

Министерство образования и науки Российской Федерации

Государственное образовательное учреждение
высшего профессионального образования
«Ивановский государственный энергетический университет
имени В.И. Ленина»

НПО «Санкт-Петербургская электротехническая компания»

V ЮБИЛЕЙНАЯ ВСЕРОССИЙСКАЯ
НАУЧНО-ПРАКТИЧЕСКАЯ КОНФЕРЕНЦИЯ

80-летию ИГЭУ посвящается

ПОВЫШЕНИЕ ЭФФЕКТИВНОСТИ ЭНЕРГЕТИЧЕСКОГО ОБОРУДОВАНИЯ

**МАТЕРИАЛЫ КОНФЕРЕНЦИИ
1 – 2 ноября 2010 г.**

*Под редакцией профессора, доктора технических наук
А.В. Мошкарина*



Иваново

2010

УДК 621.311.621.438

ПОВЫШЕНИЕ ЭФФЕКТИВНОСТИ ЭНЕРГЕТИЧЕСКОГО ОБОРУДОВАНИЯ // V Всерос. науч.-практ. конф.: 1–2 нояб. 2010 г. Материалы конференции. / Под ред. А.В. Мошкарина. – Иваново: ГОУ ВПО Ивановский государ. энергетический университет, 2010. – 376 с.

В материалах конференции отражены доклады, представленные специалистами ведущих исследовательских организаций, тепловых электростанций, энергетических систем и университетских центров по результатам их исследований в области тепло- и электроэнергетики. Тематика материалов охватывает широкий круг тепло- и электротехнических вопросов, связанных с инновациями в производстве, распределении и потреблении тепловой и электрической энергии, на тепловых электрических станциях, в водоподготовке и водных режимах ТЭС, в системах автоматизации и контроля, а также в разработке программных средств подготовки оперативного персонала.

Редакционный совет

Мошкарин А.В. (д.т.н., проф., председатель), Ларин Б.М. (д.т.н., проф.), Демин А.М. (к.т.н., доц.), Созинов В.П. (д.т.н., проф.), Мурзин А.Ю. (к.т.н., доц.), Козюлина Е.В. (к.т.н., доц.), Ключина С.В. (нач. УИУНЛ).

Секция «Автоматизация технологических процессов на ТЭС и АЭС»

Председатель секции: к.т.н., доц. Таланов В.Д.

Секретарь: к.т.н., доц. Демин А.М.

А.В. Кондрашин, к.т.н., проф. (ИГЭУ)

СОСТОЯНИЕ И ПЕРСПЕКТИВЫ ВНЕДРЕНИЯ АСУ ТП НА ТЕПЛОВЫХ ЭЛЕКТРОСТАНЦИЯХ

Технико-экономическая обусловленность эффекта от внедрения автоматизированных систем управления связана с возможностью влияния качества управления на основные составляющие технологической эффективности, указанные в табл. 1.

Таблица 1. Основные составляющие технико-экономического эффекта от внедрения АСУ ТП

Наименование	Производимый эффект	Результативность
Экономичность	Повышение КПД теплового цикла (η , %)	Снижение удельных расходов топлива на производство электрической и тепловой энергии
Маневренность	Расширение регулировочного диапазона нагрузок агрегатов (Δ , %)	Увеличение конкурентной способности на оптовом рынке энергии
Надёжность	Снижение интенсивности потока отказов основного оборудования (λ , 1/год)	Снижение затрат на незапланированный пуск и восстановительный ремонт а также снижение штрафа за недоотпуск энергии потребителю
Долговечность	1. Расширение межремонтного периода технологического оборудования (τ , лет) 2. Увеличение срока полезного использования оборудования	Снижение текущих затрат на плановый ремонт и капитальных вложений на модернизацию и замену оборудования

Для иллюстрации возможного эффекта приведём результаты анализа, выполненного для энергетических предприятий ОАО «Газпром энергохолдинга» (ТГК-1, ТГК-3, ОГК-2, ОГК-6). Наличие в этом перечне ТЭЦ и ГРЭС, различие в мощностях и их территориальная распределённость достаточно хорошо отражают общий характер всей энергетики России.

В расчётах учитывался текущий (фактический) уровень оснащённости ТЭЦ и ГРЭС средствами автоматизации теплоэнергетическим оборудованием, оценивалось их соответствие современным возможностям. Учитывались и коэффициенты использования установленной тепловой и электрической мощности.

В табл. 2 показан объём оснащения предприятий современными АСУ ТП. Наряду с полномасштабными АСУ ТП учитывались и функционально ограниченные АСУ ТП (подсистемы АСУ ТП). С целью общей оценки последние были приведены к размерности полномасштабных с учётом условных весовых коэффициентов функциональной значимости.

Таблица 2. Степень оснащённости оборудования АСУ ТП

Тип оборудования	Тип АСУ ТП		Общий процент внедрений
	Полномасштабные	Функционально ограниченные	
Блоки мощностью 300 МВт и более	20 %	30 %	50 %
Блоки мощностью 150÷200 МВт	5 %	8 %	13 %
Другое оборудование		Менее 5 %	Менее 5 %

В табл. 3 представлены итоговые результаты¹. Общий недоиспользуемый эффект составляет около 2 миллиардов рублей в год (при установленной электрической мощности 32,8 ГВт и 53,32 Ткал/ч).

Таблица 3. Общий недоиспользованный экономический эффект от возможной модернизации и внедрения АСУ ТП, млн. руб./год

Предприятия	От повышения экономичности при производстве энергии		От повышения надёжности и долговечности	Общий эффект
	тепловой	электрической		
ТГК-1	148,6	162,9	116,5	428,0
ТГК-3	206,5	330,6	162,8	699,9
ОГК-2	14,1	363,6	52,3	430,0
ОГК-6	17,5	307,1	68,4	393,0
Всего	386,7	1164,2	400,0	1950,9

На рис. 1 показан процент энергетических мощностей, управляемых с применение АСУ ТП. Явным лидером является ТГК-3 (Мосэнерго). При этом крайнестораживает очень слабый уровень автоматизации на предприятиях ТГК-1.

¹ Не учтён эффект от повышения маневренности (из-за отсутствия данных об участии предприятий на оптовом рынке энергии).

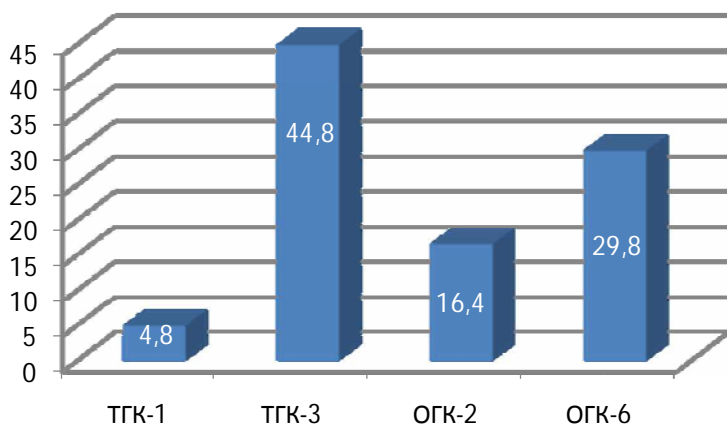


Рис. 1. Процент оснащения энергетических мощностей АСУ ТП

Рынок предложений АСУ ТП формируется как отечественными, так и иностранными производителями программно-технических комплексов (ПТК). В табл. 4 представлены не только основные компании, но и показана динамика их активности.

Таблица 4. Основные производители ПТК, внедрённых на тепловых электростанциях

Наименование фирмы	Внедрения в 1994-2006 гг.	Внедрения в 2007-2010 гг.
Теплоприбор	28,7 %	11,5 %
Круг	22,6 %	12,1 %
Текон	12,8 %	22,4 %
Сименс	15,6 %	26,8 %
Эмерсон	6,1 %	22,6 %
Прочие	14,3 %	4,5 %

Обращает на себя внимание «агрессивность» иностранных компаний. И если фирма «Сименс» достаточно давно и прочно внедрилась на предприятия большой энергетики, то фирма «Эмерсон» имеет наивысшую динамику на рынке внедрений.

В целом две эти компании фактически обеспечивают половину внедрений. При этом для внедрений выбираются наиболее современные и мощные энергетические предприятия.

При существенном росте числа внедрений ПТК, производимых производственной компанией «Промконтроллер» (ГК «Текон»), масштабы внедрений уступают иностранным фирмам, выдавливающим отечественных производителей с внутреннего рынка.

Следует заметить, что технические возможности отечественных ПТК практически полностью позволяют реализовать с надлежащей надёжностью все функции управления современным энергетическим оборудованием.

Проблемы инжиниринговой поддержки в процессе разработки (внедрения) АСУ ТП и сервисного обслуживания ПТК хотя и есть, но постепенно решаются.

Важно подчеркнуть, что в настоящее время широкое внедрение получают АСУ ТП четвёртого поколения, принципиальной новизной которых является использование Web-технологии, обеспечивающих:

- невиданную ранее гибкость систем;
- комфортность интерфейса и лёгкость доступа пользователя к данным;
- возможность модификации программных средств и свободу распределения задач по серверным и клиентским ресурсам;
- возможность горячей замены многих периферийных и системных компонентов.

Наряду с позитивными свойствами Web-системы существенно увеличивают риск несанкционированных действий:

- со стороны лиц, создающих, эксплуатирующих и обслуживающих систему;
- со стороны лиц, не имеющих допуска к работе системы;
- со стороны внешних технических устройств, имеющих технический доступ через коммуникационные возможности современных средств связи.

В итоге существенно возрастает риск уязвимости стратегически важных объектов, к которым относятся предприятия большой энергетики. С учётом этого исключительно важного обстоятельства должны быть приняты меры, создающие возможность переломить тенденции в развитии рынка ПТК. Отечественный производитель должен быть защищён.

А.В. Титов, нач. отдела (Владимирский филиал ОАО «ТГК-6»)

ОПЫТ ВНЕДРЕНИЯ И ЭКСПЛУАТАЦИИ АСУ ТП ВО ВЛАДИМИРСКОМ ФИЛИАЛЕ ОАО «ТГК-6»

В условиях рынка энергии внедрение информационных технологий (ИТ) в управлении эффективностью производственного процесса приобретает особенно большое значение, поскольку позволяет экономить значительные средства за счет оптимизации режима работы, а также выявления узлов и агрегатов, требующих ремонта или модернизации в целях повышения экономичности. Создание автоматизированного теплоэнергетического оборудования очень важная задача в условиях сложности комплектации персонала и ужесточения рыночных требований к эксплуатационным режимам генерирующего оборудования.

Управление эффективностью производственного процесса осуществляется системами технологического (АСУ ТП) и экономического (SPA, MES) управления, и они могут успешно функционировать только при условии их реализации на базе ИТ.

Необходимость обеспечения безопасности и бесперебойности энергообеспечения накладывают очень высокие требования на процедуру контроля технических средств и оборудования. Внедрение АСУ ТП на Владимирском филиале ОАО «ТГК-6» позволило решить следующие задачи:

- повышение безопасности и надежности эксплуатации газоиспользующего оборудования (выполнена реконструкция котлов для приведения в соответствие с «Правилами безопасности систем газораспределения и газопотребления ПБ 12-529-03» с реализацией СКУ на базе ПТК фирмы ABB, в ПТК реализованы технологические защиты, блокировки и АСР);
- повышение надежности эксплуатации котлов, увеличение срока их эксплуатации и межремонтный период (снижены выбеги температур металла пароперегревателя);
- повышение технико-экономических показателей работы котлов (снижены удельные расходы топлива на выработку энергии, снижены расходы электроэнергии на тягу и дутье, повышен КПД);
- контроль выработки электрической и тепловой энергии.

Внедрение главных регуляторов (ГР) (АСУ ТН ТЭЦ) соответствует «Техническим требованиям к генерирующему оборудованию участников оптового рынка» и позволяет реально участвовать в общем первичном регулировании частоты (ОПРЧ). В результате: отклонения электрической нагрузки, отдаваемой в сеть, соответствуют требованиям точности под-

держания торгового графика; отсутствуют штрафные санкции за неучастие в ОПРЧ.

Создание автоматизированного теплоэнергетического оборудования – очень важная задача в условиях сложности комплектации персонала и ужесточения рыночных требований к эксплуатационным режимам генерирующего оборудования.

Успех автоматизации, как подтверждает опыт, в значительной степени зависит от подготовленности технологического оборудования к автоматизации. Требования научно-технической документации к качеству поддержания технологических параметров АСР составлены с учетом выполнения требований к оборудованию, регулирующим органам и устройствам измерения, при условии исправности основного оборудования, соблюдения заданных условий эксплуатации.

Экономическая эффективность от эксплуатации ГР складывается из следующих составляющих:

- снижения величины отклонений электрической нагрузки от заданного диспетчерского графика;
- повышения точности поддержания заданного значения давления пара перед турбинами;
- повышения платы за мощность в случае качественного участия участника оптового рынка в ОПРЧ. Снижение платы за мощность, в случае согласованного системным оператором неучастия генерирующего оборудования в ОПРЧ, составляет около 1 %.

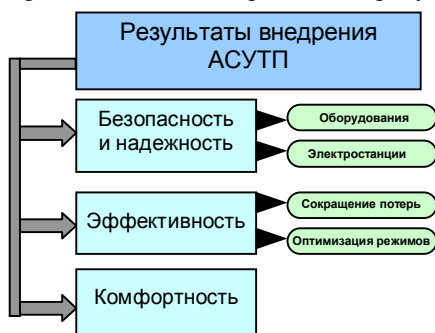
Сохранение конкурентноспособности «пожилых» ТЭЦ в жестких условиях рынка возможно только за счет повышения эффективности производства электроэнергии и тепла. Для этого в перспективных планах в качестве основных мер рассматриваются:

- выполнение задания по коэффициенту готовности, для чего планируется создание АСУ ТП турбогенераторов с реконструкцией систем регулирования турбин на базе ЭГСРиЗ;
- выполнение диспетчерского графика по электрической и тепловой нагрузке, для чего планируется разработка и оснащения каждой турбины взаимосвязанными системами регулирования мощности и температуры сетевой воды, разработка общестанционных задатчиков электрической мощности и тепловой нагрузки ТЭЦ;
- и, как завершение, создание общестанционной системы автоматического управления энергетической мощностью и тепловой нагрузкой Владимирской ТЭЦ.

Основными источниками повышения эффективности ТЭС за счет внедрения АСУТП являются:

- повышение экономичности работы оборудования, обусловленное улучшением качества поддержания технологических параметров в регулировочном диапазоне нагрузок, в пусковых режимах, а также сокращением продолжительности пусков и затрат топлива в пусковых режимах;
- контроль состояния технологического оборудования, приближающий проведение ремонтов и улучшающий его техническое обслуживание «по состоянию» учета наработки и учета причин простоя оборудования, анализа предаварийного состояния оборудования, передачи исходных данных для расчета ремонтов;
- продление ресурса работы оборудования, обусловленное уменьшением «выбегов» температур металла котельных поверхностей нагрева, особенно в пусковых режимах, снижением уровня термических напряжений в толстостенных элементах котлов, паропроводов и турбин, в пуско-остановочных режимах за счет более полной их автоматизации, ориентированной на оптимизацию;
- сокращение выбросов вредных веществ в атмосферу за счет оптимизации топочного режима путем автоматического поддержания в статике и динамике требуемого соответствия между расходами топлива и воздуха с контролем содержания O_2 , CO и NO_x в дымовых газах.

Результаты внедрения АСУТП изображены на рисунке.



Внедрение АСУ ТП обеспечило повышение эффективности и надёжности ТЭС, а именно:

- сокращение аварийных остановов и минимизация последствий аварий за счет расширенного контроля и диагностики технического со-

стояния оборудования и повышения надежности срабатывания защит в аварийной ситуации с исключением ложных срабатываний;

- внедрение учета энергоресурсов (тепловой, электрической энергии, газа и т.п.) на входе и выходе ТЭЦ;
- реализация АСУ тепловой нагрузкой, удовлетворяющих как энергосистемным, так и внутростанционным требованиям (участие в ОНРЧ, поддержание торгового графика электрической нагрузки в соответствии с требованиями рынка).

Внедрение АСУ ТП позволило повысить эффективность и комфортность работы персонала ТЭС, отразившиеся в следующем:

- расширение объема и наглядности представления информации;
- расширение возможностей просмотра и использования архивных данных, повышение удобства и комфортности работы оперативного персонала;
- расширение возможностей и повышение удобства наладки систем регулирования персоналом ТЭС;
- возможность объективно оценивать действия оперативного персонала со стороны администрации;
- удобство предоставления информации руководителям разного уровня (начальникам смен, главному инженеру).

Работа по подготовке к реконструкции в части систем контроля и управления (СКУ) Владимирской ТЭЦ ведется с 1996 года. В 1997 году был проведен тендер в соответствии с указанием Цэнтрэнерго и методикой проведения тендеров в РАО «ЕЭС России» с участием шести фирм. По результатам тендера и решением совещания при Генеральном директоре АО «Владимирэнерго» от 24.04.1998 г. определена концепция развития АСУ ТП Владимирской ТЭЦ на базе ПТК фирмы АВВ (Freelance 2000), предложенная АО «Электроцентраладка» (ЭЦН), как лучшая по техническим характеристикам и стоимости (коэффициент цена/качество).

В 1998 году была проведена газификация котла № 5 с внедрением локальной АСУ ТП газовой части на базе ПТК Freelance 2000. Были введены в работу АСР горения, реализованы логические программы автоматической проверки защит, вентиляции топки, опрессовки газопроводов; проведены подготовительные работы по реализации программы автоматической растопки котла на газе.

В ноябре 2005 года завершены работы по АСУ ТП котла № 5 (мазутной части). За время эксплуатации котла СКУ показали надежную работу.

В 1999 году была выполнена реконструкция СКУ котла № 6 с внедрением полнофункциональной АСУ ТП на базе ПТК Freelance 2000.

Реконструкция СКУ котлов №7-10 на базе ПТК Freelance 2000 проводилась в два этапа. На первом этапе выполнялась газификация котла с вводом в работу АСР горения и технологических защит, а на втором этапе внедрения АСУ ТП доводились до полнофункционального уровня котел №7 (ноябрь 2005 г. – июль 2006 г.), котел №8 (октябрь 2006 г. – июль 2007 г.), котел №9 (октябрь 2007 г. – ноябрь 2008 г.), котёл №10 (ноябрь 2009 г.)

В августе 2006 года на ХВО-1 была введена в работу обессоливающая установка (Апкоре 1-я цепочка) с внедрением СКУ на базе ПТК Freelance 2000. В декабре 2009 года введена в опытную эксплуатацию система химико-технологического мониторинга (СХТМ) (первый этап) на базе ПТК Freelance 2000, выполненная НПП «Элемент» (г. Москва).

В апреле 2008 года были проведены контрольные испытания по проверке готовности Владимирского филиала ОАО «ТГК-6» к участию в общем первичном регулировании частоты в ЕЭС России и в июне 2008 года АСУ тепловой нагрузки принята в промышленную эксплуатацию.

Внедрение АСУ ТП котлов №5,6 и АСУ ТП ХВО-1 (Апкоре 1-я цепочка) выполнила ЭЦН (г. Москва), а внедрение АСУ ТП котлов №№7-10 и АСУ ТН выполнили ОАО «ВТИ» (г. Москва), ОАО ЦКБ «Энергоремонт» (г. Москва), ООО «НТЦ Энергоавтоматика» (г. Чебоксары).

За период с 1997 года промышленной эксплуатации АСУ ТП, реализованных на базе ПТК Freelance 2000, не было ни одного значительного сбоя по вине ПТК Freelance 2000. На котлах № 5,6 температурный контроль (за исключением датчиков, участвующих в технологических защитах, блокировках и регулировании) выполнен на контроллерах ТКМ 52 (Текон). Три года назад начался резкий рост количества отказов и сбоев в работе Теконов. Поэтому, учитывая физический износ контроллеров ТКМ, коэффициент цена/качество и опыт эксплуатации АСУ ТП котлов №7-9, принято решение заменить ТКМ на контроллеры АДАМ.

И.В. Тетеревков, ст. преподаватель (ИГЭУ)

МЕТРОЛОГИЧЕСКИЕ АСПЕКТЫ РЕШЕНИЯ БАЛАНСОВЫХ ЗАДАЧ В СИСТЕМАХ ОПЕРАТИВНОГО УПРАВЛЕНИЯ

Современное состояние информационных технологий позволяет значительно расширить возможности автоматизации управления сложными

технологическими процессами. Активное внедрение микропроцессорных средств автоматического управления позволяет не только применять прогрессивные способы построения систем, отказываясь от использования классического жесткого алгоритма регулирования (оптимальные и адаптивные системы), но и организовать интегрированную взаимосвязь различных уровней управления в рамках единой системы управления сложным объектом в целом. При этом наиболее существенные изменения претерпевает уровень оперативного управления, совершенствуются рабочие места операторов энергетического оборудования, возрастает информационная поддержка процессов принятия оперативных решений.

К сожалению, это не сопровождается перераспределением оперативных функций между оператором и ЭВМ. По-прежнему все оперативные действия реализуются оператором исходя из его профессионального опыта и объёма доступной оперативной технологической информации. Рассчитываемые компьютером характеристики процесса, как правило, ориентированы только на учётные задачи (форма 3-тех и т.п.). Применяемые процедуры расчёта используют только усреднённые значения накопленного за фиксированный период объёма технологической информации, полученной с датчиков.

Для эффективной организации оперативного управления необходимо иметь достоверную информацию о значениях наблюдаемых (измеряемых) и расчётных параметров, одна часть которых относится к технико-экономическим показателям, а другая – к технологическим параметрам, датчики для измерения которых по тем или иным причинам отсутствуют. Решить эту задачу позволяет проведение балансовых расчётов.

Основные сложности при решении системы балансовых уравнений обусловлены тем, что число переменных значительно превышает число уравнений. В случае задания части термодинамических и расходных параметров схемы, избыточных по отношению к системе уравнений, решение этой системы будет однозначным. Но необходимо учитывать, что термодинамические и расходные параметры в процессе расчёта балансов могут принимать лишь такие значения, которые находятся внутри или на границе допустимой области. Среди многочисленных методов решения балансовых задач можно выделить три основные группы: матричные, экстремальные (оптимизационные) и графовые методы.

Матричный метод решения балансовой задачи требует представить систему уравнений в виде ориентированного графа. Узлы графа будут соответствовать элементам технологической схемы, дуги - материальным и (или) энергетическим потокам между элементами, причём направление дуг даст информацию о направленности потока. Формализованным опи-

санием такого графа является так называемая матрица инцидентности. Основным недостатком матричного метода являются трудности, связанные с инвертированием матриц. Ещё одним существенным недостатком является отсутствие возможности учёта системы ограничений.

Среди экстремальных методов для расчёта сложных нелинейных систем уравнений наибольшее распространение получили численные итерационные методы и методы теории оптимизации. Достоинством наиболее сложных экстремальных методов является возможность учёта системы ограничений.

Графовые методы позволяют предварительно (исходя из полноты имеющейся информации и структуры системы уравнений) провести планирование вычислительного процесса. В целом это приводит к необходимости реализации итерационных процедур расчёта с минимизацией невязок заранее выделенных (назначенных) параметров.

Любой из методов рассмотренных трех групп для своей реализации требует значительных вычислительных затрат. Но применение для построения АСУ набора микропроцессорных контроллеров и рабочих станций, объединенных в локальную сеть, позволяет вести подобные расчеты в темпе с ведением технологического процесса и предоставлять информацию оператору практически в режиме реального времени. Но неизбежно возникнет вопрос: а какова точность полученных данных? Для значений технологических параметров, измеряемых напрямую, вопросы оценки их метрологической точности в микропроцессорных системах проработаны достаточно хорошо. Но для параметров, определяемых в результате решения балансовой задачи, также требуется обеспечить метрологическое качество полученных результатов, на что существенное влияние оказывает метод решения системы балансовых уравнений.

Основная сложность при оценке метрологических показателей полученного решения состоит в том, что зачастую невозможно заранее предсказать вид закона распределения погрешности определения того или иного показателя. А необходимость определения закона распределения погрешности достаточно очевидна: одним из самых распространенных способов представления погрешности является указание ширины доверительного интервала, которая зависит не только от рассеяния погрешности относительно систематической составляющей, но и от величины квантильного множителя. Рассчитать значение квантильного множителя без знания закона распределения невозможно.

На практике чаще всего достаточно обосновательно при оценке ширины доверительного интервала принимается решение о соответствии закона распределения погрешности рассчитываемой величины нормаль-

ному (гауссовскому) закону, причем в качестве основной причины такого выбора указывается центральная предельная теорема. Проверка соответствия реальных данных выдвинутой гипотезе не производится. Такой подход является ошибочным – по оценкам специалистов [1, 2], полученным еще в семидесятых годах, не более 60 % аналоговых датчиков – измерительных преобразователей имеют закон распределения погрешности измерения, близкий к нормальному. Оценок вида закона распределения погрешностей расчета показателей в микропроцессорной системе управления (МПСУ) практически нет.

Между тем, сама организация МПСУ позволяет решить эту проблему за счет внутренних вычислительных возможностей. Задача решается с помощью трех функциональных блоков. Первый предназначен для генерации выборок, соответствующих погрешностям измерения технологических параметров с помощью аналоговых датчиков. На этом этапе необходимо также иметь информацию о различных режимах обработки данных в информационно-вычислительном комплексе, то есть учитывать возможность отличия в обработке исходных данных, принадлежащих к разным диапазонам. В этом случае необходимо смоделировать несколько наборов выборок и ориентироваться на проведение факторного эксперимента.

Выбор диапазона моделирования выборки необходимо проводить исходя из априорных предположений о виде закона распределения. Для ограниченных распределений (трапецеидальных или равномерных) таким диапазоном является диапазон самих распределений. Для экспоненциальных и двухмодальных распределений достаточно ограничиваться диапазоном $\pm 6\sigma$, а для уплощенных распределений – диапазоном $\pm 15\sigma$.

Второй функциональный блок необходим для имитации процесса обработки данных в цифровой части МПСУ. Разделить процесс вычисления на некоторый набор стандартных операций и провести последовательное аналитическое определение закона распределения результатов этих операций не представляется возможным: слишком велико разнообразие этих операций, к тому же промежуточные результаты далеко не всегда соответствуют стандартным законам распределения. Применение имитационных процедур позволяет "напрямую" получить выборку, соответствующую погрешности расчета определяемого показателя.

Третий блок решает задачу идентификации закона распределения погрешности расчета (и, при необходимости, используется при определении законов распределения погрешностей датчиков). Наиболее удобной является процедура, основанная на классификации распределений в об-

ласти параметров "контрэкссесс – энтропийный коэффициент" [3, 4]. Процедура позволяет определить следующие типы законов распределений:

- экспоненциальные (включая нормальный и равномерный);
- трапецидальный;
- двухмодальные;
- уплощенные.

При возможном соответствии полученных значений контрэкссесса и энтропийного коэффициента нескольким распределениям выбор между тем или иным видом закона необходимо производить с помощью одного из известных критериев согласия (например, критерия Пирсона). Так как рассеяние получаемых оценок параметров распределений будет зависеть от объема исходных данных, то на первом (генерация) и втором (имитация) этапах желательно получить выборки достаточно большого объема.

Описанная методика реализована программно. Тесты подтверждают правильность отказа от предпочтения нормального закона распределения. Например, для задачи определения погрешности вычисления расхода пара (по методу переменного перепада давления с коррекцией коэффициентов алгоритма по измеренным параметра теплоносителя) в качестве законов распределения датчиков технологических параметров был рассмотрен экспоненциальный закон с показателем степени в диапазоне от 0,5 до 35. "Нормальность" закона распределения погрешности вычисления расхода подтвердилась только при нормальных законах распределения погрешностей измерения всех исходных параметров. При распределении с $\alpha = 35$ (практически равномерное распределение) показатель степени распределения погрешности расхода равен 2,77, что при доверительной вероятности 0,95 в случае отказа от реального распределения и замены его нормальным увеличивает ширину доверительного интервала погрешности на 12 %.

Применение данной методики для оценки закона распределения погрешностей параметров, вычисляемых за счет решения балансовых задач, также показывает необходимость отказа от гауссовского распределения. Также подтверждается влияние способа решения балансовой задачи на метрологические характеристики получаемых результатов.

Библиографический список

1. Таушанов З., Тонева Е., Пенева Р. Вычисление энтропийного коэффициента при малых выборках // Изобретательство, стандартизация и качество. – 1973. - № 5. – София.
2. Галочкина В.Я. Исследование энтропийных оценок случайных погрешностей измерительных устройств: Автореф. дис. канд. техн. наук. – Л., 1971.

3. **Новицкий П.В., Зограф И.А.** Оценка погрешностей результатов измерений. – Л.: Энергоатомиздат, 1991.

4. **Тетеревков И.В.** Методика классификации закона распределения погрешностей //Тезисы докладов международной научно-технической конференции "VII Бенардосовские чтения"/Ив. гос. энергетический университет. – Иваново, 1997

*Н.В. Харитонов, нач. ЦТАИ (филиал Нижегородская ГРЭС
ОАО «ТГК-6»)*

О ПРИМЕНЕНИИ СИСТЕМЫ ИЗМЕРЕНИЯ УРОВНЯ В БАРАБАНЕ ЭНЕРГЕТИЧЕСКОГО КОТЛА ГИДРОСТАТИЧЕСКИМ МЕТОДОМ С МНОГОПАРАМЕТРИЧЕСКИМ ПРЕОБРАЗОВАТЕЛЕМ ДАВЛЕНИЯ

«Узким местом» в вопросах технологического контроля и полной автоматизации пусковых режимов энергетических барабанных котлов (а так же подогревателей высокого и низкого давления паровых турбин) остается измерение и поддержание нормы уровня котловой воды в барабане котла в переходных режимах (растопка или расхолодка). Это осложнение обусловлено изменением плотности воды в процессе ее нагревания (охлаждения) до рабочих параметров.

В настоящее время технологический контроль осуществляется путем оснащения барабанов смотровыми колонками прямого действия и датчиками-перепадамерами с электрической схемой дистанционной передачи показаний на электронные приборы (регистратор уровня, регуляторы уровня и не менее двух показывающих приборов, задействованных в схеме технологической защиты котлоагрегата), расположенных на тепловых щитах управления. Уровень в барабане энергетического котла высокого давления в подавляющем большинстве случаев измеряется гидростатическим методом (измерение перепада давления в конденсационном сосуде):

$$S = \Delta p ,$$

где S – показания прибора, мм; Δp – перепад давления в преобразователе, вычисляется по формуле

$$\Delta p = \rho(H - h),$$

где ρ – плотность воды; h – высота столба питательной воды в барабане котла; H – высота столба питательной воды в конденсационном сосуде.

Плотность воды при изменении ее термодинамического состояния по границе линии насыщения определяется уравнением формуляции. Ее изменение представлено в таблицах М.П. Вукаловича «Теплофизические свойства воды и водяного пара».

С высокой степенью точности уровень питательной воды в барабане будет определяться по формуле

$$S = \rho(H - h) \dot{\alpha},$$

где $\dot{\alpha}$ – коэффициент относительной плотности воды, который вычисляется по формуле

$$\dot{\alpha} = \rho^* / \rho,$$

где ρ – плотность воды при нормальных условиях, ρ^* – то же в переходном состоянии.

Принципиальная схема измерения уровня представлена на рис. 1.

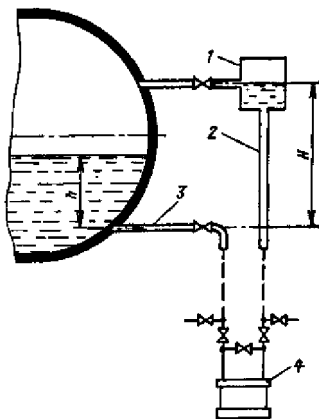


Рис. 1. Принципиальная схема измерения уровня:

1 – уравнильный сосуд, соединенный с паровым пространством барабана; 2 – импульсная трубка; 3 – импульсная трубка, соединенная с водяным пространством барабана; 4 – преобразователь давления.

Для уменьшения погрешностей измерения, вызванных охлаждением питательной воды в уравнильном сосуде 1, применяются теплоизолированные обогреваемые конденсационные сосуды, показанные на рис. 2.

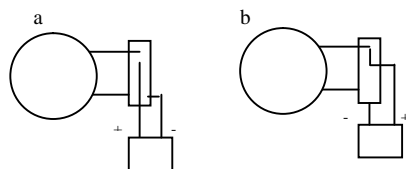


Рис. 2. Теплоизолируемые обогреваемые конденсационные сосуды

В настоящее время специалисты цеха ТАИ проводят лабораторную калибровку характеристик датчиков-преобразователей перепада давления на рабочие параметры питательной воды (для котла ТП-230-2 плотность питательной воды при рабочем давлении составляет 671 кг/м^3).

В переходных режимах в течение всего времени растопки (расхолодки) котла гидростатический метод измерения уровня не работает вследствие большой погрешности измерительного комплекта (более 30 %). Предлагаемая система измерения уровня воды в барабане энергетического котла гидростатическим методом предусматривает создание измерительной схемы с применением многопараметрического преобразователя давления, оснащенного следующими электронными устройствами:

- сенсором перепада давления;
- сенсором абсолютного давления в одной из камер;
- электронным блоком измерения электрических импульсов на выходе сенсоров, их преобразование в цифровой сигнал и дальнейшую коррекцию сигнала перепада давления в конденсационном сосуде в зависимости от плотности питательной воды по значению избыточного давления в барабане котла (по линии насыщения), с формированием стандартного токового сигнала 4 – 20 мА или дискретного на выходе.

За основу многопараметрического преобразователя был принят надежный и проверенный отечественный дифференциальный преобразователь давления типа САПФИР-22МР-ДД, серийно выпускаемый Рязанским приборостроительным заводом ОАО «ТЕПЛОПРИБОР» (рис. 3).

Дополнительный контур измерения избыточного давления p состоит из мембраны 16, соединенной тягой 15 с тензопреобразователем, который через герметичный ввод 13 связан с электронным преобразователем 1.

В контуре измерения перепада давления Δp (см. рис. 1) разность давлений в плюсовой 7 и минусовой 8 камерах вызывает прогиб мембраны 9, который через тягу 10 и центральный шток передается на тензопреобразователь 11. Деформация тензопреобразователя 11 приводит к изменению его сопротивления, при этом меняется значение напряжения $U_{\Delta p}$,

которое передается в электронный преобразователь 12. Таким образом, выходной сигнал от тензопреобразователя 11 поступает на вход электронного преобразователя 12.

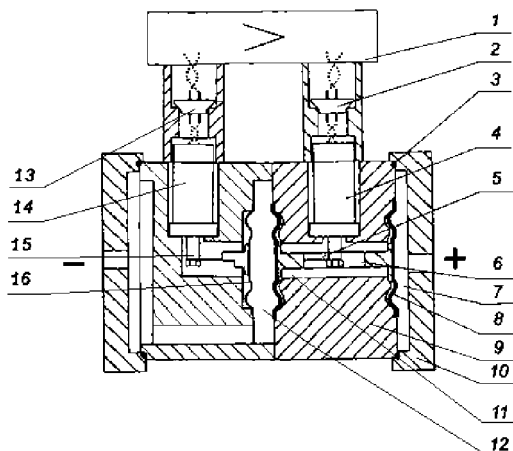


Рис. 3. Принципиальная схема многопараметрического преобразователя давления: 1 – электронный преобразователь; 2 – гермоввод; 3 – прокладки; 4 – тензопреобразователь измерения перепада давления; 5 – тяга; 6 – центральный шток; 7 – плюсовая камера; 8 – мембраны; 9 – основание; 10 – фланцы; 11 – замкнутая полость, заполненная кремнийорганической жидкостью; 12 – минусовая камера; 13 – гермоввод; 14 – тензопреобразователь; 15 – тяга; 16 – мембрана

В контуре измерения избыточного давления p изменение давления в минусовой камере 8 вызывает прогиб мембраны 13, который посредством тяги 14 передается на второй тензопреобразователь 15. Деформация последнего приводит к изменению его сопротивления, при этом меняется значение напряжения U_p , которое передается в электронный преобразователь 12.

Электронный блок 1 состоит из блока индикатора и двух плат: клемной и платы микропроцессора. На клемной плате установлена клемная колодка для присоединения жил кабелей питания и нагрузки. На плате микропроцессора расположен микроконтроллер, который оцифровывает сигнал от измерительного блока, ступенчато в пределах класса точности датчика корректирует его, отображает на жидкокристаллическом индикаторе (ЖКИ) и преобразует из цифрового формата в стандартный выходной токовый сигнал.

На верхней поверхности корпуса электронного блока под откидной крышкой расположены четыре колодца, в каждый из которых может быть введен манипулятор ручного управления для контроля и программирования преобразователя.

На подсвечиваемом ЖКИ можно отобразить параметры технологических измерений:

- уровня;
- дифференциального и абсолютного давления;
- значения выходного токового сигнала;
- температуры собственно электронного блока.

Воздействием магнитного манипулятора вводятся (задаются) или корректируются данные верхних пределов диапазонов измерений, перепада давлений, абсолютного давления, время демпфирования, метрологическая информация о данном датчике. Так же предусматривается корректировка значений уровня и выходного сигнала, включение функции самотестирования преобразователя.

Комбинированный преобразователь САПФИР-22МР является многопредельным (см. таблицу) и может перенастраиваться на любой тип барабанов котла (с различным избыточным давлением и расстояниями между отверстиями для импульсных отборов на сосуд постоянного уровня), также он может использоваться для измерения уровня в пароводяных теплообменниках (подогревателях высокого и низкого давления турбогенераторов).

В период 2006 – 2008 гг. на ОАО «ТЕПЛОПРИБОР» (г. Рязань) были проведены работы по созданию и изготовлению опытно промышленных образцов многопараметрического преобразователя САПФИР-22МР. В 2008 году данное устройство успешно прошло опытно-промышленные испытания на котлах, станционные № 6 и 8, Игумновской ТЭЦ Дзержинского филиала ТГК-6.

К положительным результатам применения схемы измерения уровня в барабане энергетического котла гидростатическим методом с использованием многопараметрического преобразователя давления САПФИР-22МР-К нужно отнести следующее:

- исключение человеческого фактора в контроле над уровнем в барабане котлоагрегата в переходных режимах (растопка);
- обеспечение точного измерения уровня в переходных режимах (растопка), т.е. выполнение требований п. 4.3.13 ПТЭ;
- возможность использования сигнала преобразователя для полной автоматизации растопки котла;

Таблица. Характеристики манометров Сапфир-22МР

Измеряемый параметр	Код	Верхний предел измерений				Предел допускаемой основной погрешности $\pm\gamma$, %
		кПа	МПа	кгс/см ²	кгс/м ²	
Разность давлений	27XX	1,00			100	0,25
		1,60			160	0,25
		2,50			250	0,25
		4,00			400	0,25
		6,30			630	0,20; 0,25
		10,00			1000	0,20; 0,25
	37XX 38XX	4,00			400	0,25
		6,30			630	0,25
		10,00			1000	0,25
		16,00			1600	0,20; 0,25
		25,00			2500	0,15; 0,20; 0,25
		40,00			4000	0,15; 0,20; 0,25
	47XX 48XX	25,00		0,25		0,25
		40,00		0,40		0,25
		63,00		0,63		0,20; 0,25
		100,00		1,00		0,20; 0,25
		160,00		1,60		0,15; 0,20; 0,25
		250,00		2,50		0,15; 0,20; 0,25
Абсолютное (избыточное) давление	(YY21)	1,00	-	-	100	0,25
		1,60	-	-	160	0,25
		2,50	-	-	250	0,25
		4,00	-	-	400	0,25
		6,30	-	-	630	0,20; 0,25
		10,00	-	-	1000	0,20; 0,25
	YY30 (YY31)	4,00	-	-	400	0,25
		6,30	-	-	630	0,25
		10,00	-	-	1000	0,25
		16,00	-	-	1600	0,20; 0,25
		25,00	-	-	2500	0,15; 0,20; 0,25
		40,00	-	-	4000	0,15; 0,20; 0,25
	YY40 (YY41)	25,00	-	0,25	-	0,25
		40,00	-	0,40	-	0,25
		63,00	-	0,63	-	0,20; 0,25
		100,00	-	1,00	-	0,20; 0,25
		160,00	-	1,60	-	0,15; 0,20; 0,25
		250,00	-	2,50	-	0,15; 0,20; 0,25
	YY50 (YY51)	-	0,25	2,50	-	0,25
		-	0,40	4,00	-	0,25
		-	0,63	6,30	-	0,25
		-	1,00	10,00	-	0,25
		-	1,60	16,00	-	0,25
		-	2,50	25,00	-	0,25
	(YY61)	-	1,60	16,00	-	0,25
		-	2,50	25,00	-	0,25
		-	4,00	40,00	-	0,20; 0,25
		-	6,30	63,00	-	0,20; 0,25
		-	10,00	100,00	-	0,15; 0,20; 0,25
		-	16,00	160,00	-	0,15; 0,20; 0,25
(YY71)	-	10,00	100,00	-	0,25	
	-	16,00	160,00	-	0,25	

- простота лабораторной калибровки и применения, надежность и меньшая стоимость по сравнению с другими электронными вычислителями уровня.

Ю.С. Тверской, проф., зав. каф., С.А. Таламанов, проф. (ИГЭУ)

О ПОДГОТОВКЕ СПЕЦИАЛИСТОВ В ОБЛАСТИ АСУТП ЭЛЕКТРОСТАНЦИЙ

Современные АСУТП электростанций (ТЭС, АЭС, ГЭС) служат основным системообразующим оборудованием, обеспечивающим формирование единой информационно-технологической среды энергетических предприятий, в которой человек-оператор является лицом, юридически ответственным за безаварийную и экономичную работу технологического оборудования. Это предъявляет особые требования к подготовке как специалистов-технологов (в первую очередь, по направлению «Теплоэнергетика и теплотехника»), так и специалистов в области создания и эксплуатации АСУТП (специальность 220201 «Управление и информатика в технических системах», направление 220400 «Управление в технических системах»).

Сложность решения проблемы обеспечения высокого уровня профессиональной подготовки будущих специалистов по АСУТП обусловлена в основном следующим объективным обстоятельством. Современное состояние средств технической реализации систем контроля и управления технологическим оборудованием электростанций характеризуется переходом от традиционной автономной специализированной аппаратуры и информационно-вычислительных систем к программно-техническим комплексам (ПТК) сетевой организации. АСУТП на базе ПТК являются наукоемкими системами, характеризующимися большим информационным масштабом, сложностью и ответственностью решаемых функциональных задач. В результате для создания и эксплуатации АСУТП требуется обеспечить подготовку будущих специалистов как в области «полевого» оборудования контроля и управления (приборы КИП, электропривода и исполнительные устройства, и т.д.), так и в области АСУТП на базе ПТК сетевой иерархической структуры (техническое обеспечение ПТК, программное обеспечение нижнего контроллерного уровня ПТК, программное и информационное обеспечение верхнего информационно-

вычислительного уровня ПТК, системы автоматизированного проектирования технического и программного обеспечения АСУТП, и др.).

Дополнительные сложности возникают также в связи с реформированием высшего профессионального образования, направленным на переход от одноуровневой системы (подготовка инженеров) на многоуровневую систему (бакалавр, инженер, магистр) по укрупненным направлениям. Этот переход требует существенного пересмотра учебных планов и программ, модернизации лабораторной базы, организации учебно-исследовательского процесса с максимальным приближением к современной практике разработки, внедрения и эксплуатации АСУТП, как сложных наукоемких систем.

В ИГЭУ подготовка специалистов в области современных АСУТП электростанций ведется на кафедре систем управления факультета информатики и вычислительной техники. В докладе обобщается опыт выполнения кафедрой систем управления ИГЭУ работ, направленных на обеспечение многоуровневой подготовки специалистов по АСУТП ТЭС в рамках нового укрупненного направления 220400 «Управление в технических системах».

Основные задачи, решаемые кафедрой систем управления в связи с переходом на многоуровневую подготовку специалистов по АСУТП, включали в себя совершенствование лабораторного, учебно-методического и исследовательского комплексов специальности 220201 «Управление и информатика в технических системах».

Мероприятия, выполняемые в последние годы кафедрой в рамках модернизации, включали в себя:

- модернизация лаборатории «Метрология и технологические измерения» и лаборатории «Полигон АСУТП электростанций», а также подготовка к модернизации и техническому перевооружению лаборатории «Системы автоматического управления»;
- работы по развитию и освоению математического, программного и информационного обеспечения поддержки технологии современных АСУТП в учебно-научном процессе по кафедре систем управления;
- решение вопросов развития учебно-методического обеспечения по кафедре с учетом перспективы перехода на многоуровневую подготовку специалистов по АСУТП;
- выполнения комплекса научных исследований по направлению развития технологии создания и эксплуатации АСУТП электростанций.

Лаборатория "Метрология и технологические измерения" полностью модернизирована 2009-10 гг. и к настоящему моменту времени ос-

нащена современным оборудованием, имеющим высокие метрологические характеристики и отвечающим всем требованиям современных АСУТП. Лаборатория позволяет изучать современные методы и средства измерения температуры, давления, расхода и других основных технологических параметров, а так же проводить поверку современных датчиков и вторичных приборов.

Пространство лаборатории разделено на две функциональные зоны: учебную и метрологическую.

В учебной зоне размещены стенды: изучения принципов работы и поверки средств измерения давления; изучения принципов работы и поверки средств измерения температуры; изучения принципов работы и поверки вторичных приборов и функциональной аппаратуры.

В метрологической зоне размещены стенды: поверки и калибровки датчиков давления в соответствии с требованиями государственных стандартов; поверки и калибровки датчиков измерения температуры в соответствии с требованиями государственных стандартов.

Новые лабораторные стенды технологических измерений разработаны в соответствии с последними достижениями в области приборостроения, используемыми в настоящее время при реализации «полевого» уровня АСУТП энергоблоков ТЭС. Стенды оборудованы современными преобразователями давления, интеллектуальными преобразователями давления, датчиками температуры, преобразователями температуры, калибраторами, термостатами и вторичными приборами.

Лаборатория "Полигон АСУТП электрических станций" – многофункциональный учебно-исследовательский комплекс для подготовки и повышения квалификации специалистов по новым информационным технологиям управления. Лаборатория введена в 2001 г., имеет патентную чистоту и по большинству параметров превосходит известные отечественные аналоги (как правило, полигоны фирм-поставщиков программно-технических комплексов, предназначенные исключительно для отработки инструментальных и аппаратных средств), а в целом не уступает лучшим зарубежным аналогам (полигоны фирм Siemens, ABB, Emerson и др.) [1-3 и др.].

Практическая значимость лаборатории определяется способностью подготовленных специалистов к инновационной инженерной деятельности, их востребованностью со стороны ведущих энергетических предприятий страны и других субъектов рынка труда, а также тиражируемостью технического решения с целью модернизации учебно-исследовательской лабораторной базы высших технических учебных заведений для подготовки конкурентоспособных специалистов в области

новых информационных технологий управления в сложных технических системах.

Научные исследования выполняются на кафедре по единому направлению совершенствования технологии создания и эксплуатации АСУТП электростанций [4 и др.]. Результаты исследований используются непосредственно в учебном процессе, чем обеспечивается фундаментальность в подготовке будущих специалистов по АСУТП.

В целом модернизация лабораторной базы кафедры, проведение научных исследований по тематике АСУТП с использованием последних достижений в области ПТК, математического моделирование энергетического оборудования и применение системного подхода к организации учебно-научного процесса и созданию соответствующих учебно-методических комплексов способствуют успешной адаптации кафедры систем управления к планируемому переходу на многоуровневую подготовку специалистов по АСУТП в энергетике (бакалавр, инженер, магистр, кандидат наук).

Библиографический список

1. **Тверской Ю.С., Таламанов С.А.** Опыт создания и перспективы развития полигонов полномасштабных АСУТП энергоблоков тепловых электростанций // Вестник ИГЭУ, Вып.1. – Иваново, 2002. – С.101-107.
2. **Тверской Ю.С., Таламанов С.А., Голубев А.В.** О подготовке инженерных кадров по направлениям автоматизация и управление в энергетическом университете // Приборы. – 2004. – №10. – С.33-36.
3. **Тверской Ю.С., Аракелян Э.К., Кузнецов С.И.** Подготовка и повышение квалификации специалистов в области современных АСУТП электростанций // Теплоэнергетика. – 2006. - №11. – С.70-74.
4. **Технология АСУТП электростанций** // Под ред. д.т.н., проф. Ю.С. Тверского: Труды Междунар. науч.-техн. конф. "XII Бенардосовские чтения". – Иваново: Изд. ИГЭУ, 2005. – 164 с.

В.Д. Таланов, к.т.н., доц., С.В. Таланов, аспирант (ИГЭУ)

МЕТОД АППРОКСИМАЦИИ ЭКСПЕРИМЕНТАЛЬНЫХ ДАННЫХ СТАТИЧЕСКИХ ХАРАКТЕРИСТИК ЭЛЕМЕНТОВ СИСТЕМ АВТОМАТИЗАЦИИ

В статье рассматривается метод аппроксимации по пяти точкам экспериментальных данных статических характеристик элементов систем

автоматизации – первичных и нелинейных преобразователей, регулирующих органов, математические модели которых встраиваются в алгоритмы обработки информации систем автоматического регулирования.

Суть предлагаемого метода аппроксимации экспериментальных данных по пяти точкам (в дальнейшем FPM – Five Points Method) заключается в следующем. Пять экспериментальных точек $\{X_i, Y_i\}$ аппроксимируются функцией $Y_m = F(X)$ представленной в виде суммы четырех элементарных функций

$$Y_m = \sum_{j=1}^4 Y_{mj}.$$

Исходные данные X_i и Y_i , выраженные в натуральных единицах, нормируются с переходом к новым безразмерным переменным

$$x_i = \frac{X_i - X_{\min}}{X_{\max} - X_{\min}}, \quad y_i = \frac{Y_i - Y_{\min}}{Y_{\max} - Y_{\min}},$$

где X_i, X_{\min}, X_{\max} – соответственно текущее, начальное и конечное значения аргумента в натуральных единицах; Y_i, Y_{\min}, Y_{\max} – соответственно текущее, начальное и конечное значения функции в натуральных единицах.

Первая функция аппроксимации описывается уравнением прямой

$$y_{m1} = a_0 + a_1 \cdot x,$$

коэффициенты которого определяются методом наименьших квадратов для пяти заданных точек:

$$a_0 = \frac{\sum_{i=1}^5 y_i \sum_{i=1}^5 x_i^2 - \sum_{i=1}^5 x_i y_i}{5 \sum_{i=1}^5 x_i^2 - \left(\sum_{i=1}^5 x_i \right)^2}; \quad a_1 = \frac{5 \sum_{i=1}^5 x_i y_i - \sum_{i=1}^5 x_i \sum_{i=1}^5 y_i}{5 \sum_{i=1}^5 x_i^2 - \left(\sum_{i=1}^5 x_i \right)^2}.$$

Вычисленные первые разности в первой (y_{11}), третьей (y_{13}) и пятой (y_{15}) точках аппроксимируются уравнением параболы:

$$y_{m2} = b_0 + b_1 \cdot x + b_2 \cdot x^2,$$

$$b_0 = y_{11}; \quad b_1 = -(3 \cdot y_{11} - 4 \cdot y_{13} + y_{15}); \quad b_2 = 2 \cdot (y_{11} - 2 \cdot y_{13} + y_{15}).$$

Вторые разности во второй (y_{22}) и четвертой (y_{24}) точках аппроксимируются уравнением синусоиды вида:

$$y_{m3} = c_0 + c_1 \cdot \sin(2 \cdot \pi \cdot k_1 \cdot x - \pi \cdot l_1),$$

где $c_0 = c_1 \cdot (k_1 - 1)$; $c_1 = \frac{y_{22}}{|y_{22}|} \cdot \frac{|y_{22}| + |y_{24}|}{2 \cdot k_1}$; $k_1 = 1$, если $\text{sign } y_{22} \neq \text{sign } y_{24}$;

$k_1 = 2$, если $\text{sign } y_{22} = \text{sign } y_{24}$; $l_1 = \frac{k_2 - 1}{2}$.

Вычисленные третьи разности во второй (y_{32}) и четвертой (y_{34}) точках так же аппроксимируется уравнением синусоиды:

$$y_{m4} = d_0 + d_1 \cdot \sin(2 \cdot \pi \cdot k_2 \cdot x - \pi \cdot l_2),$$

где $d_0 = d_1 \cdot (k_2 - 1)$; $d_1 = \frac{y_{32} \cdot |y_{32}| + |y_{34}|}{|y_{32}| \cdot 2 \cdot k_2}$; $k_2 = 1$, если $\text{sign } y_{32} \neq \text{sign } y_{34}$;

$k_2 = 2$, если $\text{sign } y_{32} = \text{sign } y_{34}$; $l_2 = \frac{k_2 - 1}{2}$.

Математическая модель будет иметь вид:

$$Y_m = m_0 + m_1 X + m_2 X^2 + m_3 (\sin(m_4 X) + m_5) + m_6 (\sin(m_7 X) + m_8),$$

где $m_0 = a_0 + b_0 + c_0 + d_0$; $m_1 = a_1 + b_1$; $m_2 = b_1$; $m_3 = c_1$; $m_4 = 2\pi k_1$; $m_5 = \pi l_1$; $m_6 = d_1$; $m_7 = 2\pi k_2$; $m_8 = \pi l_2$; $X = x(X_{\max} - X_{\min}) + X_{\min}$; $Y = y(Y_{\max} - Y_{\min}) + Y_{\min}$.

Алгоритм FPM реализован в среде LabVIEW в виде программного модуля. Для проверки работоспособности модуля была произведена аппроксимация рабочих расходных характеристик регулирующих клапанов алгоритмом SVD (Singular Value Decomposition – сингулярная декомпозиция, или метод разложения по особым значениям), который включен в библиотеку LabVIEW, для 10 и 5 точек и описанным алгоритмом FPM для пяти точек.

Алгоритм SVD реализует полиномиальную модель при задании количества точек и порядка полинома:

$$y = a + bx + cx^2 + \dots$$

В обоих алгоритмах рассчитывается MSE (Mean Squared Error – среднее квадратическое отклонение СКО) для узлов аппроксимации:

$$\text{СКО} = \frac{1}{n} \sum_{i=0}^{n-1} (f_i - y_i)^2.$$

Ниже приведены результаты аппроксимации для рабочих расходных характеристик игольчатого клапана (рис. 1) и золотникового клапана с треугольными окнами (рис. 2). Исходные данные и величина СКО приведены в табл. 1 и табл. 2.

Таблица 1. Исходные данные и СКО для характеристики игольчатого клапана

$x_i, \%$	0	10	20	30	40	50	60	70	80	100
$y_i, \%$	0	16,5	31	44	57	68	76	84	90	100
Алгоритм SVD (10 точек, 7-й порядок): СКО = 0,057 %²										
$x_i, \%$	0	10	20	30	40	50	60	70	80	100
$y_i, \%$	0	-	31	-	-	68	-	84	-	100
Алгоритм SVD (5 точек; 7-й порядок): СКО = 0,077 %²										
Алгоритм FPM (5 точек): СКО = 0,0025 %²										

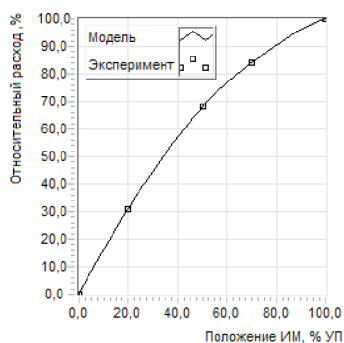


Рис. 1. Аппроксимация характеристики игольчатого клапана (алгоритм FPM)

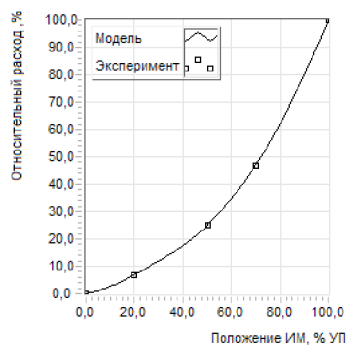


Рис. 2. Аппроксимация характеристики золотникового клапана с треугольными окнами (алгоритм FPM)

Таблица 2. Исходные данные и СКО для характеристики золотникового клапана с треугольными окнами

$x_i, \%$	0	10	20	30	40	50	60	70	80	100
$y_i, \%$	0	2	7	11	17	25	35	47	62	100
Алгоритм SVD (10 точек, 7-й порядок): СКО = 0,038 %²										
$x_i, \%$	0	10	20	30	40	50	60	70	80	100
$y_i, \%$	0	-	7	-	-	25	-	47	-	100
Алгоритм SVD (5 точек; 7-й порядок): СКО = 0,12 %²										
Алгоритм FPM (5 точек): СКО = 0,007 %²										

Заключение

При равномерном шаге СКО = 0 для узлов аппроксимации алгоритма FPM по определению.

В приведенных примерах (неравномерный шаг) СКО для узлов аппроксимации алгоритма FPM на порядок меньше алгоритма SVD, что позволяет сделать вывод о работоспособности программного модуля, реализующего алгоритм FPM.