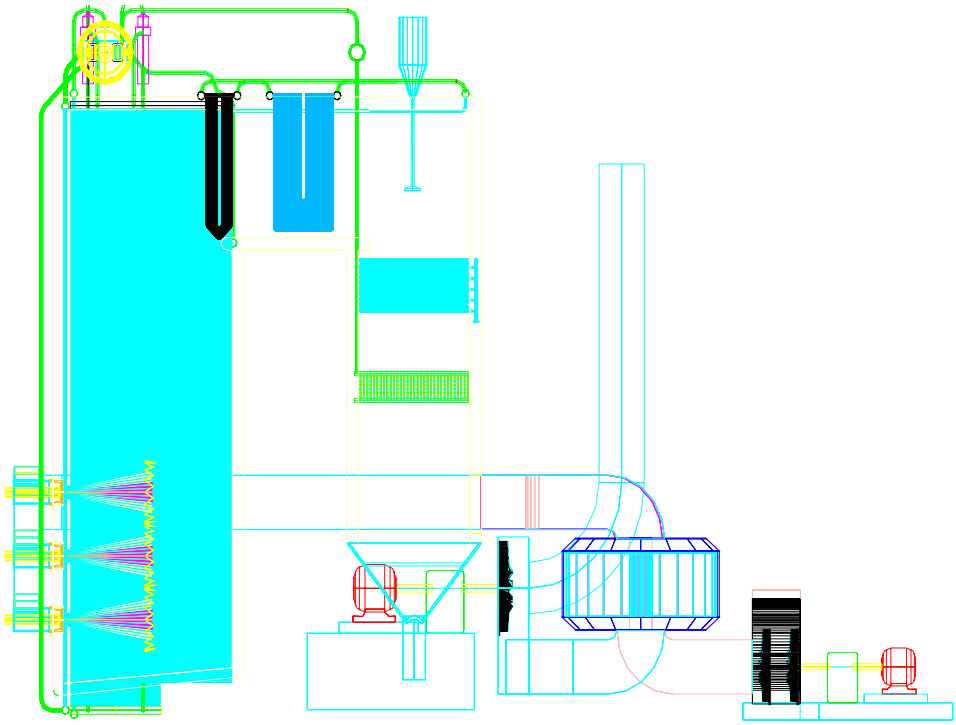


Рис. 1. Профильная проекция объекта, выполненного с помощью твердотельного моделирования

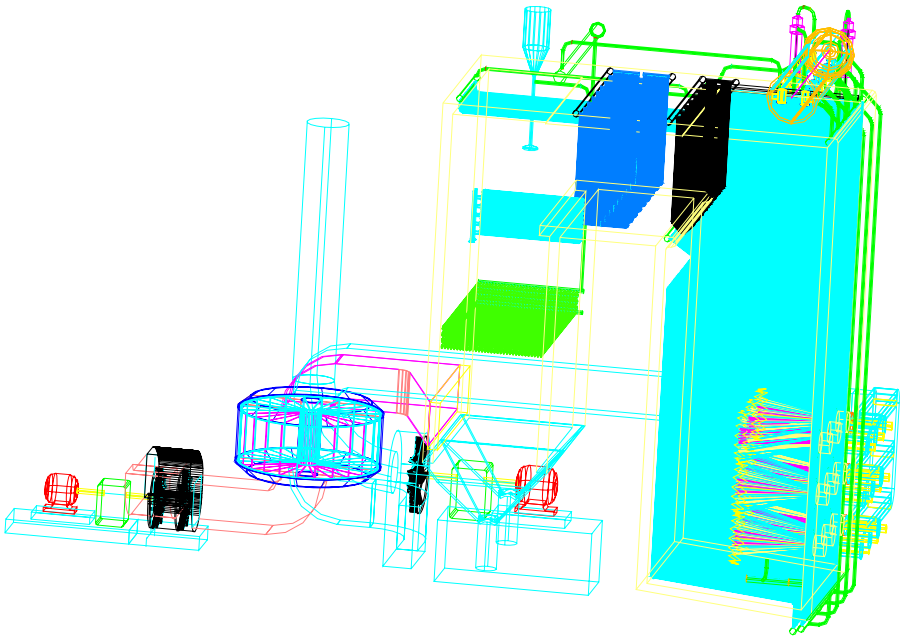


Рис. 2. Аксонометрическая проекция того же объекта, полученная с помощью команды «Орбита»

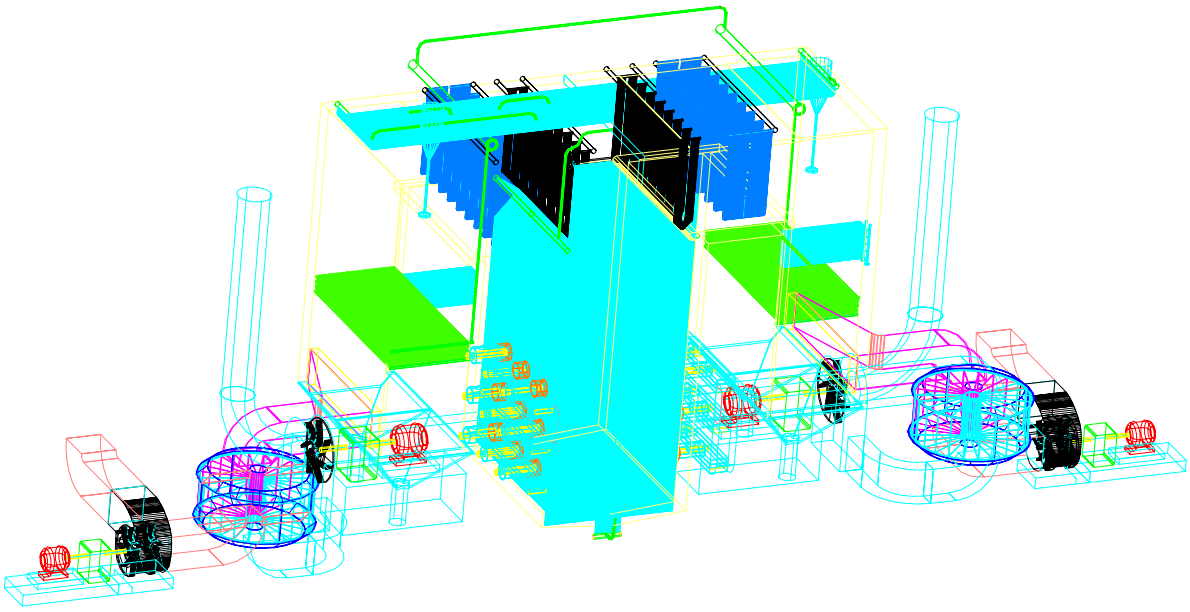


Рис. 3. Котел Т-образной компоновки, полученный путем редактирования с помощью команд «Обрезать» и «Зеркало»

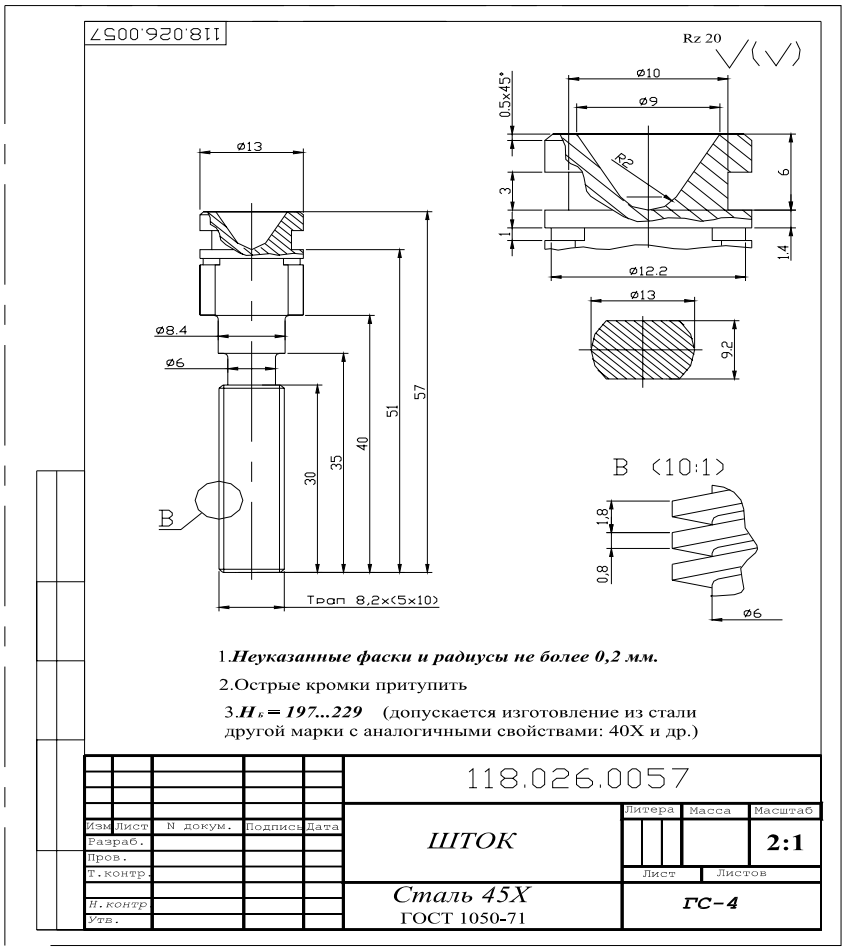


Рис. 4. Чертеж детали, являющейся одной из составных частей изображенного объекта

МАТЕМАТИЧЕСКОЕ МОДЕЛИРОВАНИЕ ТЕХНОЛОГИЧЕСКОГО ПРОЦЕССА ХОЛОДИЛЬНОЙ СТАНЦИИ ПРОМЫШЛЕННОГО ПРЕДПРИЯТИЯ

А.И. Грошев – канд. техн. наук, доцент
филиала «МЭИ (ТУ)» в г. Волжском
А.Н. Гриценко – канд. техн. наук, доцент
филиала «МЭИ (ТУ)» в г. Волжском
В.В. Староверов – канд. техн. наук, доцент
филиала «МЭИ (ТУ)» в г. Волжском

В практике эксплуатации холодильных установок встречаются случаи, когда качество хладоснабжения отдельных объектов в силу ряда причин бывает недостаточным. При этом возникают вопросы, каковы причины неисправности, что можно предпринять для ее устранения, какие меры будут наиболее эффективными? При решении таких задач незаменимым средством является математическая модель, позволяющая в кратчайшие сроки выявлять участки с наибольшими нагрузками, оценивать состояние объектов, выбирать наиболее эффективные методы оптимизации оборудования, оперативно оценивать все изменения в системах, прогнозировать возможные неисправности при проектировании новых систем и выполнять экспертную оценку проектов.

В этой связи разработка методик мониторинга холодильных установок на основе современных ПЭВМ представляет собой актуальную задачу, входящую в систему энергоаудита.

Целью работы является: обследование режима работы оборудования и степени влияния на него всех потребителей холода; анализ причины неустойчивости технологического режима работы станции «Остров»; математический расчёт различных режимов холодильной станции [1; 5]; рекомендации по оптимизации работы станции «Остров».

Для выбора адекватной модели и разработки элементов такой системы проводились работы по договору с ОАО «САН Интербрю», в ходе которых произведен расчет цикла холодильной установки и составлена методика расчета агрегатов холодильной установки на основе теории термодинамических циклов, а также осуществлена экспериментальная проверка полученных данных.

В ходе выполнения работы был проведен эксперимент по определению параметров, характеризующих режимы холодильной установки. В эксперименте были определены значения параметров хладагента и промежуточного хладоносителя в характерных точках системы хладоснабжения, а также расходы рабочих тел.

Объектом исследования была выбрана линия пропиленгликоля (ПГ) и её холодильного контура, являющаяся частью станции производства холода «Остров» холодильно-компрессорного участка № 2 ОАО «САН Интербрю».

Состав холодильной станции с установленными средствами контроля и автоматики на холодильной машине показаны на рис. 1. Компьютерное обеспечение наблюдения за контролем параметров, работой агрегатов холодильной машины и приборов автоматики на станции дает практически полное представление о функционировании всех её элементов.

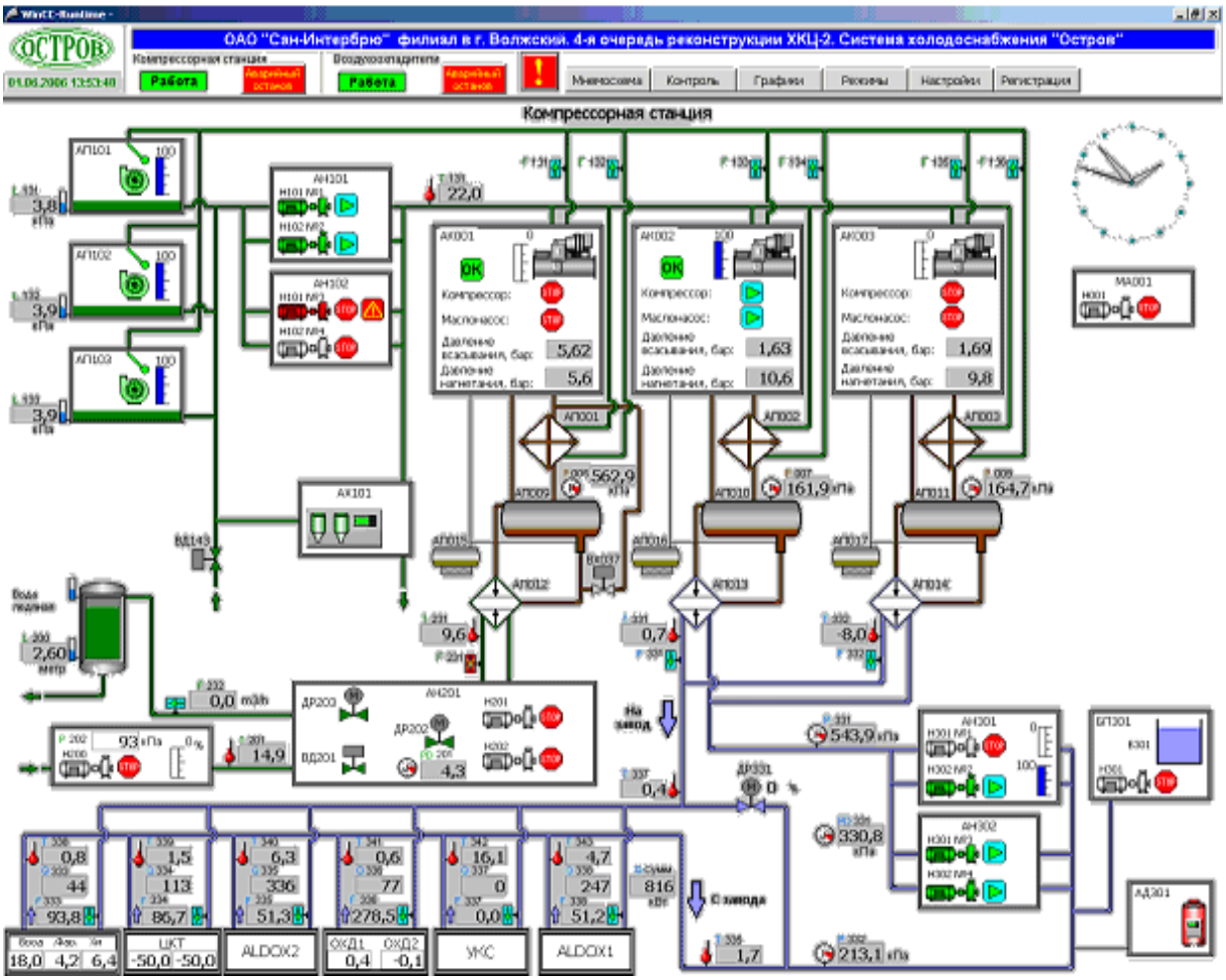


Рис. 1. Исходная схема действительного режима работы холодильной машины

Исходными данными для выполнения расчета и анализа являются: тепловые нагрузки на охлаждаемые объекты; схема присоединения потребителей к системе; параметры хладагента и промежуточного хладоносителя у источника холода и потребителей.

Исследование проводилось аналитическим методом, в ходе которого было выполнено математическое описание процессов, происходящих в отдельных устройствах холодильной установки с использованием теории термодинамических циклов и теории теплообменных аппаратов. Проверка адекватности математической модели была выполнена экспериментальным методом с использованием результатов контроля технологического режима станции «Остров».

На линии ПГ подключены ряд потребителей. Суммарная проектная мощность всех потребителей превосходит проектную мощность холодильных агрегатов номер 2 и 3. Дефицит мощности составляет 400-500 кВт. Однако правильное повременное распределение тепловой нагрузки от потребителей на холодильную станцию позволяет избежать критических периодов срыва температурного режима её работы.

Термодинамический анализ холодильного цикла стандартного (проектного) и действительного температурного режима работы холодильной станции показал небольшие отклонения по температуре кипения аммиака (T_O) в отделителе жидкости ОЖ (или испарителе) и температуре его конденсации (T_K). Рассмотрены три цикла работы холодильной станции, указанные в таблице 1. С целью корректности проделанных расчётов нами выбрана единая холодопроизводительность машины, равная по величине базовой проектной для компрессоров – Q_0 = 1 520 кВт.

Таблица 1

Параметры точек холодильного цикла по линии ПГ

Таблица 1. Параметры точек холодильного цикла по линии ПГ

Режимы	Стандартный (проектный)							Действительный						Ожидаемый					
№ точки	1	2	2а	2 в	3	3а	4	1	2	2а	2 в	3	4	1	2	2а	2 в	3	4
h, Ккал/кг	399	450	453,5	468	142,5	135	135	398	447	450	464	133	133	399	443	446	459	133	133
h, кДж/кг	1672	1886	1900,2	1960,9	597,1	565,7	565,7	1668	1873	1886	1944	557,3	557,3	1672	1856	1869	1923	557,3	557,27
t, оС	-10	98	104	126	36	31	-10	-13	88	94	118	30	-13	-10	83	95	117	30	-10
P, бар	2,8	14	14		14	14	2,8	2,66	11,7	11,7	11,7	11,7	2,66	2,8	11,7	11,7	11,7	11,7	2,8
V, м3/кг	0,44							0,47						0,44					
X, %	100	-	-		0	-	15,1	100	-	-		0	16,6	100	-	-		0	16

Наблюдается фактическое снижение температуры кипения аммиака в испарителе линии ПГ в отличие от проектного, что приводит к увеличению энергопотребления на приводе компрессора. Несоответствие проектного и действительного режимов требует проведения пересчёта термодинамического цикла работы холодильной машины и сравнительной оценки результатов энергопотребления.

Исходные данные к расчёту действительного цикла взяты непосредственно из показаний комплекта средств контроля и управления, установленных на оборудовании станции «Остров», а для стандартных расчётных режимов – по проектным данным винтовых компрессорных агрегатов линии ПГ и установленного оборудования холодильной станции. Данные теплофизических свойств ПГ предоставлены техотделом завода, а хладагента (аммиака) – изъяты из стандартной ln P-h диаграммы [2].

По величинам исходных данных и температурам фактического нагнетания паров хладагента после компрессоров на линии ПГ выстроили названные расчетные циклы в стандартной диаграмме ln P-h, которая приведена на рис. 2.

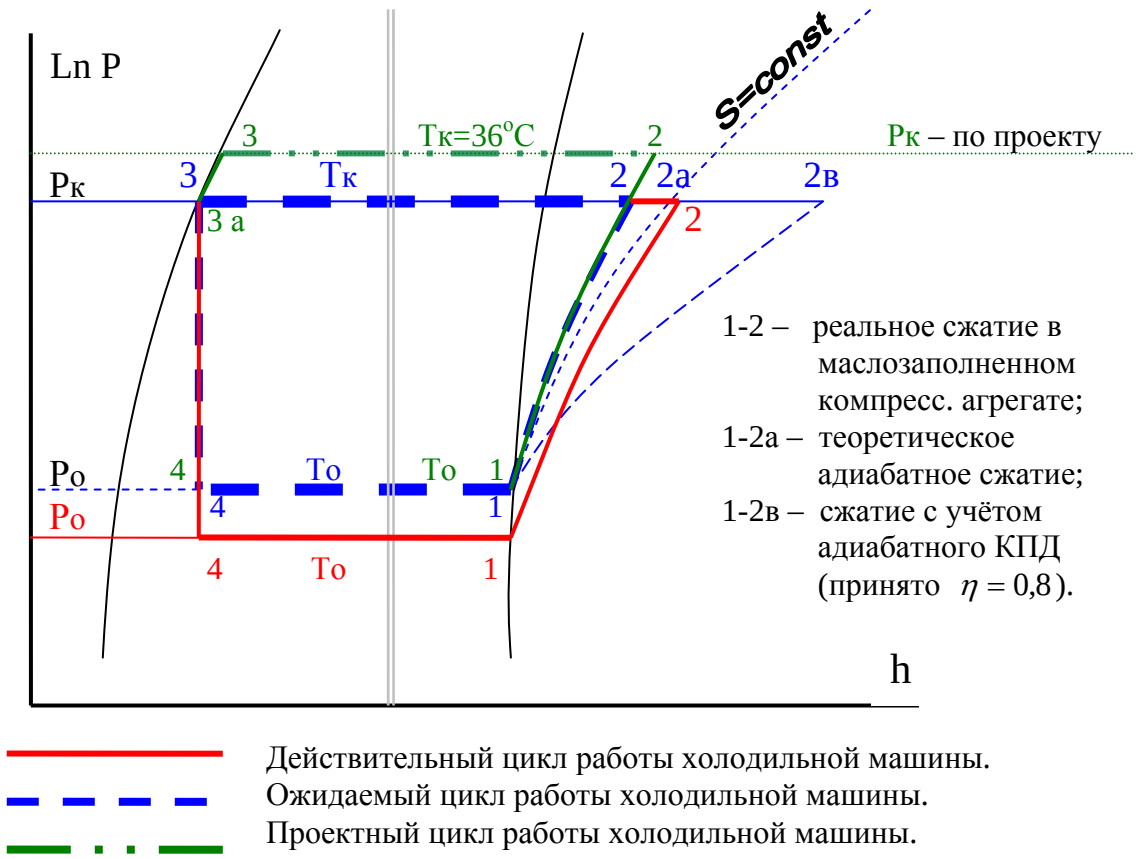


Рис. 2. Ln P-h диаграмма расчётных циклов работы ХМ линии ПГ

На примере «ожидаемого» цикла на рис. 2 дополнительно показано влияние условий сжатия на характер процесса. Линия 1-2в характерна при сжатии паров рабочего тела в механических *неохлаждаемых* компрессорах, когда часть теплоты от сжимаемого рабочего тела и механического трения в компрессоре успевает передаваться новым порциям сжимаемого рабочего тела. Эта теплота учитывается внутренним КПД компрессора η. Положение точки 2в на диаграмме определяется величиной давления P_K и расчётной энтальпией $h_{2в} = (h_{2а} - h_1) / \eta = \ell/\eta$, где ℓ – удельная работа адиабатного сжатия от давления P_O до давления P_K по линии S = const.

На диаграмме видно как влияет охлаждение смазочным маслом паров сжимаемого аммиака в винтовых маслонаполненных компрессорных агрегатах на сокращение потребляемой работы сжатия. Сокращение потребляемой удельной работы определяется разностью энтальпий в точках 2в и 2. К расчету энергопотребления на холодильный цикл для всех предложенных расчётных режимов выбраны фактические показатели сжатия, определяемые величинами параметров в точке 2 каждого из рассматриваемых циклов. По величинам параметров точек предложенных циклов проведен математический расчет показателей работы ХС, величины которых занесены в таблицу 2.

Таблица 2

Характеристики работы холодильной машины по линии ПГ

Qo= 1520 кВт		Таблица 2. Характеристики работы холодильной машины по линии ПГ				
Характеристика ХМ	Формула	1 Стандартн.	2 Действител	3 Ожидаемый		Разность между 2 и 3
Уд. Холодопроиз-ть qo, кДж/кг	qo= h1-h4	1106,16	1110,35	1114,54		-4,19
Масса циркул. Аммиака G,кг/с	G=Qo/qo	1,37412309	1,3689377	1,36379134		0,00514638
Уд. Теплота конд-ции qк, кДж/кг	qk=h2-h3	1288,425	1315,66	1298,9		16,76
Объём. Произ-ть компр. V,м3/с	V=v*G	0,60461416	0,6434007	0,60006819		0,04333254
Уд.работа компр-ра l, кДж/кг	l=h2-h1	213,69	205,31	184,36		20,95
Потреб. мощн. Компр. L, кВт	L=l*G	293,636364	281,0566	251,4285714		29,6280323

Из приведенных расчётов выявлен значительный перерасход энергопотребления только за счет снижения температуры кипения аммиака в ОЖ. Причина такого снижения температуры кипения аммиака определяется процессами теплообмена в испарителе.

Приведем математический тепловой расчёт процессов в испарителе [3].

Расчет значений тепловосприятия хладагента производится по формуле:

$$Q_X = D \cdot (h'' - h'), \text{ кВт}, \quad (1)$$

где D – массовый расход хладагента, кг/с; h'' – энтальпия хладагента на выходе из испарителя, кДж/кг; h' – энтальпия хладагента на входе в испаритель, кДж/кг.

Расчет значений теплоотдачи пропиленгликоля производится по формуле:

$$Q_П = D_П \cdot C_P (t''_П - t'_N)\, \eta, \text{ кВт}, \quad (2)$$

где $D_П$ – расход пропиленгликоля, кг/с; C_P – теплоемкость пропиленгликоля, кДж/кг °С; t'_N – температура пропиленгликоля на входе в испаритель, °С; $t''_П$ – температура пропиленгликоля на выходе из испарителя, °С; η – КПД испарителя, η = 0,99.

Тепловой поток в испарителе:

$$Q_{ИС} = F \cdot \Delta t \cdot K, \text{ кВт}, \quad (3)$$

где F – поверхность испарителя, F = 306 м^2; Δt – среднелогарифмический температурный напор, °С; K – коэффициент теплопередачи, кВт/м^2°С.

Величина среднелогарифмического температурного напора Δt определяется по формуле:

$$\Delta t = \varepsilon_{\Delta t} \left[(t'_П - t_H) - (t''_П - t_H)\right] / \ln\left[(t'_П - t_H)/(t''_П - t_H)\right], \text{ °C}, \quad (4)$$

где $\varepsilon_{\Delta t}$ – поправка на схему движения теплоносителей; t_H – температура насыщения хладагента при параметрах в испарителе, °С.

Величина коэффициента теплопередачи определяется коэффициентами теплоотдачи со стороны греющего и нагреваемого теплоносителей, а также термических сопротивлений теплопроводности материала стенки каналов и термических сопротивлений слоя загрязнений поверхностей теплообмена.

$$K = \left(\frac{1}{\alpha_1} + \frac{\delta_C}{\lambda_C} + \frac{\delta_m}{\lambda_m} + \frac{1}{\alpha_2} \right)^{-1}, \text{ Вт/м}^2\,{}^{\circ}\text{C}, \tag{5}$$

где α_1 – коэффициент теплоотдачи со стороны пропиленглиголя, Вт/м^2 $^{\circ}$С; α_2 – коэффициент теплоотдачи со стороны аммиака, Вт/м^2 $^{\circ}$С; λ_C – коэффициент теплопроводности материала стенки каналов испарителя, Вт/м $^{\circ}$С; λ_m – коэффициент теплопроводности слоя загрязнений стенки испарителя, Вт/м $^{\circ}$С; δ_C – толщина стенки каналов испарителя, м; δ_m – усредненная толщина слоя загрязнений каналов испарителя, м.

Значения коэффициента теплоотдачи определяются по критериальным уравнениям теории подобия [4]. Для пропиленгликоля при вынужденной конвекции:

$$\alpha_1 = C\lambda_{ПГ}\,\mathrm{Re}^m\,\mathrm{Pr}^n \big/ D_{ЭК}\,, \tag{6}$$

где Re = $W_Г\, d_2/\nu$ – число Рейнольдса; $D_{ЭК}$ – эквивалентный диаметр канала, м; d_2 – внутренний диаметр трубы, м; $\lambda_{ПГ}$ – коэффициент теплопроводности пропиленгликоля, Вт/мК (табл. [4]); $W_Г$ – скорость пропиленгликоля в каналах испарителя, м/с (по данным измерений); ν – коэффициент кинематической вязкости пропиленгликоля, м^2/с (табл. [4]); Pr – число Прандтля пропиленгликоля при его температуре; C, m, n – коэффициенты, определяемые условиями подобия.

Коэффициент теплоотдачи со стороны аммиака при испарении:

$$\alpha_2 = 4{,}34 q^{0{,}7} \left[\left(\frac{p_2}{10^6} \right)^{0{,}14} + 1{,}35 \cdot 10^{-2} \left(\frac{p_2}{10^6} \right)^2 \right], \tag{7}$$

где q – плотность теплового потока в испарителе, Вт/м^2 (принимается первоначально по статистическим данным и уточняется в процессе расчета итерационным методом); p_2 – абсолютное давление аммиака в испарителе, МПа.

Наличие загрязнений на поверхностях теплообмена, например, масляной пленки толщиной менее миллиметра, приводит к уменьшению коэффициента теплопередачи. При толщине пленки равной 0,3 мм величина коэффициента теплопередачи, а соответственно и тепловой поток от ПГ к аммиаку снижаются в четыре раза.

Из приведенных расчётов видно, что в испарителе производится охлаждение ПГ в 4 раза меньше проектного значения. Если принять во внимание, что температура аммиака в этот момент в испарителе составляла $T_O = -14$ $^{\circ}$С, то есть меньше проектной на 4 градуса, то можно однозначно говорить

об увеличенной разности температур между теплоносителями внутри испарителя. Для заданного испарителя теплообмен определяется величиной коэффициента теплопередачи и его площадью. Уменьшенный коэффициент теплопередачи определяется загрязнением поверхности теплообмена.

Анализ схемы и реального объекта показал, что основным загрязнителем поверхности теплообмена в испарителе может служить масло, используемое для функционирования винтового компрессора. Оно не отделяется от паров аммиака после компрессии в должной степени и поступает далее в технологическое оборудование холодильной машины – конденсатор, отделитель жидкости и испаритель. В нем, при низкой температуре хладагента, применяемое масло увеличивает свою вязкость и осаждается на стенках теплообмена, создавая большое термическое сопротивление теплопередаче. Вопрос эффективного отделения масла и удаления его из технологического оборудования является актуальным.

ЗАКЛЮЧЕНИЕ И РЕКОМЕНДАЦИИ

1. Анализом режимов работы холодильной установки выявлено отличие параметров действительного цикла работы холодильной станции «Остров» от ожидаемого по температуре кипения аммиака в отделителе жидкости – T_O. Следствием снижения температур кипения хладагента является перерасход энергии только по циклу холодильного контура до 30 кВт.

2. Расчётом испарителя показано, что разница температур между аммиаком и ПГ весьма велика и превышает проектное значение более чем в два раза. Причиной этого является появление масляной пленки на поверхности теплообмена, которая приводит к четырёхкратному уменьшению коэффициента теплопередачи.

3. Для обеспечения необходимой хладопроизводительности в вышеуказанных условиях требуется увеличение расхода охлаждающей среды (пропиленгликоля). Это приводит к уменьшению мощности передачи холода и к дополнительному перерасходу энергии на привод циркуляционных насосов.

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. *Арнольд Л.В.* и др. Техническая термодинамика и теплопередача. – М.: Выш. школа, 1979. – 446 с.

2. Техника низких температур. Атлас под редакцией *И.П. Усюкина*. – М.: Пищевая пром-ть, 1977. – 244 с.

3. *Михеев М.А.*, *Михеева И.М.* Основы теплопередачи. Изд. 2-е. – М.: Энергия, 1977. – 344 с.

4. *Лебедев*, *Юренев*. Теплотехнический справочник. Т. 2.

5. *Кирилин В.А.*, *Сычёв В.В.* и др. Техническая термодинамика. Издание IV. – М, 1983.

СЕКЦИЯ № 6
ЭКОЛОГО-ЭНЕРГЕТИЧЕСКАЯ БЕЗОПАСНОСТЬ

Руководители секции: ***Воронов Виктор Николаевич***
д-р техн. наук, профессор
Гончарова Любовь Константиновна
канд. хим. наук, доцент

МЕТОД ПОВЫШЕНИЯ ЭНЕРГЕТИЧЕСКОЙ ЭФФЕКТИВНОСТИ СИСТЕМ КОНДИЦИОНИРОВАНИЯ И ВЕНТИЛЯЦИИ

А.Н. Гвоздков – канд. техн. наук, доцент
Волгоградского государственного
архитектурно-строительного университета
Е.В. Коптелов – аспирант
Волгоградского государственного технического университета

Для обеспечения заданных параметров микроклимата (температура, влажность) в кондиционируемых помещениях приточный воздух, подаваемый в них, подвергают тепловлажностной обработке (ТВО). Этот процесс происходит в аппаратах для кондиционирования воздуха – в секции орошения (форсуночной камере). В форсуночной камере тепло- и массоперенос происходит между воздухом и отдельными, перемещающимися в пространстве каплями разбрызгиваемой воды.

В теплый период года, в зависимости от соотношения расчетных параметров наружной и внутренней сред, воздух обычно охлаждают и осушают, для чего требуются источники холода. Однако в некоторых случаях оказывается достаточным охлаждение на основе использования адиабатного (изоэнтальпийного) процесса испарительного охлаждения, что способствует снижению стоимости сооружения и эксплуатации систем кондиционирования. Наиболее благоприятные условия для использования таких систем существуют в районах с сухим и жарким климатом, а также в помещениях с большими избытками явного тепла и с повышенной влажностью воздуха. В холодный период года обработка воздуха обычно заключается в более простых режимах – его нагреве и увлажнении.

Для повышения экономической эффективности систем кондиционирования воздуха и вентиляции (СКВ и В) авторами были проанализированы особенности работы используемых форсуночных камер орошения и обоснованно выбран показатель интенсивности протекания процессов тепло- и влагообмена. Кроме того, был проведен анализ с обобщением конструктивных решений камер орошения и определены пути их совершенствования.

Повышение эффективности систем кондиционирования воздуха и вентиляции в первую очередь связанно с оптимизацией их энергопотребления

и снижением затрат энергии на тепловлажностную обработку приточного воздуха в контактных аппаратах.

Наиболее широкое применение в СКВ и В получили форсуночные камеры орошения (ФКО), которые используются в качестве блок-секций центральных кондиционеров, базовых элементов установок косвенно-испарительного охлаждения (КИО) воздуха и так называемых воздухоприготовительных центров.

В ФКО поверхность контакта образуется каплями воды, разбрызгиваемой форсунками. При этом происходит диспергирование воды на достаточно мелкие капли, что обеспечивает значительное развитие поверхности контакта. Следует отметить, что площадь контакта сильно зависит от числа капель, их величины, скорости движения относительно воздуха и траектории движения в рабочем пространстве камеры орошения. В свою очередь, на эти параметры влияет конструкция форсунок, давление воды, направление выпуска воды относительно воздуха и др.

Таким образом, в этом процессе имеет место сложный характер взаимодействия воздуха и воды, что вызывает сложности в выборе оценки эффективности протекания процессов тепло- и влагообмена (ТВО).

Снижение затрат энергии на обработку приточного воздуха определяется в первую очередь показателями интенсивности протекания процессов ТВО, для оценки которой может быть использована величина

$$\Lambda = \alpha_t \cdot F_{ж}, \tag{1}$$

где α_t – коэффициент теплообмена, Вт/м^2; $F_{ж}$ – поверхность контакта, м^2.

Величина Λ определяется на основе результатов экспериментальных исследований в режиме изоэнтальпийного увлажнения воздуха. При этом для определения относительных параметров температур следует использовать выражения:

$$\theta_t = 1 - \exp\left(-F_0'\right), \tag{2}$$

$$F_0' = \frac{\alpha_t \cdot F_{ж}}{c_в \cdot G_в} = \frac{\Lambda}{c_в \cdot G_в}. \tag{3}$$

где F_0' – модифицированный критерий Фурье; $c_в$ – теплоемкость воздуха, Дж/кг·К; $G_в$ – массовый расход обрабатываемого воздуха, кг/ч.

Особенностью работы ФКО является изменение в широком диапазоне начальных параметров и расходов контактирующих сред. Это приводит к нарушению оптимальных условий взаимодействия и снижению интенсивности протекания процессов тепло- и влагообмена.

Анализ известных конструктивных решений ФКО, направленных на повышение эффективности обработки воздуха и защищенных патентами и авторскими свидетельствами (свидетельство на полезную модель), показал,

что основное направление исследований – это оптимизация конструктивных элементов рабочего пространства. При этом для интенсификации процессов обработки воздуха предлагается более совершенные элементы ФКО, такие, как форсунки, сепараторы, а также технические решения по их размещению внутри камеры.

В патенте РФ № 2158883 представлены распылители орошения и оросительная система камеры, выполненные в виде сопловых патрубков с отверстиями, направленными друг к другу. Распыл происходит за счет соударения струй. Предлагаемые способы и устройство распылителя жидкости позволяют улучшить процесс образования поверхности контакта и обеспечения наиболее полного взаимодействия сред. Однако при этом не учитываются особенности взаимодействия воздуха и воды по высоте ФКО, что часто является причиной нарушения гидродинамических условий взаимодействия, особенно в нижней части рабочего пространства.

В авторском свидетельстве № 1536164 «Форсуночная камера орошения кондиционера» предлагается расположение патрубков с распылителями в шахматном порядке, а чередующиеся стояки имеют разную длину патрубков, что приводит к образованию множества зон дополнительного размельчения капель. Однако в этом случае не учитывается возможность изменения режимов работы камеры орошения. В частности, при изоэнтальпийных режимах обработки воздуха не имеет значения характер распределения капель по дисперсному составу, а определяющим является суммарное значение $\alpha_t \cdot F_{ж}$.

На основе результатов проведенных исследований были определены критерии оценки эффективности процессов ТВО, установлены факторы, влияющие на интенсивность протекания обменных процессов.

Проведенный анализ работы известных устройств для тепловлажностной обработки воздуха позволил разработать новое конструктивное решение рабочего пространства ФКО. В частности, для улучшения гидродинамических условий взаимодействия и расширения рабочего диапазона параметров контактирующих сред была предложена конструкция рабочего пространства с плоскопараллельной насадкой, размещенной в нижней части. Это устройство обеспечивает более равномерное распределение жидкости по живому сечению ФКО.

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. *Андреев Е.И.* Расчет тепло- и массообмена в контактных аппаратах. – Л.: Энергоатомиздат, 1985.

2. *Богословский В.Н., Поз М.Я.* Теплофизика аппаратов утилизации тепла систем отопления, вентиляции и кондиционирования воздуха. – М.: Стройиздат, 1983.

ОСОБЕННОСТИ ВЫБОРА АНИОНИТА-ОРГАНОПОГЛОТИТЕЛЯ ДЛЯ ВОДОПОДГОТОВКИ

Н.А. Стребкова – аспирантка
«МЭИ (ТУ)»
Л.К. Гончарова – канд. хим. наук, доцент
филиала «МЭИ (ТУ)» в г. Волжском
Л.Н. Морозова – начальник хим. участка
ИвГРЭС г. Комсомольска

Ионообменные материалы, используемые на водоподготовительных установках ТЭС, зачастую подвергаются необратимому отравлению органическими соединениями и загрязнению железом, содержащимися в исходной воде, что приводит к значительным экономическим потерям.

Наиболее распространенным в настоящее время является снижение содержания органических соединений в водах на стадии предочистки (30-70 %). Опыт эксплуатации установок предочистки показал, что получение обработанной воды с низким содержанием органических соединений весьма проблематично. Поэтому, наряду с усовершенствованием и модернизацией существующего оборудования предочисток, в последние годы наметилась тенденция удаления из вод органических соединений мембранными методами или сочетанием предочистки и мембранных методов.

При реконстукции Ивановской ГРЭС (г. Комсомольск Ивановской обл.) была запланирована обратноосмотическая установка после фильтров I ступени Na-катионирования. Исходной водой Ивановской ГРЭС служит вода озера с большим содержанием в осеннее-зимний период органических соединений природного происхождения (до 30 мг O_2/дм^3). При предочистке известкованием-коагуляцией содержание органики снижается до 16 мгO_2/дм^3 и фильтрат после I ступени Na-катионирования имеет следующие показатели качества: pH = 10,2-10,4; $Ж_о$ = 0,05 мг-экв/дм^3; Cl^- = 16-20 мг/дм^3; $Щ_о$ = 0,7-1,0 мг-экв/дм^3; Fe = 500 мкг/дм^3; Ox = 16 мг O/дм^3.

Поэтому было принято решение об установке после I ступени Na-катионирования фильтров с анионитами-органопоглотителями.

Для выбора анионита фирмой «Байер» были предложены 3 высокоосновных анионита-органопоглотителя: Леватит VP OC 1074, Леватит S 6328 A и Леватит S 6368, технологическая характеристика которых приведена в таблице 1.

Методика испытаний была следующей: через колонки, загруженные анионитами, пропускался фильтрат I ступени Na-катионирования со скоростью 20 м/ч в первом этапе и 10 м/ч во втором этапе. В фильтратах после колонок определялись: pH, щелочность, перманганатная окисляемость, хлориды, железо.

Регенерация анионитов проводилась солещелочным раствором (10 % NaCl + 2 % NaOH). В регенерантах определялись окисляемость и содержание железа.

Таблица 1

Физико-химические свойства ионитов

Свойства	Иониты Леватит		
	VP OC 1074	S 6328 A	S 6368
Функциональная группа	четвертичный амин, тип 1	четвертичный амин, тип 1	четвертичный амин, тип 1
Матрица	А-ДВБ	С-ДВБ	С-ДВБ
Структура	МП	МП	МП
Внешний вид зерен	белые, непрозрачные	бежевые, непрозрачные	бежевые, непрозрачные
Ионная форма при поставке	Cl^-	Cl^-	SO_4^{2-}
$К_{одн}$, макс	1,8	1,6	–
W, %	66-72	58-63	58-68
ООЕ мин, моль-экв/дм^3	0,85	0,8	1,1
Рабочий диапазон pH	0-12	0-12	0-12

Полученные результаты представлены на рис. 1-6.

В течение фильтроциклов pH фильтратов при обеих скоростях ниже pH исходной воды (рис. 1).

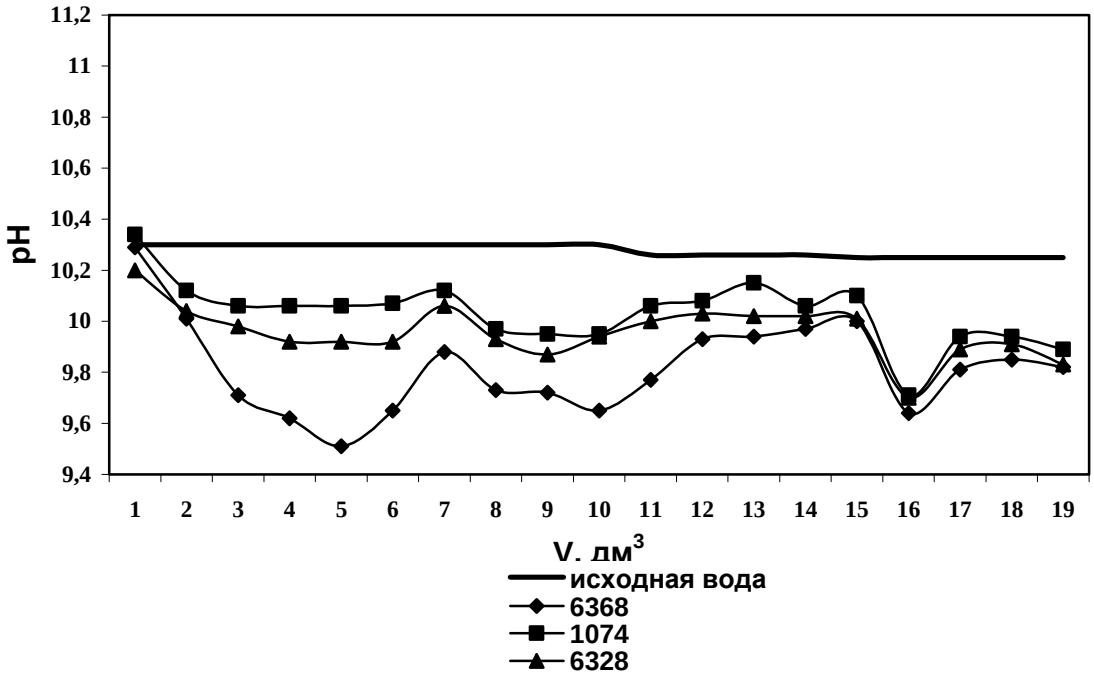


Рис. 1. Изменение pH фильтратов в течение 2-го фильтроцикла при скорости 20 м/ч

Щелочность фильтратов в обоих случаях ниже значения щелочности исходной воды (рис. 2).

Содержание хлорид-ионов в фильтратах выше, чем в Na-катионированной воде, и это свидетельствует о протекании процессов ионного обмена на ионитах (рис. 3).

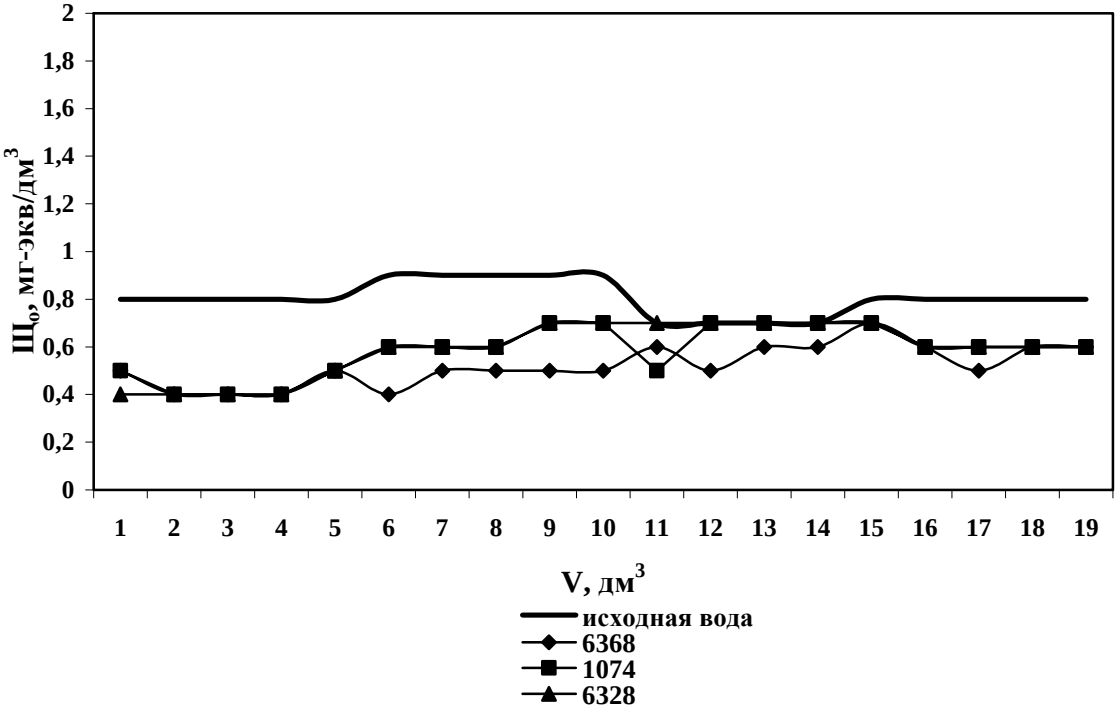


Рис. 2. Изменение $Щ_0$ фильтратов в течение 2-го фильтроцикла при скорости 20 м/ч

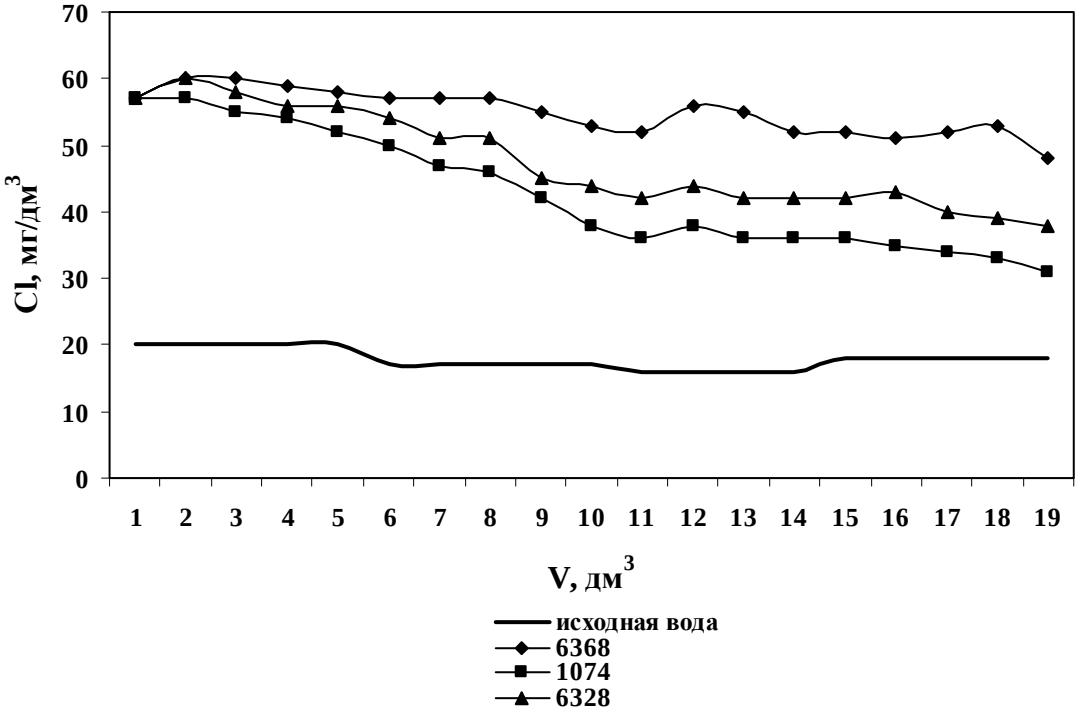


Рис. 3. Изменение содержания хлоридов в фильтрате в течение 2-го фильтроцикла при скорости 20 м/ч

Величина сорбции железа необъяснимо колеблется в течение обоих фильтроциклов (рис. 4).

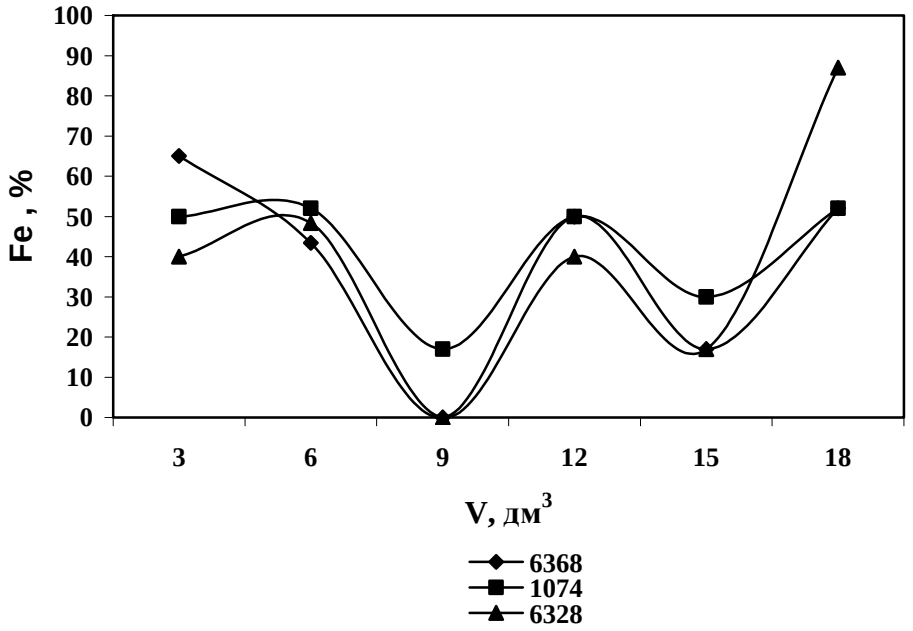


Рис. 4. Изменение содержания железа в фильтрате в течение 2-го фильтроцикла при скорости 20 м/ч

Окисляемость фильтратов в течение фильтроциклов зависела от скорости фильтрования и практически не зависела от вида ионита (рис. 5, 6). Снижение содержания органических соединений в фильтратах при скорости 20 м/ч составляло 70 % в начале фильтроцикла, а затем снижалось до 50 %, а при скорости 10 м/ч на протяжении всего фильтроцикла составило 80 %.

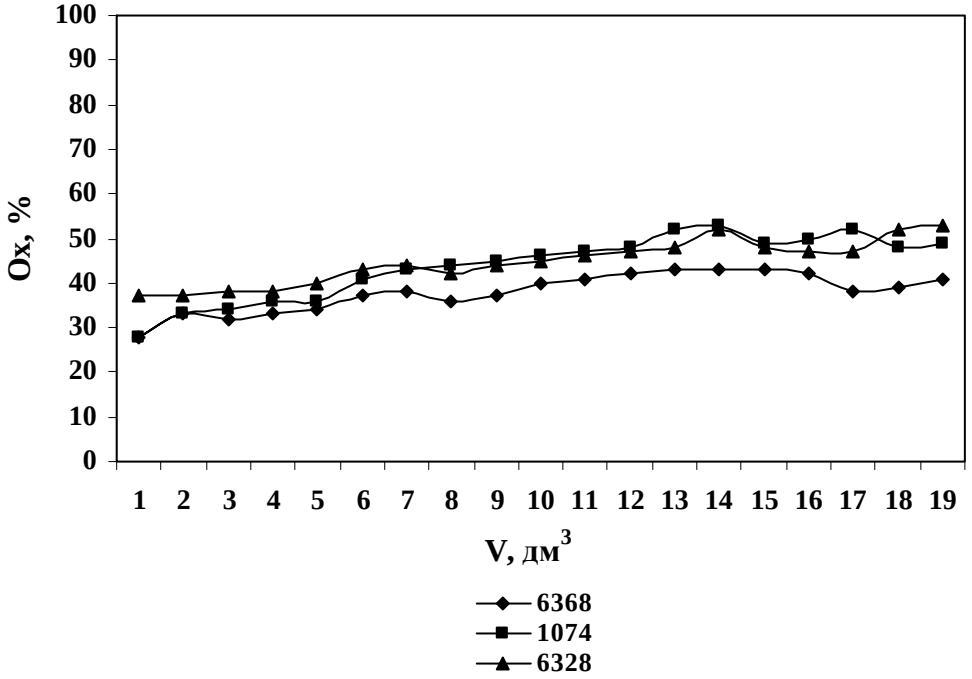


Рис. 5. Окисляемость фильтратов в течение 2-го фильтроцикла при скорости 20 м/ч

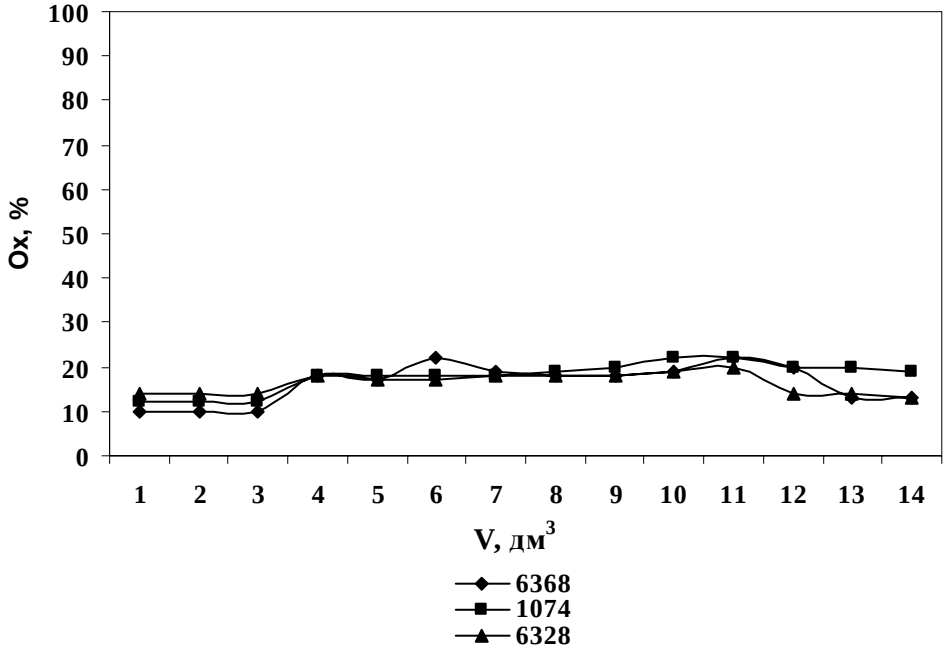


Рис. 6. Окисляемость фильтратов в течение 2-го фильтроцикла при скорости 10 м/ч

По данным регенерации рассчитывалась величина десорбции органических соединений (табл. 2).

Таблица 2

Десорбция органических соединений из ионитов при регенерации

Ионит	Десорбция, %	
	1 этап	2 этап
VP OC 1074	82	90
S 6328 A	69	65
S 6368	68	70

Железо в регенерантах не обнаруживалось.

МОДЕЛЬ ДИНАМИКИ ВОДЫ ПРИ АВАРИЙНОМ РЕЖИМЕ РАБОТЫ ПЛОТИНЫ ВОЛЖСКОЙ ГЭС

М.А. Еремин – канд. физ.-мат. наук, доцент
Волгоградского государственного университета
А.В. Хоперсков – д-р физ.-мат. наук, профессор
Волгоградского государственного университета

Для большого круга проблем эколого-экономического характера, связанных с существованием и использованием крупных речных водохранилищ, одной из ключевых является задача математического моделирования динамики воды в случае нештатных пропусков воды через плотину гидроэлектростанции.

Волжская ГЭС определяет гидрологический режим всей Волго-Ахтубинской поймы. Серьезные последствия возникают как при увеличении, так и при уменьшении стока. Например, в 2006 г. в пойме произошла экологическая катастрофа регионального масштаба, когда пересохли десятки проток и озер. В тяжелейшей ситуации оказались местные жители. В не меньшей степени экологическая ситуация в Волгоградском водохранилище (химико-биологические условия и характер распространения загрязнений) зависит от гидрологического режима ГЭС [1].

Численное моделирование динамики поверхностных вод на основе полных гидродинамических уравнений является эффективным методом теоретического исследования, все ближе приближаясь по своим возможностям к экспериментальным подходам, во многих случаях превосходя их. Особая привлекательность компьютерного моделирования связана с возможностью изучать последствия аварий, в том числе имеющие катастрофические последствия, например, разрушение плотины гидроузла.

Построим математическую нестационарную модель динамики воды, основываясь на обобщенных уравнениях мелкой воды (Сен-Венана) с использованием различных численных схем годуновского типа [2, 3]. Для глубины слоя воды h имеем:

$$\frac{\partial h}{\partial t}+\frac{\partial}{\partial x}(hx)+\frac{\partial}{\partial y}(h\upsilon)=0. \qquad (1)$$

Компоненты скорости u и υ описываются эволюционными уравнениями:

$$\frac{\partial}{\partial t}(hu)+\frac{\partial}{\partial x}\left(hu^2+\frac{1}{2}gh^2\right)+\frac{\partial}{\partial y}(hu\upsilon)=-\frac{1}{2}\lambda hu\sqrt{u^2+\upsilon^2}-gh\frac{\partial b}{\partial x}, \qquad (2)$$

$$\frac{\partial}{\partial t}(h\upsilon)+\frac{\partial}{\partial x}(h\upsilon u)+\frac{\partial}{\partial y}\left(h\upsilon^2+\frac{1}{2}gh^2\right)=-\frac{1}{2}\lambda h\upsilon\sqrt{u^2+\upsilon^2}-gh\frac{\partial b}{\partial y}. \qquad (3)$$

В уравнениях (2), (3) используются обозначения: g – ускорение свободного падения, λ – коэффициент гидравлического трения; b определяет рельеф твердой поверхности. Численное интегрирование системы уравнений (1)-(3) проводится для заданного рельефа поверхности $b(x, y)$ и известного (в общем случае нестационарного) режима работы гидрологических сооружений.

На рис. 1 приведен результат расчета последствий аварийного разрушения плотины Волжской ГЭС. Компьютерное моделирование позволяет проследить динамику распространения областей затопления, рассчитать поле скоростей в разные моменты времени (рис. 2) в рамках различных сценариев аварий и нештатных ситуаций на гидрологических сооружениях. Численные модели такого рода дают возможность исследовать и долговременную динамику воды на заданном неоднородном рельефе с учетом многих факторов взаимодействия потока с подстилающей поверхностью и атмосферой (ветровой

и температурный режимы, осадки, инфильтрация и др.) при наличии существенно нестационарных внешних условий.

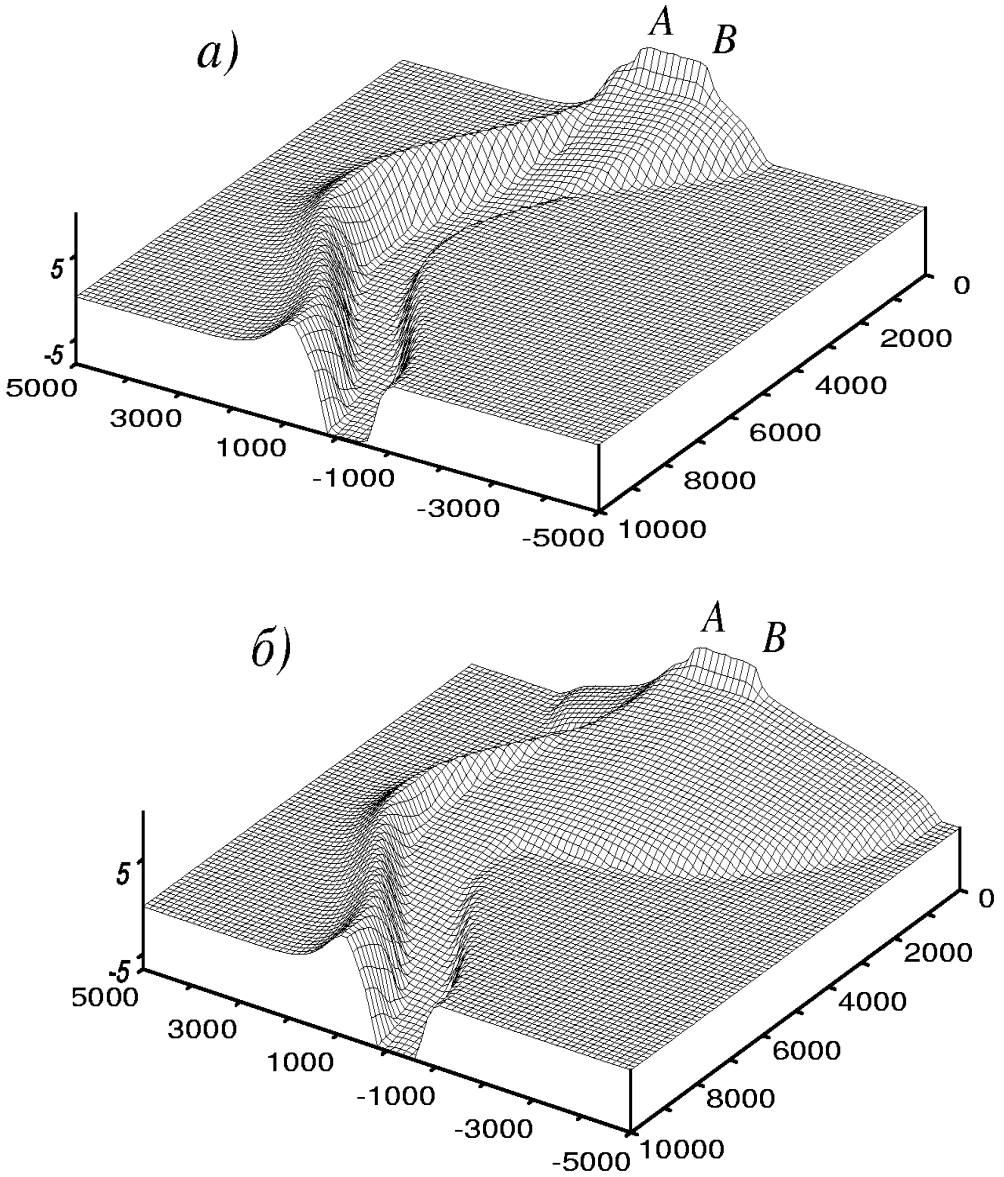


Рис. 1. Уровень воды в два разных момента времени:

а) t = 10 мин; *б*) t = 50 мин после начала моделирования. В момент времени t = 0 происходит быстрое разрушение гидроузла. Плотина находится между точками *A* и *B*. На правом по течению реки высоком берегу находится Волгоград. Числа указаны в метрах.

Компьютерные модели должны лежать в основе прогностической информационной системы, позволяющей проводить расчеты детальной динамики наводнений, подтоплений и последствий гидротехнических аварий для Нижней Волги и, в частности, для Волгоградской области.

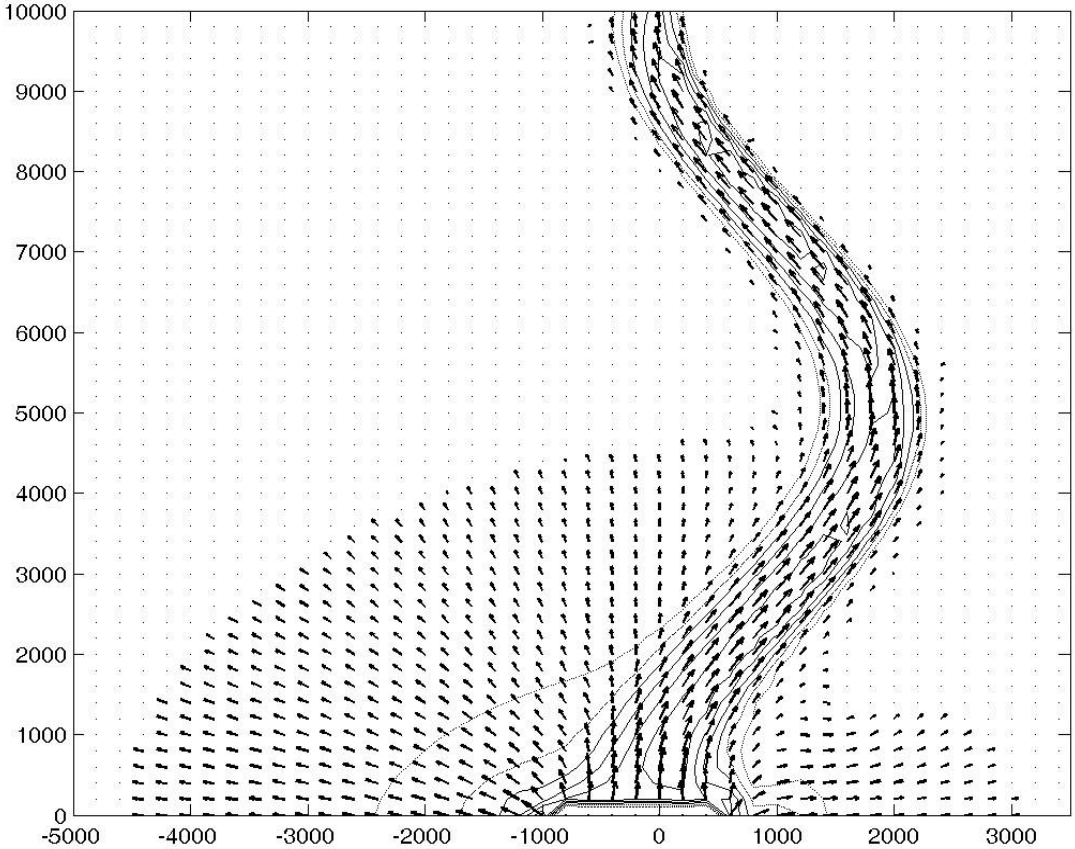


Рис. 2. Поле скоростей, соответствующее рис.1, *б*

Работа выполнена в рамках гранта РФФИ 07-05-96605.

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. *Смирнов Е.Д.*, *Хоперсков А.В.* Математическая модель распространения примесей во внутренних водоемах с учетом химико-биологических превращений. Поволжский экологический вестник. Вып. 5. – Волгоград: ВолГУ, 1998. – С. 168-171.

2. *Семенов А.Ю.* Применение метода Годунова к уравнениям теории мелкой воды с учетом рельефа дна. – М., 1983.

3. *Noelle S.*, *Pankratz N.*, *Puppo G.*, *Natvig J.R.* Well balanced finite volume schemes of arbitrary order of accuracy for shallow water flows. – Journal of Computational Physics. – 2003. – V. 213. 474-499.

КОНДИЦИОНЕР ПРЯМОГО ИСПАРИТЕЛЬНОГО ОХЛАЖДЕНИЯ

А.Д. Грига – канд. техн. наук, доцент
ВПИ (филиала) Волг ГТУ
А.В. Саразов – студент ВПИ (филиала) ВолгГТУ

В районах с сухим и жарким климатом рационально применять кондиционеры с испарительным охлаждением. В кондиционерах с испарительным охлаждением для обработки воздуха используется вода, испарение которой приводит к охлаждению и увлажнению обрабатываемого воздуха.

Данные кондиционеры обладают низкой себестоимостью, низкой материалоемкостью, простотой конструкции, надежностью. Из кондиционеров с испарительным охлаждением максимальной эффективностью обладают кондиционеры прямого испарительного охлаждения.

Несмотря на большое количество и разнообразие схем кондиционеров прямого испарительного охлаждения, многим из них свойственны недостатки: относительная сложность конструкции, большое сопротивление в проточной части кондиционера и т.д.

На кафедре механики ВПИ (филиала) Волг ГТУ разработана и испытана схема кондиционера прямого испарительного охлаждения без указанных выше недостатков (рис. 1).

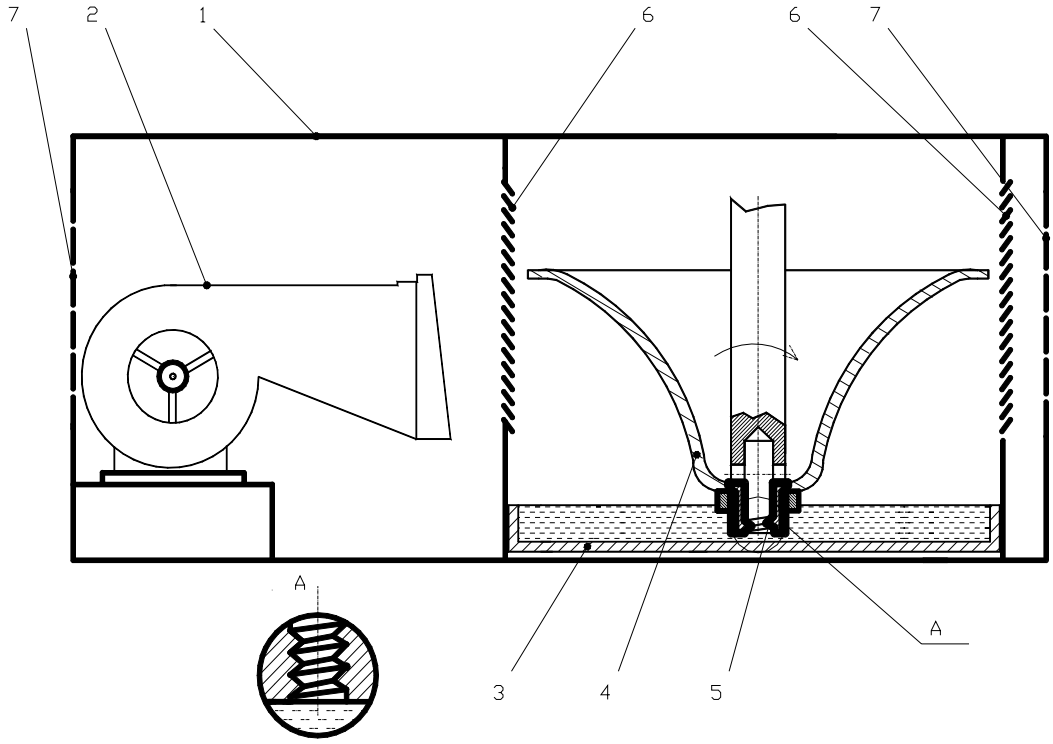


Рис. 1. Схема кондиционера прямого испарительного охлаждения с распылителем и импеллером

Кондиционер состоит из корпуса 1, вентилятора 2, поддона для воды 3, распылителя 4 с импеллером 5, каплеулавливающих решеток 6 и декоративных решеток 7.

На распылитель с импеллером получен патент РФ 2115486 МКИ 6 В 05 В 3/02, 3/12.

Воздух, подаваемый вентилятором 2, проходит через распыленную воду, в результате чего увлажняется и охлаждается. Импеллер 5 представляет собой многозаходную прямоугольную внутреннюю резьбу и служит для подачи воды в распылитель. Каплеулавливающие решетки предназначены препятствовать пневмопереносу капель воды из кондиционера.

На основании рекомендаций ГОСТ испытания кондиционера проводились при различных параметрах воздуха. Измерения параметров производились несколько раз (8-10) через каждые 10 минут с целью избежания влияния различного рода случайных факторов. За достоверное принималось среднее арифметическое значение измеряемых величин.

Испытания проводились на стенде, изготовленном в соответствии с рекомендациями ГОСТ 26963-86.

Схема стенда представлена на рис. 2.

Стенд состоит из расходомера (сопла Вентури) 1, камеры статического давления 2 с выпрямляющей решеткой 4 и отражателем 5 для выравнивания потока воздуха, подаваемого вентилятором 6 по воздуховоду 7. Регулирование расхода воздуха осуществлялось шибером 8 вручную.

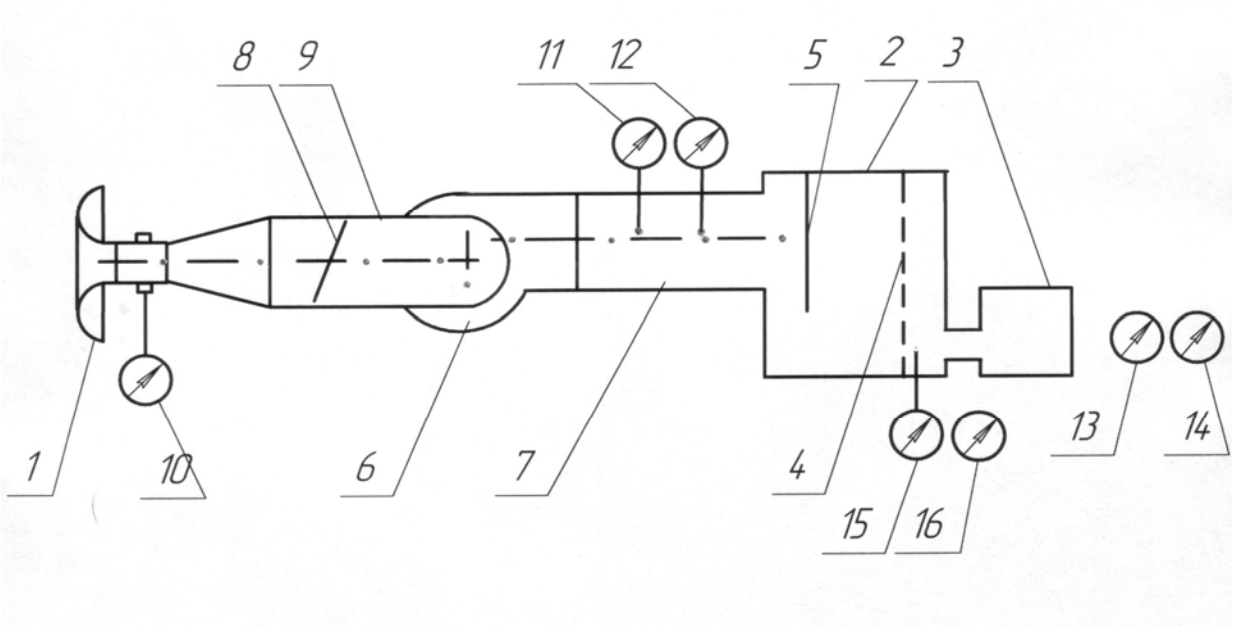


Рис. 2. Схема стенда для проведения испытаний:

1 – расходомер (сопло Вентури); 2 – камера статического давления; 3 – испытуемый кондиционер; 4 – капроновая сетка; 5 – отражатель; 6 – вентилятор; 7 – воздуховод; 8 – шибер регулирующий; 9 – воздуховод; 10 – дифференциальный манометр для измерения разности давлений в расходомере; 11, 12 – сухой и мокрый термометры для измерения температуры воздуха на входе в кондиционер; 13, 14 – сухой и мокрый термометры для измерения температуры воздуха на выходе из кондиционера; 15 – приемник статического давления, 16 – барометр для измерения атмосферного давления

Используемые приборы:

– микроманометр ММН-240 с трубкой Пито;

– мультиметры с пределом измерений (–50) ÷ (+50) ^{o}C и точностью измерения 0,5 ^{o}C;

– барометр-анероид с ценой деления 1мб;

– измеритель влажности и температуры ИВТМ-7;

– тахометр.

Воздух вентилятором нагнетается в камеру статического давления.

С помощью регулирующего шибера в камере создается нулевое статическое давление. В таком режиме измеряется динамическое давление воздуха в аэродинамической трубе.

В результате испытаний указанного кондиционера были получены зависимости влагосодержания воздуха от уровня воды в поддоне и частоты вращения распылителя (рис. 3, 4).

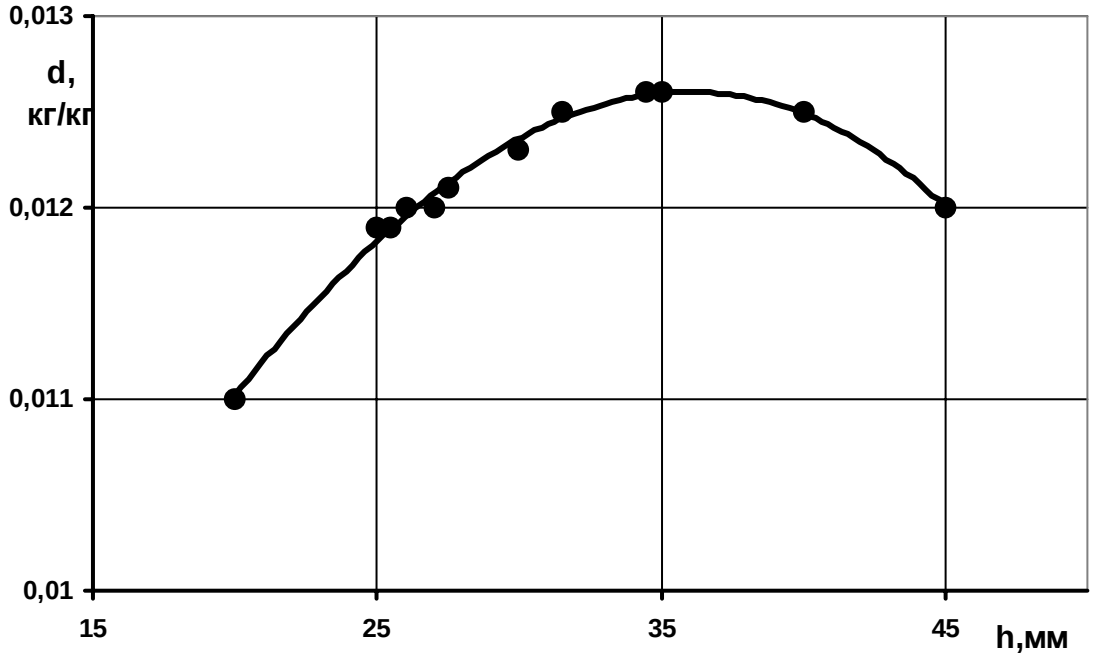


Рис. 3. Зависимость влагосодержания воздуха от уровня воды в поддоне при частоте вращения распылителя 750 об/мин

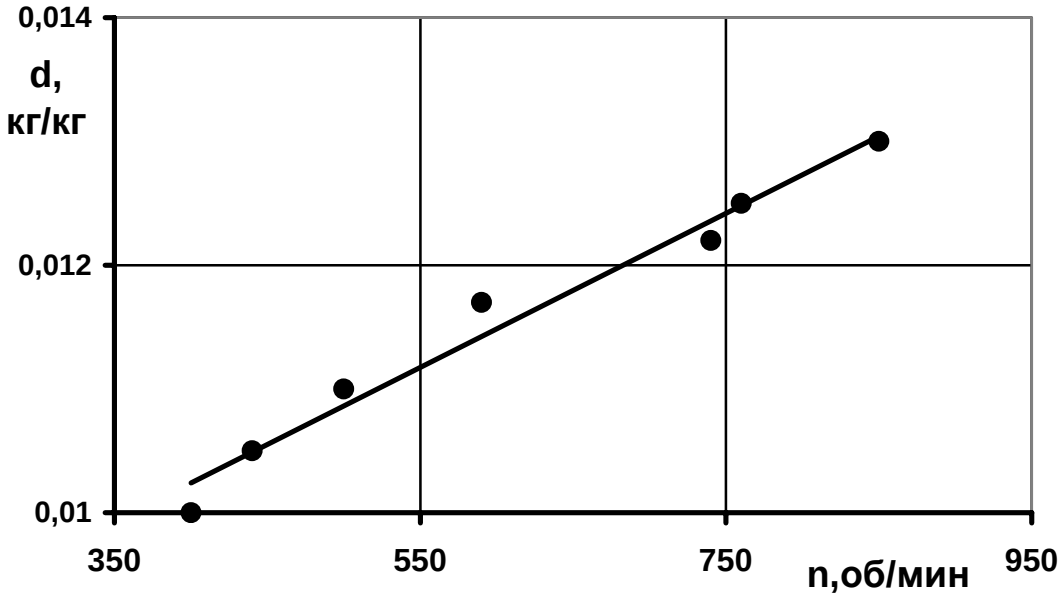


Рис. 4. Зависимость влагосодержания воздуха от частоты вращения распылителя при уровне воды в поддоне 35 мм

Характер зависимости, показанной на рис. 3, можно объяснить тем, что при увеличении уровня воды в поддоне распылитель «захлебывается», уменьшается дисперсность распыла, следовательно, уменьшается и влагосодержание обработанного воздуха, так как оно зависит от размера поверхности испарения.

Характер зависимости на рис. 4 объясняется тем, что при увеличении частоты вращения распылителя увеличивается дисперсность распыла, следовательно, увеличивается и влагосодержание обработанного воздуха.

В результате работы предложена и испытана новая схема кондиционера прямого испарительного охлаждения, содержащая распылитель с импеллером.

Вращающийся распылитель с импеллером можно также использовать в системах кондиционеров с источниками холода любого типа для обеспечения необходимой влажности воздуха.

Результаты исследования новой схемы позволяют оптимизировать работу кондиционера и выбрать оптимальные режимные и конструктивные параметры при проектировании новых кондиционеров на базе предлагаемой схемы.

ОЦЕНКА ВОЗДЕЙСТВИЯ РЕАГЕНТОВ ЭПМ НА МЕТАЛЛ ТРУБОК ТЕПЛООБМЕННЫХ АППАРАТОВ

С.Г. Тиханкина – инженер кафедры ТВТ
филиала «МЭИ (ТУ)» в г. Волжском
Л.К. Гончарова – канд. хим. наук, доцент
филиала «МЭИ (ТУ)» в г. Волжском

Для ведения комплексонного водно-химического режима теплоэнергетических систем промышленного и жилищно-коммунального назначения применяются комплексоны, содержащие фосфоновые группы. Такие реактивы выпускаются отечественной промышленностью как в виде химически индивидуальных веществ, так и в виде препаратов сложного состава, готовых к применению [1].

Основное отличие производных фосфоновой кислоты от других комплексонов состоит в том, что они не только химически связывают катионы щелочно-земельных металлов и железа в прочные комплексы, но и инактивизируют центры кристаллизации малорастворимых соединений, препятствуя образованию накипи даже при концентрации комплексона в десятки и сотни раз ниже стехиометрических. Фосфорорганические комплексоны безопасны для человека и других живых организмов в концентрациях, необходимых для ведения комплексонного водно-химического режима. Поэтому комплексонный водно-химический режим теплоэнергетических систем, основанный на использовании производных фосфоновой кислоты, является прогрессивным техническим решением. Он способен обеспечить надежную, безаварийную и экономичную работу теплоэнергетического оборудования и тепловых сетей.

Помимо использования комплексонов для предотвращения накипеобразования и коррозии, комплексоны и препараты на их основе применяются в теплоэнергетике для очистки оборудования и тепловых сетей от ранее образовавшихся отложений накипи и коррозии.

Отечественная химическая промышленность выпускает для применения в теплоэнергетике препараты на основе оксиэтилидендифосфоновой кислоты (ОЭДФ), нитрилотриметилфосфоновой кислоты (НТФ) и полиэтиленполиамино-N-метилфосфоновых кислот (ПАФ).

ОАО «Химпром» (г. Новочебоксарск) выпускает реагент «ОЭДФ-МА», назначение которого: химическая очистка, ингибитор накипеобразования в системах ГВС.

ООО «НПФ «Траверс» (г. Москва) выпускает реагенты «Аминат-ОД» и «Аминат-ОД-1», которые применяются как ингибиторы накипеобразования для растворения существующих отложений в мембранно-осмотических установках очистки воды и т.д. «ОЭДФ-Zn» – это ингибитор коррозии и накипеобразования в системах ГВС и парогенераторных установках.

ООО ИТЦ «Оргхим» (г. Казань) выпускает «Композицию ККФ» на основе ОЭДФ-Zn натрия.

ЗАО «НИИ ЭПМ» (г. Липецк) выпускает ряд реактивов под маркой «ЭПМ»:

• ЭПМ-12 – смесь фосфоросодержащих кислот, применяемых для ингибирования солеотложений в системах оборотного водоснабжения (СОВ) и отмывки теплообменного оборудования от отложений накипи;

• ЭПМ-14 – смесь фосфоросодержащих кислот, ингибитор коррозии и минеральных отложений в СОВ и ГВС;

• ЭПМ-53 – дикалиевая соль медного комплекса ОЭДФК, применяется в качестве бактерицидного средства в системах оборотного охлаждения.

Целью данной работы была оценка воздействия реагентов ЭПМ-12 [2], ЭПМ-14 [3] и ЭПМ-53 [4] на отложения и металл трубок из латуни ЛМЖцС 59-1-1, бывших длительное время в эксплуатации в теплообменнике. Внутренняя поверхность трубки была неравномерно покрыта слоем отложений желтоватого цвета, легко снимающихся механически и имеющих следующий состав:

$CaCO_3$ – 80,4 %,
Mg^{2+} – 5,5 %,
Fe – 1,4 %.

Методика исследований включала ежедневное (в течение 13 дней) выдерживание образцов трубки в течение 6-8 часов при перемешивании в растворах реагентов ЭПМ с t = 20-25 ^{o}C, промывание водой, высушивание при t = 100-105 ^{o}C, взвешивание.

Растворы реагентов имели следующий состав (см^3 реагента на 1 дм^3 водопроводной воды):

• ЭПМ-12 – 20 см^3;
• ЭПМ-14 – 50 см^3;
• ЭПМ-53 – 100 см^3.

Общая масса образцов трубки (по 3 образца для каждого реагента) составляла:

• для ЭПМ-12 – 23,6692 г;
• для ЭПМ-14 – 19,5401 г;
• для ЭПМ-53 – 21,9243 г.

Визуально наблюдалось растворение отложений с поверхности образцов. После высушивания образцы снова взвешивались, и рассчитывалась относительная потеря массы образцов.

Зависимости относительной потери массы образцов с течением времени обработки в растворах реагентов представлены на рис. 1.

Как видно из рис. 1, в растворах ЭПМ-12 основная часть отложений удаляется с поверхности образцов в течение 1-го дня обработки (кривая 1), в растворах ЭПМ-53 – в течение первых 2-х дней (кривая 2), а в растворах ЭПМ-14 изменение массы образцов было невелико даже в первые дни обработки (кривая 3).

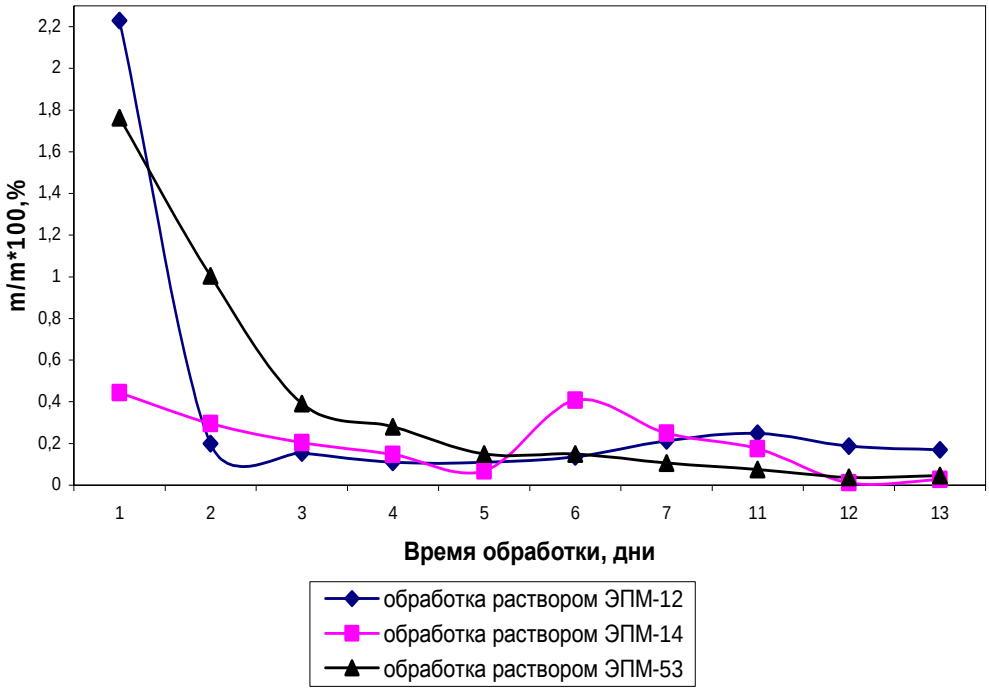


Рис. 1. Зависимость относительной потери массы образцов ($\frac{\Delta m}{m} \cdot 100$, %) от времени обработки

Суммарная (в г) и относительная (в % к массе образцов) потеря массы образцов за весь период обработки составили:

• в растворе ЭПМ-12 – 0,8812 г или 3,72 %;
• в растворе ЭПМ-14 – 0,3934 г или 2,01 %;
• в растворе ЭПМ-53 – 0,8660 г или 3,95 %.

Естественно, цифры по потере массы образцов относительны, так как поверхность образцов была покрыта отложениями неравномерно. Но по скорости

удаления отложений реагенты (при данном их содержании в растворе) можно расположить в следующей последовательности: ЭПМ-12 > ЭПМ-53 > ЭПМ-14.

Внешний вид внутренних поверхностей трубок после обработки также изменился:

• в растворе ЭПМ-12 – отложений нет, поверхность коричневого цвета;

• в растворе ЭПМ-14 – количество отложений уменьшилось, и цвет изменился на светло-серый;

• в растворе ЭПМ-53 – отложений нет, вся поверхность коричневого цвета.

Таким образом, в результате проведенных исследований получены следующие результаты обработки трубки растворами ЭПМ:

• ЭПМ-12 – отложения на поверхности трубки растворились полностью, а также образовалась защитная пленка;

• ЭПМ-14 – растворяется только часть отложений;

• ЭПМ-53 – отложения растворяются, но в течение большего времени, чем в ЭПМ-12 (причем концентрация ЭПМ-53 в 5 раз больше, чем ЭПМ-12).

Следовательно, в случае необходимости проведения обработки оборотной системы в режиме «отмывки на ходу» ранее образовавшихся отложений, более предпочтительным является применение реагента ЭПМ-12. Применение биоцидного препарата ЭПМ-53, предназначенного для подавления биологических обрастаний, также способствует удалению старых отложений.

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. *Чаусов Ф.Ф.*, *Раевская Г.А.* Комплексонный водно-химический режим теплоэнергетических систем низких параметров. Практическое руководство / Под ред. *С.М. Решетникова* и *М.А. Плетнева*. – Изд. 2-е, испр. и доп. – Москва – Ижевск: НИЦ «Регулярная и хаотическая динамика», 2003.

2. ТУ 2458-34666331-2000. Техническая характеристика реагента ЭПМ-12.

3. ТУ 2439-003-34666331-2000. Техническая характеристика реагента ЭПМ-14.

4. ТУ 2439-006-34666331-2000. Техническая характеристика реагента для ингибирования биообрастаний ЭПМ-53.

АНАЛИЗ ПОТРЕБЛЕНИЯ ЭНЕРГОРЕСУРСОВ ЖИТЕЛЯМИ ГОРОДА ВОЛЖСКОГО

Т.Р. Сулейманова – студентка
филиала «МЭИ (ТУ)» в г. Волжском
П.Д. Васильев – канд. техн. наук, доцент,
зав. кафедрой ЭОП филиала «МЭИ (ТУ) » в г. Волжском

ХОЛОДНОЕ ВОДОСНАБЖЕНИЕ

С августа по ноябрь 2004 года МУП «Водопроводно-канализационное хозяйство» города Волжского были проведены работы по определению фактического потребления холодной воды населением города Волжского.

Работы проводились для жилых зданий 2-х степеней благоустройства: I-ая степень благоустройства – здания, оборудованные водопроводом, канализацией и централизованным горячим водоснабжением; II-ая степень благоустройства – здания, оборудованные водопроводом, канализацией и газовыми водонагревателями. В выборку были включены здания, расположенные в различных районах города, отличающиеся этажностью, численностью населения, давлением воды на вводе, уровнем эксплуатации систем водоснабжения.

График, представленный на рисунке 1, является обобщенной характеристикой по объектам обеих степеней благоустройства.

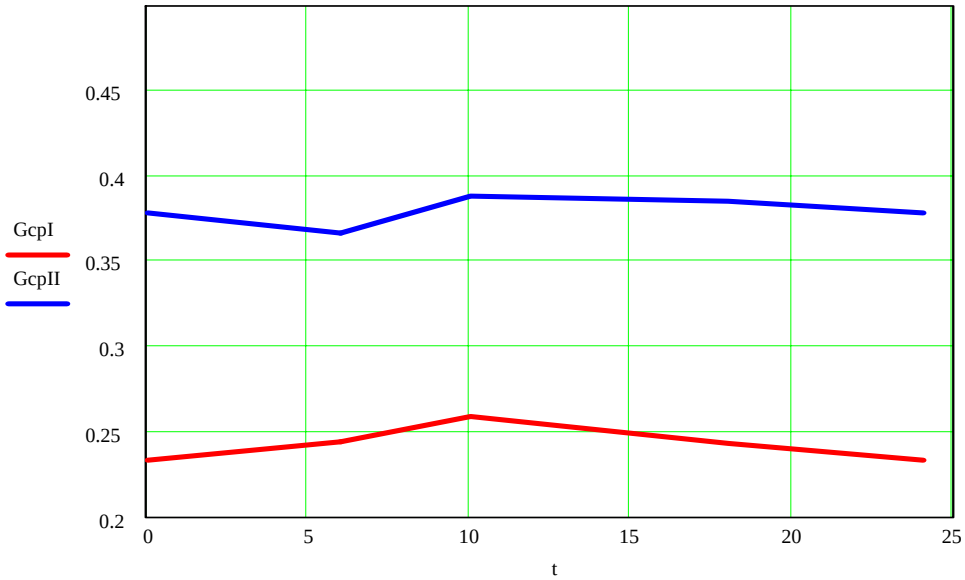


Рис. 1. Усредненные зависимости потребления холодной воды по объектам I-ой и II-ой степеней благоустройства:

GcpI – расход холодной воды по объектам I-ой степени благоустройства, л/(мин·чел);
GcpII – расход холодной воды по объектам II-ой степени благоустройства, л/(мин·чел)

В связи с утверждением Постановления Правительства РФ от 23 мая 2006 г. № 306 «Об утверждении Правил установления и определения нормативов потребления коммунальных услуг» были рассчитаны нормативы холодного водоснабжения для объектов I-ой и II-ой степеней благоустройства.

В норматив холодного водоснабжения включается расход воды, исходя из расчета расхода на 1 потребителя, необходимого для удовлетворения его физиологических, санитарно-гигиенических, хозяйственных потребностей и содержания общего имущества многоквартирного дома, с учетом требований к качеству соответствующих коммунальных услуг.

Результаты расчета нормативов потребления холодной воды представлены в таблице, где $\overline{Q}_{общ.}$ – средний фактический расход воды (л в сутки на 1 человека) на вводе в многоквартирный дом; $\overline{q}_{ночн.}$– средний удельный расход воды с 1 часа до 5 часов (л в час на 1 человека); b – коэффициент регрессии, который зависит от среднего фактического расхода воды на вводе

в многоквартирный дом; N_B – норматив холодного водоснабжения (м^3 в месяц на 1 человека); $\overline{Q}_n$ – средний расход воды (л в сутки на 1 человека) в многоквартирном доме.

Таблица

Результаты расчета нормативов потребления холодной воды

Степень благоустройства	$\overline{Q}_{общ.}$, л/(сут·чел)	$\overline{q}_{ночн.}$, л/(час·чел)	b	$\overline{Q}_n$, л/(сут·чел)	N_B, м^3/(мес·чел)
I	304,31	3,81	18,37	265,61	8,07
II	493,08	6,99	17,05	414,78	12,6

Данные результаты превосходят аналогичные, по которым ведется взаиморасчет потребителей с водоснабжающей организацией: по I-ой степени благоустройства норма водопотребления выше действующей в 1,52 раза, по II-ой – в 2 раза.

ГОРЯЧЕЕ ВОДОСНАБЖЕНИЕ И ПОТРЕБЛЕНИЕ ЭЛЕКТРОЭНЕРГИИ

Для проведения эксперимента по замеру количества потребляемой горячей воды и электроэнергии жилищным фондом города совместно с управлением ЖКХ, ЖЭУ, МЭС г. Волжского была проведена масштабная работа по подбору квартир. Работа проводилась в два этапа. На первом – подбирался список квартир по данным паспортных столов ЖЭУ, на втором – выезд по адресам, интервьюирование и экспертная оценка достоверности данных по квартирам и жильцам.

У потребителей были установлены измерители расхода горячей воды.

В ходе выполнения работы было проведено предварительное статистическое исследование социального состава и уровня обеспеченности горячим водоснабжением и электроэнергией отдельных групп населения города. В ходе предварительного обследования количество факторов, определяющих энергопотребление, было ограничено конкретно складывающейся обстановкой по фактической возможности установки приборов учета. Такими факторами оказались:

– способ подключения;
– этажность здания;
– наличие малолетних детей;
– преимущественный пол проживающих.

На рисунке 2 представлена характеристика, соответствующая типовому потребителю. На графике достаточно четко прослеживается сезонный характер потребления горячей воды с заметным влиянием социального фактора.

Так, повышение величин расходов горячей воды в период с апреля по июнь, вероятно, связано с климатическими особенностями региона. В этот период происходит резкое повышение температуры окружающего воздуха, что заставляет потенциальных потребителей рассматриваемой услуги чаще

пользоваться душем и ванной, а также прибегать к стирке белья. Некоторый спад потребления горячей воды в конце лета связан, по всей видимости, с периодом массовых каникул и отпусков и разгаром дачного сезона. Это подтверждается возрастанием водопотребления в сентябре, то есть к концу периодов каникул и отпусков, а также завершением интенсивных работ на садовых участках.

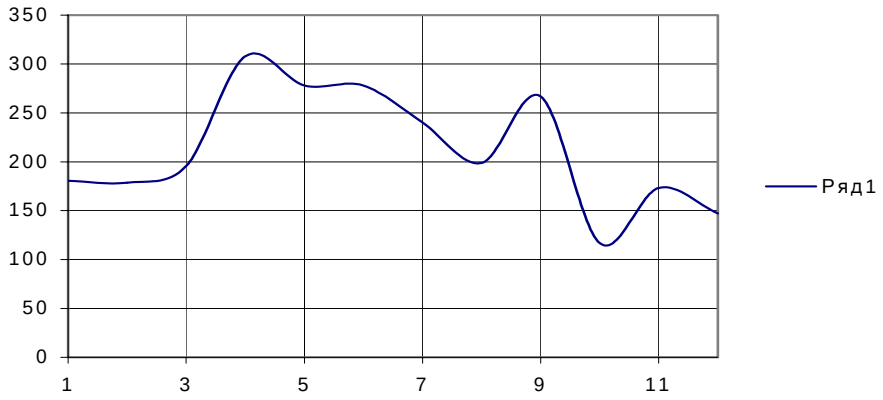


Рис. 2. График зависимости потребления горячей воды абонентом по месяцам за период с января по декабрь 2002 года

Проведенный анализ результатов предварительных экспериментов показывает, что принятые к рассмотрению факторы оказывают влияние на исследуемую величину. Влияние этих факторов существенно, но зависимости в значительной степени оказываются достаточно сложными и не всегда однозначными.

На рисунке 3 представлена графическая зависимость среднесуточного потребления горячей воды по месяцам, на рисунке 4 – среднесуточное потребление электроэнергии по тому же объекту исследования.

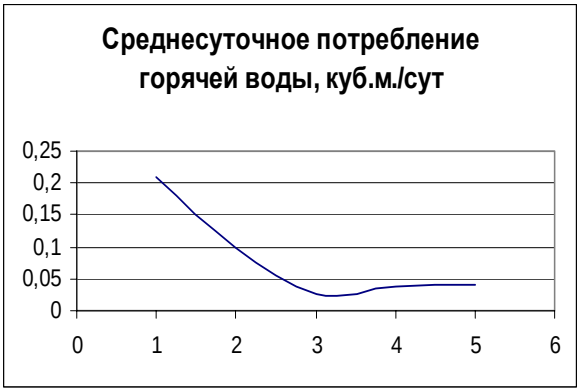


Рис. 3. График потребления горячей воды по месяцам с апреля по август 2004 г.

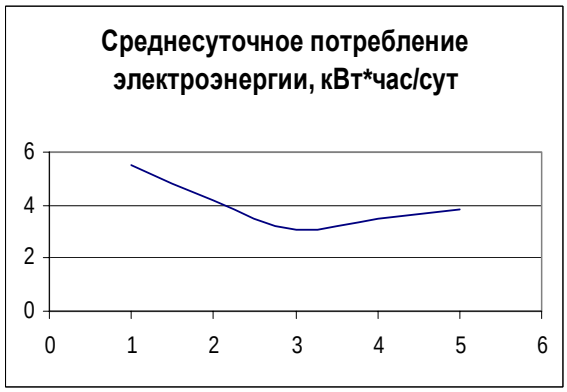


Рис. 4. График потребления электроэнергии по месяцам с апреля по август 2004 г.

Как видно из графиков, зависимости потребления энергоресурсов по одному исследуемому объекту имеют аналогичный характер.

КРУГЛЫЙ СТОЛ

КОНЦЕПЦИЯ ПОДГОТОВКИ КАДРОВ ДЛЯ ЭНЕРГОГЕНЕРИРУЮЩИХ И ЭНЕРГОПОТРЕБЛЯЮЩИХ ПРЕДПРИЯТИЙ ЮЖНОГО РЕГИОНА

В.С. Кузеванов – д-р техн. наук, профессор,
директор филиала «МЭИ (ТУ)» в г. Волжском

1. ПРИЕМ НА ОБУЧЕНИЕ В ФИЛИАЛЕ

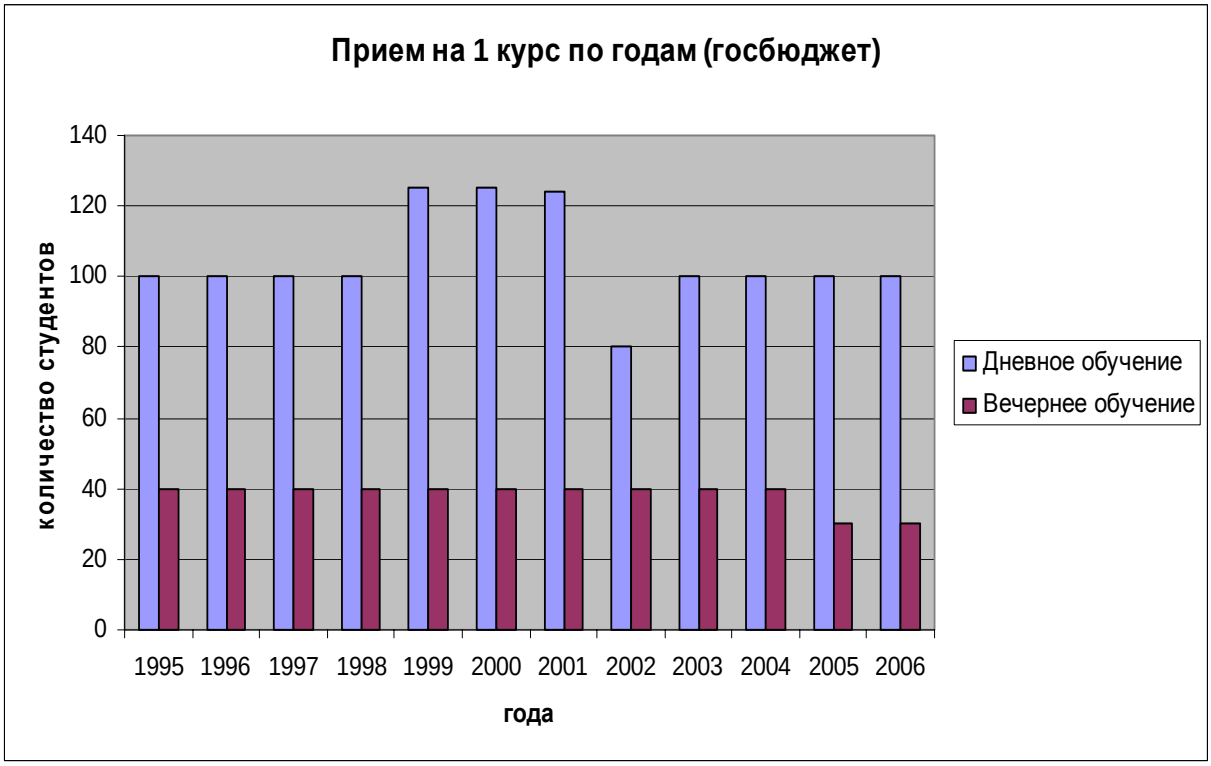
Особенностью приема на обучение за счет государственного бюджета является стабилизация контрольных цифр приема на значении 100 человек по дневной форме и 30 человек по вечерней форме обучения.

Соответствующие данные представлены в таблице 1 и гистограмме, отражающей динамику приема в 1995-2006 годы.

Таблица 1

Прием на 1 курс по годам (госбюджет)

Год	1995	1996	1997	1998	1999	2000	2001	2002	2003	2004	2005	2006
Дневное обучение	100	100	100	100	125	125	124	80	100	100	100	100
Вечернее обучение	40	40	40	40	40	40	40	40	40	40	30	30



При этом на обучение до 2005 года включительно был прием по пяти

специальностям очной (дневной) формы:

- Тепловые электрические станции (ТЭС);
- Технология воды и топлива на тепловых и атомных станциях (ТВТ);
- Промышленная теплоэнергетика (ПТЭ);
- Энергообеспечение предприятий (ЭОП);
- Автоматизация технологических процессов и производств (теплоэнергетика) (АТП),

и двум специальностям очно-заочной (вечерней) формы:

- Тепловые электрические станции (ТЭС);
- Автоматизация технологических процессов и производств (теплоэнергетика) (АТП).

В 2006 году лицензирована новая специальность электроэнергетического направления – Электроэнергетические системы и сети, прием на которую производится с этого же 2006 года.

Прием студентов с возмещением затрат на обучение (договорная основа) отражен в таблице 2 и прилагаемой к ней гистограмме. Здесь аналогично можно говорить об определенной стабилизации контингента студентов-платников по приему на уровне 50 человек по дневной форме и 20 человек по вечерней форме обучения.

Таблица 2

Прием на 1 курс по годам (договорная основа)

Год	1995	1996	1997	1998	1999	2000	2001	2002	2003	2004	2005	2006
Дневное обучение	0	5	11	11	17	41	47	0	83	46	50	50
Вечернее обучение	0	1	15	7	26	32	24	22	23	12	20	20

При таком приеме филиал в ближайшие годы сохранит приведенную

численность контингента студентов очной и очно-заочной форм обучения на уровне 700-730 человек.

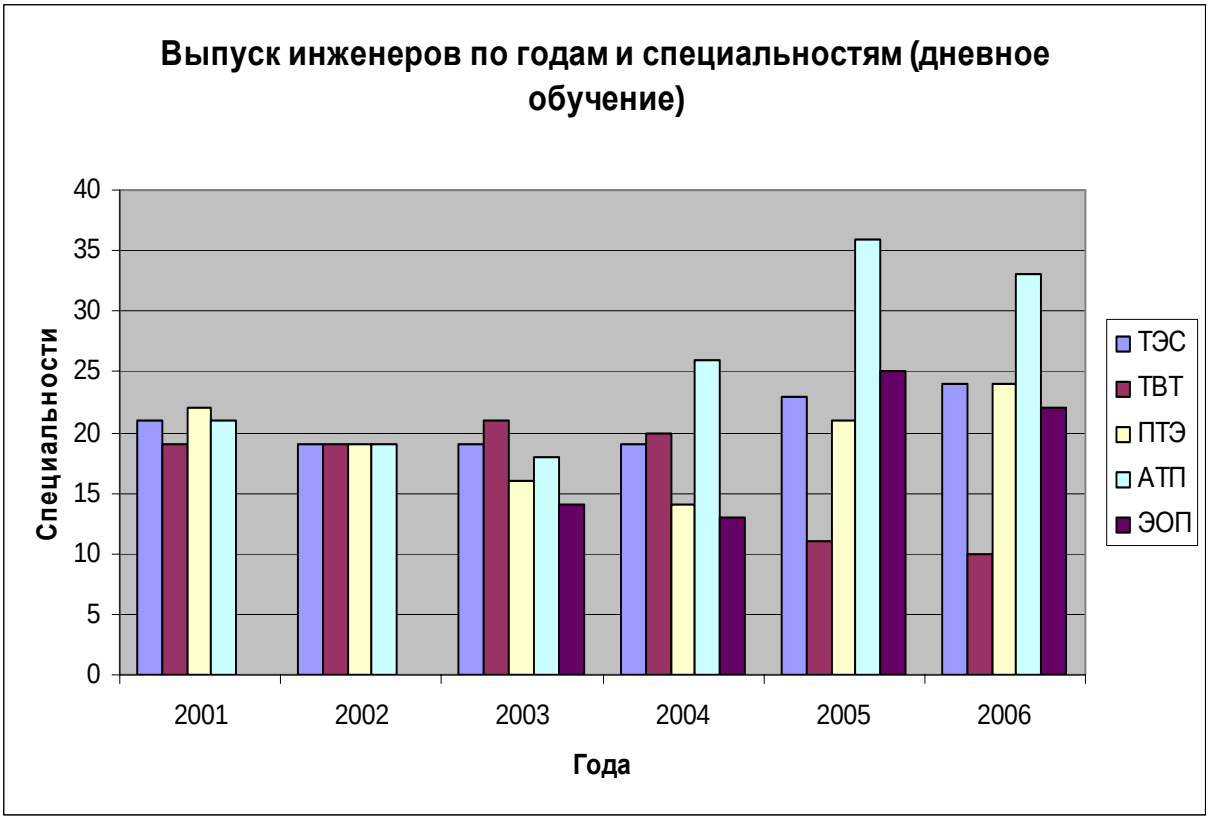
2. ВЫПУСК ИНЖЕНЕРОВ

В таблице 3 и соответствующей этой таблице гистограмме показана динамика выпуска по каждой специальности дневной формы обучения. Отметим, что в 2001 и 2002 годах выпуска по специальности «Энергообеспечение предприятий» не было, поскольку прием на эту специальность был начат в 1997 году. С 1999 года был уменьшен прием по специальности «Технология воды и топлива на тепловых и атомных электрических станциях» (1/2 группы, 12-13 человек), что сказалось с 2005 года на выпуске инженеров по этой специальности.

Таблица 3

Выпуск инженеров по годам и специальностям (дневное отделение)

Год	2001	2002	2003	2004	2005	2006
ТЭС	21	19	19	19	23	24
ТВТ	19	19	21	20	11	10
ПТЭ	22	19	16	14	21	24
АТП	21	19	18	26	36	33
ЭОП	0	0	14	13	25	22
Всего	83	76	88	92	116	113



Общей тенденцией по выпуску инженеров очной (дневной) формы обу-

чения является относительно большой выпуск по одной специальности, что объясняется повышенной востребованностью специальности «Автоматизация технологических процессов и производств» со стороны абитуриентов (точнее, их родителей) и связанным с этим дополнительным к контрольным цифрам (госзаказу) приемом на договорную основу.

Выпуск инженеров по двум специальностям очно-заочной (вечерней) формы обучения отражен в таблице 4 и гистограмме. Количество выпускников составляет 15-20 человек по каждой специальности. Других значимых показателей нет.

Таблица 4

Выпуск инженеров по годам и специальностям (вечернее отделение)

Год	2001	2002	2003	2004	2005	2006
ТЭС	0	17	17	25	21	19
ТВТ	0	0	0	0	0	0
ПТЭ	0	0	0	0	0	0
АТП	0	12	17	20	18	17
ЭОП	0	0	0	0	0	0
Всего	0	29	34	45	39	36

3 ТРУДОУСТРОЙСТВО ВЫПУСКНИКОВ

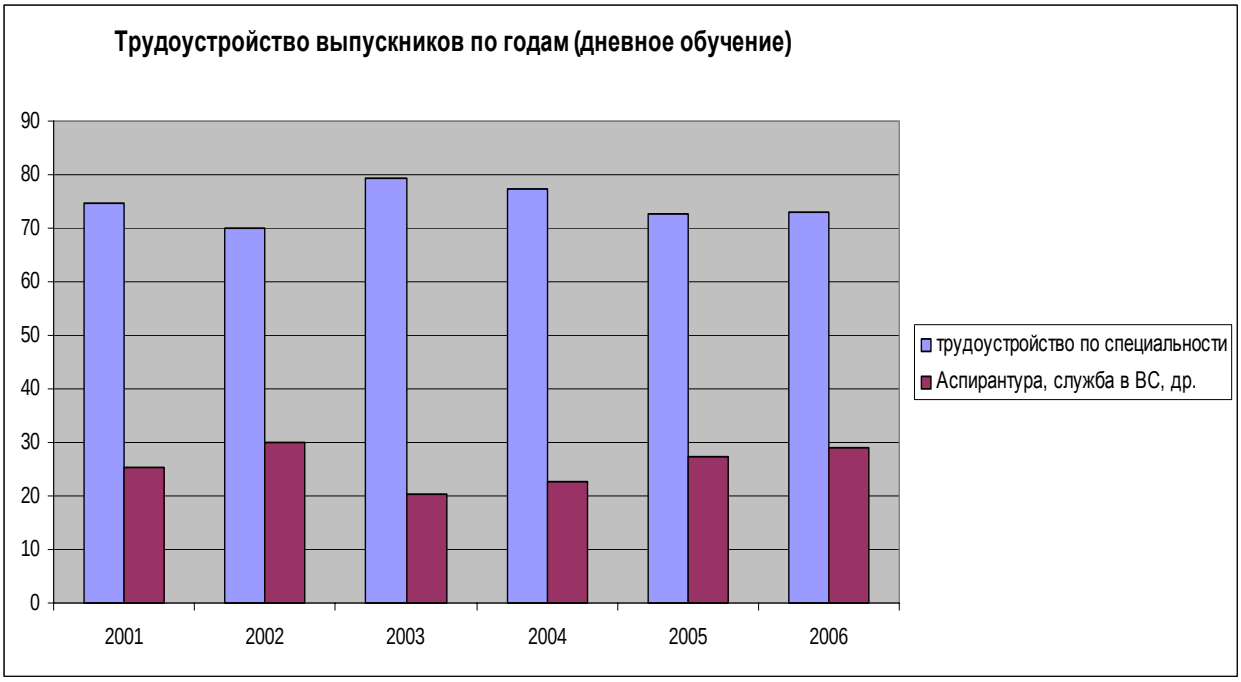
Важным элементом, отражающим роль ВУЗа в регионе, выступает трудоустройство выпускников. Определяющим фактором при этом является устройство на работу по полученной в ВУЗе специальности. Таблица 5 и соответствующая гистограмма показывают трудоустройство выпускников филиала, завершивших обучение по дневной форме.

Устойчивая востребованность инженеров по полученной в филиале МЭИ специальности говорит о повышенном внимании производственных предприятий к кадрам энергетической отрасли.

Таблица 5

Трудоустройство выпускников по годам (дневное отделение), %

Год	2001	2002	2003	2004	2005	2006
По специальности	74,7	69,9	79,5	77,2	72,8	73,1
Аспирантура, служба в ВС, отпуск по уходу за ребенком, трудоустройство не по специальности	25,3	30,1	20,5	22,8	27,2	28,9
Всего	100	100	100	100	100	100



Детализация с отражением некоторых особенностей территориального расположения выпускников показана в таблице 6.

Таблица 6

Сведения о территориальном распределении выпускников филиала ГОУВПО «МЭИ (ТУ)» в г. Волжском (очная форма обучения)

Год выпуска	2004	2005	2006
1	2	3	4
Всего выпускников	92	117	113
Трудоустроены по специальности			
Волгоградская обл., чел	67	81	67
г. Волжский	60	72	64
г. Волгоград	4	7	3
Ленинский р-н	1	1	

Окончание таблицы 6

1	2	3	4
Алексеевский р-н	2	1	
Другие регионы, чел	6	4	14
г. Морозовск		1	
Мурманская обл.	1	1	
Ленинградская обл.		1	2
Вологодская обл.			1
Аспирантура	5	1	11
Трудоустрены по личной инициативе на непрофильные предприятия (организации)			
Волгоградская обл., чел	9	18	21
Другие регионы, чел	3	7	4

4 КОНКУРС ПО ФИЛИАЛУ

Согласно правилам приема в Московский энергетический институт (технический университет) при приеме в филиал в г. Волжском конкурс проводится по филиалу в целом, то есть без учета, какую из специальностей выбирает абитуриент для последующего обучения. Показатели такого конкурса стабильны и укладываются в основном диапазоне 2,5-3,5 по количеству заявлений на одно госбюджетное место. Данные по конкурсу, начиная с 1995 года, приведены в таблице 7 и гистограмме по годам до 2006 года включительно.

Таблица 7

Конкурс по филиалу по годам (госбюджет)

Год	1995	1996	1997	1998	1999	2000	2001	2002	2003	2004	2005	2006
Заявлений на место	1,42	1,54	2,44	3,3	3,58	2,84	2,54	3,325	2,75	2,52	3,35	2,9

Таблица 8 отражает примечательный факт распространения информации о филиале в другие регионы, а, следовательно, и его усиливающегося влияния на кадровую межрегиональную политику.

Таблица 8

Сведения о студентах, поступивших в филиал ГОУВПО «МЭИ (ТУ)» в г. Волжском в 2004-2006 г.г. (очная форма обучения)

Год приема	**2004**	**2005**	**2006**
1	**2**	**3**	**4**
Всего поступили, чел.	147	130	125
в том числе			
на гос. бюджет	100	100	100
на платной основе	47	30	25
Место жительства до поступления в институт			
Волгоградская обл., всего	137	124	116
в том числе			
Волгоград	13	8	18
Волжский	89	102	77
Суровикинский р-н			1
Среднеахтубинский р-н	4		4
Старополтавский р-н			1
Урюпинский р-н	5	1	3
Руднянский р-н	1		1
Жирновский р-н	5	2	2
Ленинский р-н	4	1	1
Даниловский р-н			1
Быковский р-н			1
Камышинский р-н		2	2
Новониколаевский р-н			2
Дубовский р-н		1	1
Николаевский р-н	2	1	1
Кикивидзенский р-н	1		
Чернышковский р-н	1		
Еланский р-н	1		
Алексеевский р-н	2		
Нехаевский р-н	2		
Краснослободский р-н	2		
Иловлинский р-н	2		
Фроловский р-н	2	2	
Калачевский р-н	1	1	
Новоаннинский р-н		1	
Палласовский р-н		2	
Калужская обл.			1
Астраханская обл.			1
Саратовская обл.	1		1
Краснодарский край	2		1
Тюменская обл.	2		
Владимирская обл.	1		

Окончание таблицы 8

1	2	3	4
Ростовская обл.		2	1
Ленинабадская обл.		1	
Магаданская обл.		1	
Воронежская обл.	1		
Оренбургская обл.			1
Респ. Саха			1
Северная Осетия		1	
Респ. Таджикистан	1		
Казахстан		1	
Башкортостан			1
Узбекистан			1

КОНЦЕПЦИЯ ЭНЕРГОСНАБЖЕНИЯ ПОТРЕБИТЕЛЕЙ г. ВОЛЖСКОГО (на уровне нагрузок 2017 г.)

П.П. Раменский – управляющий директор
Волгоградского филиала ОАО «ЮГК-ТГК-8»,
А.А. Хараим – д-р техн. наук,
профессор «МЭИ (ТУ)»

Производство электроэнергии на тепловом потреблении всегда даёт экономию топливных ресурсов по сравнению с эквивалентным раздельным производством, использующим органическое топливо. Потреблять электроэнергию в месте её производства – экономить на платежах предприятиям региональных и межрегиональных электрических сетей.

Из рис. 1 видно, что за пятилетний период тарифы, как зеркало себестоимости производства электроэнергии, выросли более чем в 2 с половиной раза.

Рис. 1. Динамика себестоимости производства электроэнергии

Аналогичный рост наблюдается и с тарифами на тепловую энергию (рис. 2). Поэтому спонтанный переход на автономное теплоснабжение промышленных и городских потребителей, целенаправленный перевод системы теплоснабжения города на автономные источники, а также модернизация системы теплоснабжения без изменения сферы действия ТЭЦ – утопия.

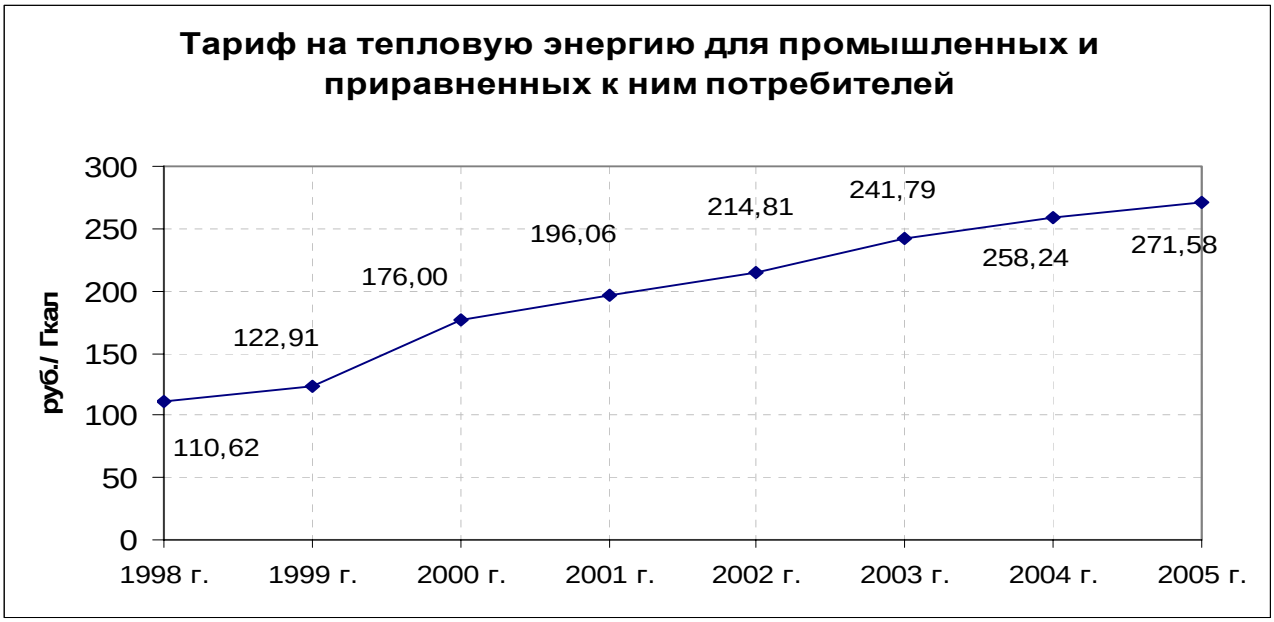


Рис. 2. Динамика себестоимости тепловой энергии

Есть ли выход из этой тупиковой ситуации?

Да, есть комплекс мероприятий, реализация которых может вывести энергетику из кризисной ситуации.

Это, в первую очередь:

– наладка теплосети города;

– установка бойлеров на ТЭЦ-2;

– установка ПГУ на ТЭЦ-1;

– мероприятия по увеличению нагрузки ТЭЦ без модернизации оборудования ТЭЦ;

– расширение теплосети в восточной части города;

– строительство тепловой магистрали через Волгу в Волгоград;

– увеличение нагрузки ТЭЦ с учётом их модернизации;

– наладка теплосети, установка бойлеров на ТЭЦ-2 и расширение теплосети в восточной части города;

– установка турбин противодавления с низким входом на ТЭЦ-2;

– строительство магистрали в Волгоград и установка ПГУ на ТЭЦ-1.

Стремиться к подсоединению нынешних автономщиков путём снижения тарифа на тепло имеет смысл только при условии действия комбинированных поставок, то есть в условиях отнесения на этих потребителей только топливной составляющей прироста производства тепла плюс электроэнергии на тепловом потреблении.

Перспектива прироста потребности в тепле покрывается нынешней установленной мощностью ТЭЦ. Однако резерв тепловой мощности грозит уменьшиться до минимума к 2017 году за счёт истечения паркового ресурса. Кроме того, не обойтись без инвестиций в наладку теплосети (перераспределение нагрузок между ТЭЦ) и в реконструкцию ТЭЦ-2 (бойлеры, а ещё лучше – противодавленческие турбины). Это связано с тем, что к 2017 году дефицит тепловой мощности в зоне ТЭЦ-1 достигнет 670 Гкал/ч.

Строительство магистрали в Волгоград без модернизации ТЭЦ-1 неэффективно (ведёт к повышению тарифа).

Наиболее эффективной (с точки зрения будущих тарифов) является схема одновременной реконструкции ТЭЦ-1, ТЭЦ-2 и реализации расширения тепловой сети, но этот эффект достижим при условии, что существует возможность увеличить поставки лимитного газа в Волжский на 690 тыс. нм^3 в год. Граничным условием реализации этого проекта является возможность финансирования на уровне 4,5 млрд. руб. Если же ориентироваться в дополнительном расходе топлива на мазут, то наиболее эффективным является проект проведения наладки теплосети, установки бойлеров на ТЭЦ-2 и расширения теплосети в восточной части города. Тогда объём инвестиций составит 65 800 тыс. руб.

Эффективность этих мероприятий можно проиллюстрировать с помощью диаграммы (рис. 3), из которой видно, что при общей тенденции к снижению себестоимости тепловой энергии с увеличением объема инвестиций в эту отрасль тарифы на электроэнергию будут падать примерно теми же темпами, что и снижение себестоимости тепла.

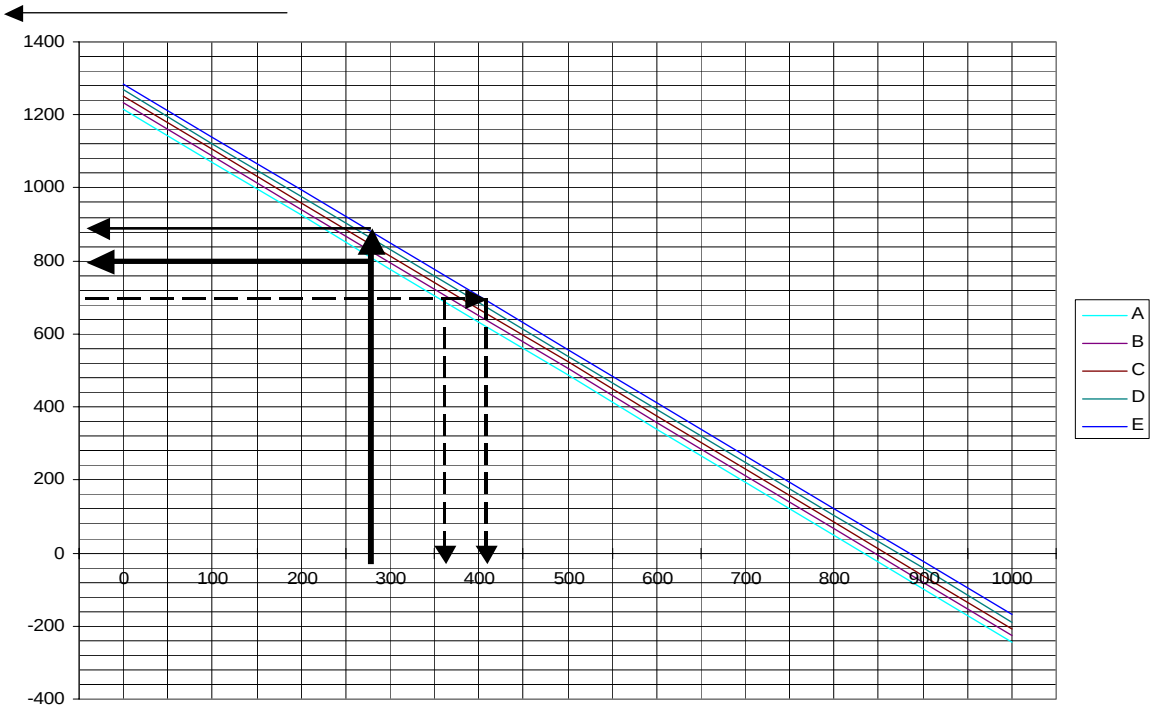


Рис. 3. Зеркало инвестиций

При реализации инвестиций, связанных с наращиванием подсоединённой нагрузки к ТЭЦ, необходимо рассматривать топливный баланс. Прежде чем рассматривать распределение зон действия ТЭЦ, необходим энергоаудит тепловых сетей. Нельзя подходить половинчато к «автономизации» городских районов – это чревато колоссальными потерями для тех, кто остаётся. При реализации проектов полного задействования возможностей ТЭЦ нужно чётко определять источники финансирования. Необходимо инициировать законодательный процесс по признанию комбинированного производства особым видом деятельности и особым порядком регулирования. Необходимо проводить разъяснительную работу среди потребителей тепла (обучающие семинары) во избежание ошибок, подобных тем, что сделал ЗОС. Следует продумать вопрос о резервировании тепловых мощностей у отдельных потребителей.

ПЕРСПЕКТИВЫ ВНЕДРЕНИЯ ИНТЕЛЛЕКТУАЛЬНЫХ ИЗМЕРИТЕЛЬНЫХ СИСТЕМ И ВИРТУАЛЬНЫХ ПРИБОРОВ НА ИХ ОСНОВЕ В ПРОМЫШЛЕННОСТЬ ЮЖНОГО РЕГИОНА

В.Л. Гаврилов – генеральный директор
ОАО «Электронно-вычислительная техника»
В.П. Шевчук – д-р техн. наук, профессор
филиала «МЭИ (ТУ)» в г. Волжском

В настоящее время разработано достаточно большое количество информационно-измерительных систем, которые представляют собой виртуальные приборы. При этом измерительная информационная система – это совокупность средств измерений (мер, измерительных приборов, измерительных преобразователей и пр.) и вспомогательных устройств (ЭВМ, АЦП и др.), соединенных между собой каналами связи и объединенных пакетом прикладных программ (ППП) в единую управляющую систему, основное назначение которой – визуализация в реальном масштабе времени процесса измерения, то есть функций вторичного прибора. Таким образом, виртуальный прибор – это управляющая система, выполняющая функции вторичного прибора. Наличие в измерительной системе вычислительной техники делает возможным не только хранение информации, но и применение алгоритмов идентификации, теории искусственного интеллекта, адаптации, а также алгоритмов обучения и организации структуры измерительной системы для обработки прямых измерений. Всё это придает процессу измерения признаки интеллектуальной измерительной системы [1], основной особенностью которых является косвенное измерение обобщенного параметра (себестоимость, КПД, количество тепла, степень насыщения и т.д.) по результатам прямых и косвенных измерений отдельных технологических параметров. Схемы обработки измерительной информации, применяемые в интеллектуальных измерительных системах, требуют разбиения всего программного обеспечения на *измерительное* и *обслуживающее*.

Измерительное обеспечение функционирует в составе контроллера и предназначено для первичной обработки измерительной информации и реализации уравнений измерения. Обслуживающее обеспечение сосредоточено в ЭВМ большой мощности и предназначено для визуализации потоков информации, считываемой из контроллера (рис. 1).

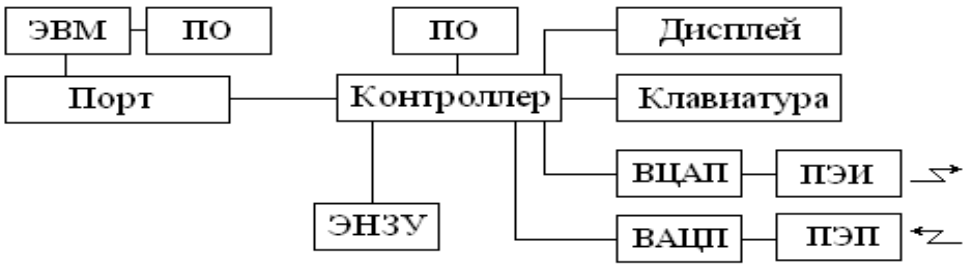


Рис. 1. Структурная схема виртуального прибора

ЭВМ здесь исполняет роль вторичного прибора в измерительной системе и не подлежит метрологической аттестации. Все алгоритмы обработки измерительной информации, включая уравнение измерения, производятся в первичном преобразователе, реализованном на микроконтроллере и, следовательно, подлежат метрологической аттестации.

В настоящее время проходит стадию технологической подготовки производства первичный преобразователь для измерения обобщенных показателей (КПД, эффективность работы агрегата, счетчик тепла и т.д.), в уравнение измерения которого входит до четырех прямо измеренных сигналов. В качестве примера приведем три из них, которые могут быть применены в различных отраслях промышленности. Так, например, *виртуальный прибор по измерению количества потреблённого тепла* имеет четыре измерительных канала, соединенных уравнением измерения (1) и программным обеспечением контроллера в единую систему измерения:

$$Y(t) = G_1(t) \cdot T_1(t) \cdot c_p - G_2(t) \cdot T_2(t) \cdot c_p . \qquad (1)$$

В уравнении (1) $G_1(t)$, $T_1(t)$ – расход и температура прямого теплоносителя; $G_2(t)$, $T_2(t)$ – расход обратного теплоносителя. Программное обеспечение ЭВМ большой мощности при этом ориентировано на визуализацию выходного параметра уравнения измерения $Y(t)$ в реальном масштабе времени (рис. 2).

В химической промышленности очень распространен массообменный процесс – абсорбция, эффективность которого оценивается по *степени насыщения абсорбента*. Виртуальный прибор для этой цели реализует уравнение измерения следующего вида:

$$Y(t) = \frac{C_2(t) - \int C_1(t-\tau) \cdot h_{12}(\tau) \cdot d\tau}{C_{2m} - \int C_1(t-\tau) \cdot h_{12}(\tau) \cdot d\tau} .$$

Здесь $C_1(t)$, $C_2(t)$ – соответственно, концентрации поглощаемого вещества в тощем и насыщенном абсорбенте; C_{2m}, $h_{12}(t)$ – параметры математической модели абсорбера. Визуализация текущей степени насыщения имеет тот же вид, что и на рис. 2 [2].

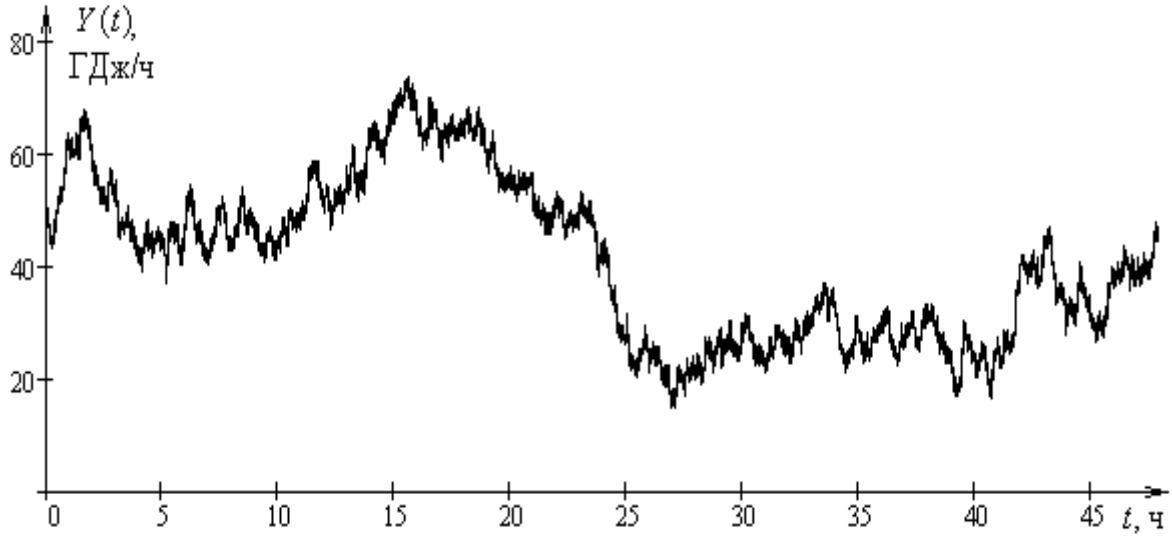


Рис. 2. Количество потребленного тепла 24-х домов 23 микрорайона г. Волжского в период пуска отопления 2005 г. (17-18 октября)

В энергетической отрасли широко распространен процесс получения электроэнергии в паровых турбинах, где вспомогательным оборудованием является котлоагрегат. При этом эффективность работы котлоагрегата может быть оценена виртуальным прибором по соотношению:

$$Y(t) = \frac{G_1(t) \cdot T_1(t)}{\int G_2(t-\tau) \cdot h_{21}(\tau) \cdot d\tau \cdot \int G_3(t-\mu) \cdot h_{31}(\mu) \cdot d\mu}.$$

Здесь $G_1(t)$, $G_2(t)$, $G_3(t)$ – соответственно, расход перегретого пара, расход топлива и расход воды; $T_1(t)$ – температура перегретого пара; $h_{21}(t)$ и $h_{31}(t)$ – соответствующие динамические характеристики котлоагрегата.

После изготовления опытного образца первичного преобразователя и исследования работоспособности алгоритмического обеспечения планируется выставить его на метрологическую аттестацию. В случае положительного решения комитета по техническому регулированию предприятия получат возможность приобретать первичный преобразователь по цене сотового телефона.

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. *В.П. Шевчук*, *А.П. Желтоногов* и др. Метрология интеллектуальных измерительных систем. – Волгоград: ИПК «Политехник», 2005. – 242 с.

2. *В.П. Шевчук*, *В.Н. Загребин*, *Д.А. Качегин*. Система управления процессом абсорбции по степени насыщения. – Приборы и системы. Управление. Контроль // Диагностика. – № 7. – 2006. – Стр. 1-8.

СОДЕРЖАНИЕ

Введение…….. 3

Пленарные доклады

Шилин А.Н., Дубина Ю.А., Иванников С.А. Анализ методов и средств передачи информации в энергетике..... 5

Яковлев А.А. Алгоритм формирования технических решений энергоустановок….. 10

Хомицкий С.В. Концепция построения автоматизированной системы управления технологическими процессами (АСУ ТП) на подстанциях ОАО «МОЭСК»…….. 14

Секция № 1
Теплоэнергетика

Болонова Е.А. Эргономика информационного обеспечения оператора энергоблока ТЭЦ..... 30

Болонов В.О. Учет особенностей режимов работы энергоблоков ПГУ при решении задачи оптимизации работы ТЭЦ..... 34

Цыпулев Д.Ю. Постановка задачи оптимизации работы ТЭЦ с оптимизацией режимных параметров энергоблоков в условиях переменных графиков энергопотребления..... 38

Ларин Б.М., Еремина Н.А., Тихомирова Ю.Ю. Диагностика нарушений ВХР барабанных котлов СВД..... 42

Козлов Д.А., Ящук В.М. Повышение эффективности вакуумсоздающих систем теплоэнергетических установок..... 48

Кузеванов В.С., Грошев Н.А., Филюшкин А.С. Разработка алгоритма управления котельным агрегатом по эффективности его работы..... 52

Грязнов И.Е. Опыт изучения языков МЭК 61131-3 в вузе на примере использования пакета CoDeSys фирмы 3S..... 56

Секция № 2
Электроэнергетика и электротехника

Капля Е.В., Мироненко К.Б. Применение методов градиентного и случайного поиска для ориентации солнечной батареи..... 60

Исаев А.В. Повышение энергетических показателей технологического оборудования с управляемыми электроприводами..... 63

Капля Е.В., Круглов А.В. Функциональная зависимость силы взаимодействия двух соосных кольцевых проводников с током от радиусов и расстояния……..... 68

Хоперскова Л.В. Условия возникновения радиационной неустойчивости в столбе электрической дуги..... 72

Бибин Е.А., Хромов Н.П., Малюк С.П., Коваленко А.В. Диагностика и мониторинг работоспособности электрических сетей..... 76

Шилин А.Н., Крутякова О.А. Анализ численных методов расчета динамических цепей..... 79

Коптелов Е.В., Коптелова И.А. Системный анализ методов промышленного технологического нагрева..... 84

Шилин А.Н., Черных Д.А. Анализ динамических характеристик электромеханических систем..... 88

Заярный В.П., Иванников С.А. Проблемы определения места повреждения проводов в линиях электропередачи..... 92

Шилин А.Н., Макартичян С.В. Расчет электрических цепей с источниками стохастических сигналов..... 95

Кисляков Ю.В., Ульев В.П., Чудинов М.И., Щербакова М.А. Программно-информационный комплекс моделирования и отображения однолинейных схем подстанций..... 98

Кисляков Ю.В., Кольцов Д.В., Щербакова М.А. Подход к разработке схем сечений между подстанциями, станциями, сетями и потребителями субъектов ОРЭ для центров обработки данных АИИС КУЭ.....104

Васильев П.Д., Ветлицын Ю.А. Проблемы внедрения преобразователей частоты для электропривода насосов в жилищно-коммунальном хозяйстве на примере МУП «Водоканал».....108

Арванитаки Н.В., Васильев П.Д., Васильева И.Л. Добровольная сертификация специалистов в области энергосбережения..... 113

Сикидин В.В. Анализ причин возникновения высших гармоник в электроустановках сетей общего назначения и их влияние на качество электроэнергии..... 115

Быкадоров Д.А., Васильев П.Д. Энергоснабжение удаленных локальных потребителей……124

Секция № 3

Автоматизированные системы управления

Шевчук В.П., Капля В.И., Моргунов С.В., Баранов А.Е., Катаев Р.В. Метод интеллектуальной измерительной системы параметров живой рыбы.....128

Еремин Д.В. Исследования алгоритма управления расхода общего воздуха с коррекцией по кислороду парового барабанного котла..... 135

Качегин Д.А., Болдырев И.А., Загребин В.Н. Система стабилизации степени насыщения абсорбента..... 141

Агринская С.А., Забровская О.С. Исследование алгоритмов управления процессом получения акролеина на стадии дистилляции.....144

Гудкова Е.Н., Кириенко Е.Н., Мазин Г.С. Экспертная система диагностики технического состояния приборов..... 148

Качегин Д.А., Загребин В.Н., Болдырев И.А. Виртуальный прибор для измерения степени насыщения абсорбента..... 151

Зеленский Ф.Б., Солодовников А.С. Разработка проекта экстремальной системы регулирования соотношения «газ-воздух» печи выдержки блюмов.....153

Шевчук В.П., Мясникова Ю.С. Исследование системы термостатирования формующего инструмента для изготовления изделий из полимерных материалов.... 158

Секция № 4

Моделирование объектов энергетики

Коровина Е.В. Виртуальный прибор для измерения, учета и контроля количества потребленной тепловой энергии..... 161

Шевчук В.П., Капля Е.В., Пронкина Ю.Е., Матыченко М.А. Моделирование распространения акустических волн в образце с плоской трещиной..... 165

Матыченко М.А., Райлян С.М., Шевчук В.П. Моделирование измерительного канала виртуального прибора для контроля качества сварных соединений..... 171

Адаменко А.Н., Шевчук В.П. Алгоритм измерения диаметра в трубном производстве……175

Шершеков М.И., Капля Е.В. Определение эффективности работы гидроагрегата..... 181

Шамигулов П.В. Решение задачи о максимальном быстродействии для линейных объектов произвольного порядка.....185

Пронкина Ю.Е. Исследование алгоритмов контроля качества сварных швов.... 192

Мокичева Ю.В. Имитационное моделирование АСР параметров контролируемой атмосферы на основе разностных уравнений.....193

Шоричев А.В. Гидромеханическая модель взаимодействия сферических объектов в жидкости……... 198

Секция № 5

Информационные технологии в энергетике и образовании

Гудкова Е.Н., Кириенко Е.Н., Осипов П.В. Информационные потоки в базе знаний автоматизированного рабочего места метролога..... 218

Секачёв В.А. Программное обеспечение для структурного проектирования сложных информационно-измерительных систем…… 221

Рыбанов А.А., Макаров А.А. Модель тезаурусного представления знаний для экспертно-познавательных систем.....224

Поляков А.С., Васильев П.Д. Виртуальный лабораторный практикум в энергетическом образовании – за и против..... 228

Камышин Ю.В. Информационные потоки при проведении энергоаудита предприятий..... 230

Староверов В.В., Староверова Л.В. Построение пространственных изображений энергетических объектов.....234

Грошев А.И., Гриценко А.Н., Староверов В.В. Математическое моделирование технологического процесса холодильной станции промышленного предприятия..... 238

Секция № 6

Эколого-энергетическая безопасность

Гвоздков А.Н., Коптелов Е.В. Метод повышения энергетической эффективности систем кондиционирования и вентиляции.....245

Стребкова Н.А., Гончарова Л.К., Морозова Л.Н. Особенности выбора анионита – органопоглотителя для водоподготовки..... 248

Еремин М.А., Хоперсков А.В. Модель динамики воды при аварийном режиме работы плотины Волжской ГЭС..... 252

Грига А.Д., Саразов А.В. Кондиционер прямого испарительного охлаждения……..255

Тиханкина С.Г., Гончарова Л.К. Оценка воздействия реагентов ЭПМ на металл трубок теплообменных аппаратов..... 259

Сулейманова Т.Р., Васильев П.Д. Анализ потребления энергоресурсов жителями города Волжского……. 262

Круглый стол

Кузеванов В.С. Концепция подготовки кадров для энергогенерирующих и энергопотребляющих предприятий Южного региона……. 266

Раменский П.П., Хараим А.А. Концепция энергоснабжения потребителей г. Волжского (на уровне нагрузок 2017 г.)..... 273

Гаврилов В.Л., Шевчук В.П. Перспективы внедрения интеллектуальных измерительных систем и виртуальных приборов на их основе в промышленность Южного региона..... 276

РЕСУРСО-ЭНЕРГОСБЕРЕЖЕНИЕ
И ЭКОЛОГО-ЭНЕРГЕТИЧЕСКАЯ
БЕЗОПАСНОСТЬ ПРОМЫШЛЕННЫХ ГОРОДОВ

ВСЕРОССИЙСКАЯ
НАУЧНО-ПРАКТИЧЕСКАЯ КОНФЕРЕНЦИЯ

г. Волжский
26 – 28 сентября 2006 года

Сборник научных статей

Ответственный за выпуск *Коровина Е.В.*

Редакторы *Халдеева Г.П.*
Юрина В.В.

Подписано в печать 26.03.2007. Формат $60\times90_{1/16}$.
Печать ризографическая. Усл. печ. л. 17,7.
Тираж 100 экз. Заказ № 265.

Издатель Филиал ГОУ ВПО «МЭИ (ТУ)» в г. Волжском
404110, г. Волжский, пр. Ленина, 69.
Отпечатано Филиал ГОУ ВПО «МЭИ (ТУ)» в г. Волжском
404110, г. Волжский, пр. Ленина, 69.