на 10 % на 150-й секунде. При снижении расхода теплоносителя первого контура расход пара падает, а расход воды увеличивается из-за снижения давления в ПГ. На рис. 8 приведены результаты расчета одного из возмущенных режимов работы парогенератора: при скачкообразном снижении расхода теплоносителя первого контура через ПГ-1 на 10 % на 150-й секунде. Из графиков видно, что снижение расхода пара (на 28 т/ч) и сопутствующее повышение расхода питательной воды (на 4 т/ч) отрабатывается регулятором. Положение клапана в рабочем диапазоне меняется на 6 %, уровень в ПГ поддерживается в зоне требуемой точности, понизившись при возмущении из-за влияния набухания примерно на 12 мм, увеличивается в соответствии с разбалансом расходов воды и пара и далее поддерживается в зоне требуемой точности (±50 мм).

В результате проведения динамических испытаний на разработанной модели питания парогенератора подтверждено, что ПТК САР ПГ обеспечивает поддержание параметров ПГ в пределах требований нормальной эксплуатации блока.

Таким образом, использование математической модели питания парогенератора с переменными параметрами, созданной на основе инструментария событийного моделирования, позволяет не только наглядно и просто описать поведение сложного объекта управления, но и в короткие сроки провести испытание системы регулирования в различных режимах работы. Кроме того, разработанная модель пригодна не только для использования при испытаниях систем регулирования питания парогенераторов энергоблоков АЭС, но и для применения при разработке и настройке систем регулирования уровня в барабанах котлов энергоблоков тепловых электростанций, имеющих аналогичный принцип построения.

Библиографический список

1. Иванов, В.А. Регулирование энергоблоков: / В.А. Иванов. — Л.: Машиностроение, Ленингр. отд-ние, 1982. — 311 с.

2. Трофимов, А.И. Принципы построения автоматических регуляторов теплоэнергетических процессов АЭС / А.И. Трофимов, Н.Д. Егупов, Я.В. Слекеничс. — М.: Энергоатомиздат, 1999. — 340 с.

3. Дьяконов, В.П. MATLAB 6.5 SP1/7 + Simulink 5/6 в математике и моделировании / В.П. Дьяконов. — М.: Солон-Пресс, 2005. — 576 с.

4. Демченко, В.А., Разработка математической модели участка питания парогенератора энергоблока с ВВЭР / В.А. Демченко, В.Ф. Ложечников // Тр. Одес. политехн. ун-та. — Одесса, 1999. — Вып. 2(8). — С. 111 — 115.

5. Изерман, Р. Цифровые системы управления / Р. Изерман. — М.: Мир, 1984. — 541 с.

ДЕНИСОВА Людмила Альбертовна, кандидат технических наук, доцент кафедры «Автоматизированные системы обработки информации и управления» Омского государственного технического университета, старший научный сотрудник ЗАО «Автоматика-Э».
РАСКИН Евгений Михайлович, кандидат технических наук, директор ЗАО «Автоматика-Э», доцент кафедры «Автоматизированные системы обработки информации и управления» Омского государственного технического университета.

Адрес для переписки: 644050, г. Омск, пр. Мира, 11.

Статья поступила в редакцию 04.06.2010 г.

© Л. А. Денисова, Е. М. Раскин

УДК 681.3

Е. М. РАСКИН
Л. А. ДЕНИСОВА
Ж. В. ШИПИЛОВА

ЗАО «Автоматика-Э», г. Омск

Омский государственный технический университет

СИСТЕМА РЕГУЛИРОВАНИЯ ДАВЛЕНИЯ В ГЛАВНОМ ПАРОВОМ КОЛЛЕКТОРЕ ЭНЕРГОБЛОКА АЭС

Представлена система автоматического регулирования давления пара в главном паровом коллекторе энергоблока АЭС, созданная на базе цифровых локальных регуляторов. Приведены результаты динамических испытаний и оптимизации настроек системы.

Ключевые слова: быстродействующая редукционная установка, импульсная система регулирования, автоматизированное проектирование.

При эксплуатации энергоблоков АЭС возникают динамические режимы, сопровождающиеся повышением давления пара в главном паровом коллекторе (ГПК). Чрезмерный рост давления пара в ГПК, вызванный, как правило, недостаточным отводом тепла реактора при резком снижении потребления пара турбогенератором (ТГ) приводит к срабатыванию быстродействующих редукционных установок сброса пара в конденсатор турбины (БРУ-К) [1].

Для модернизации системы автоматического регулирования (САР) БРУ-К энергоблоков № 3, 4 Кольской АЭС и замены морально устаревшей,

отработавшей свой ресурс локальной аппаратуры авторегулирования «Каскад 1», применяемой до настоящего времени для регулирования давления в ГПК, в ЗАО «Автоматика-Э» разработан программно-технический комплекс (ПТК) на базе цифровых локальных регуляторов ВЛР-2.1.

ПТК САР БРУ-К разработан в соответствии с требованиями нормативно-технической документации к управляющим системам важным для безопасности [2] в части предотвращения нарушения пределов безопасной эксплуатации при реализации автоматизированного управления.

Выносной локальный регулятор ВЛР-2.1, является микроконтроллером, способным реализовать кроме функций собственно регулирования также и автоматические защиты и блокировки технологического оборудования. Для сохранения существующих кабельных трасс и минимизации затрат номенклатура и характеристики входных и выходных сигналов, а также габаритные и установочные размеры цифровых регуляторов ВЛР-2.1 соответствуют аналогичным параметрам устройств типа «Каскад».

ПТК САР БРУ-К, предназначенный для регулирования давления пара в главном паровом коллекторе, находится в состоянии ждущего режима и автоматически включается в работу при повышении давления в ГПК до 50 кгс/см^2 и при сбросе нагрузки на турбогенераторе более 20 % от максимального значения.

Для обеспечения надежной и безопасной эксплуатации энергетического блока при аварийных сбросах нагрузки или отключениях турбин САР БРУ К работает в различных эксплуатационных режимах (I, II, III) по сигналам от внешнего переключателя режимов. При действии аварийной защиты (АЗ-I) САР БРУ-К переходит из режима I или II (если были установлены эти режимы) в режим III.

САР БРУ-К формирует управляющие воздействия на электроприводы исполнительных механизмов (ИМ) регулирующих клапанов (РК) БРУ-К с учетом необходимых для безопасной работы механизмов блокировок, ограничений и защит. Регулирование осуществляется в III режиме по одноимпульсной схеме (регулируемый параметр — давление пара в ГПК). В I и II режимах схема регулирования трехимпульсная [3]. При этом регулируемый параметр — давление пара в ГПК, а корректирующие параметры при формировании задания регулятору — величина сброшенной нагрузки, положение клапанов БРУ-К или значение уровня в конденсаторе.

Импульсный регулятор ВЛР-2.1 управляет одновременно двумя клапанами, реализуя пропорционально-интегральный (ПИ-) закон регулирования во всех режимах работы и поддерживая во всем диапазоне нагрузок постоянное давление в ГПК — 47 кгс/см^2. Для предотвращения повышения уровня в конденсаторе турбины выше допустимого в схему регулятора введен сигнал по уровню в конденсаторе, используемый для коррекции задания по давлению в ГПК: изменяющий задание САР БРУ-К в пределах (47 – 50) кгс/см^2 при изменении уровня в конденсаторе турбины от 1200 мм (номинальный уровень) до 1400 мм (максимальный уровень).

В I режиме работы САР БРУ-К производится запоминание сигнала величины сброшенной нагрузки ТГ. При этом сигнал по величине сброшенной нагрузки компенсируется суммой сигналов по положению клапанов БРУ-К и сигналом по уровню в конденсаторе. Так как давление в ГПК в переходном режиме возрастает и величина сигнала по давлению в ГПК изменяется, САР работает как регулятор соотношения: «величина сброшенной нагрузки ТГ — положение клапанов БРУ-К» с коррекцией по давлению в ГПК.

Во II режиме после окончания переходного процесса, клапаны БРУ-К устанавливаются в положение, соответствующее величине сброшенной нагрузки ТГ. При уменьшении сигнала величины сброшенной нагрузки регулятор, отслеживая этот сигнал, прикрывает клапаны БРУ-К.

В III режиме работы САР БРУ-К (используемый основной режим) сигналы по величине сброшенной нагрузки ТГ и по положению регулирующих клапанов отключены от регулятора, сигнал по уровню в конденсаторе турбины обеспечивает автоматическую коррекцию задания по давлению в ГПК.

Кроме того, ПТК САР БРУ-К выполняет информационные функции: сбор, обработку и передачу информации о параметрах процесса регулирования и значениях технологических величин для предоставления оперативному персоналу. Сервисные функции, реализуемые ПТК САР БРУ-К, следующие: контроль работоспособности технических и программных средств комплекса; конфигурирование и настройка контуров регулирования.

Программно-алгоритмическая реализация функций контроля и управления ПТК САР БРУ-К выполнена на базе описаний технологических режимов и состава оборудования, представленных в исходных материалах Кольской АЭС, в соответствии с требованиями к функционированию системы и рекомендациями эксплуатирующего персонала.

Представленная на рис. 1 обобщенная схема программно-алгоритмической реализации канала регулирования БРУ-К на средствах ВЛР-2.1 содержит, кроме того, структуру организации информационного обмена ВЛР-2.1 с источниками и потребителями сигналов: датчиками технологических параметров, инженерной станцией (ИС), схемами управления регулирующими клапанами.

Для обеспечения унификации и независимости отладки при разработке ПО выполнена декомпозиция алгоритма работы САР БРУ-К разбиением на функциональные специализированные алгоблоки.

Алгоблок ALG_OBR реализует алгоритм обработки входных сигналов, которые подвергаются диагностическому контролю дополнительно к контролю, осуществляемому в регуляторе аппаратными средствами. Контролируются диапазон изменения технологических параметров (сравнением с заданными граничными значениями) и скорость их изменения с формированием соответствующих признаков недостоверности информации. Входные сигналы от аналоговых датчиков демпфируются и масштабируются с учетом диапазонов изменения.

Алгоблок ALG_SET формирует задание САР по давлению в ГПК на основе хранимого в памяти ВЛР-2.1 базового значения с возможностью его плавной перестройки по командам оператора с инженерной станции. Кроме того алгоблок ALG_SET поизводит коррекцию задания по сигналам величины сброшенной нагрузки ТГ, уровня в конденсаторе турбины и положения регулирующих клапанов.

Алгоблок ALG_REG осуществляет импульсное регулирование по ПИ-закону. В состав алгоблока ALG_REG входит импульсный пропорционально-дифференциальный (ПД-) преобразователь, формирующий последовательность импульсов на открытие или закрытие РК в зависимости от величины поступающего на его вход отклонения давления в ГПК

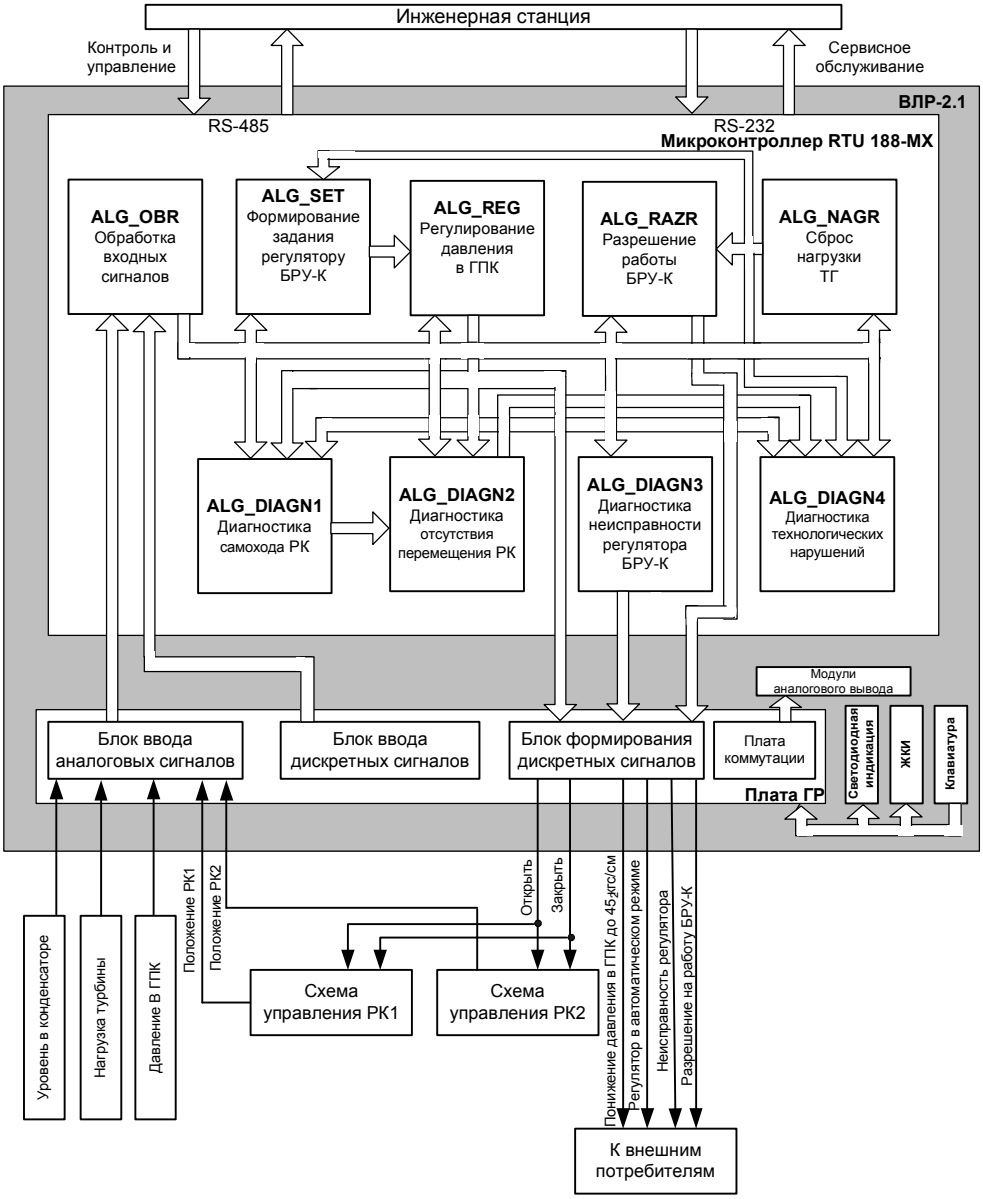

Рис. 1. Структурная схема программно-алгоритмической реализации канала регулирования на средствах ВЛР-2.1

от заданного значения, обеспечивая закон ПИ-регулирования совместно с исполнительным механизмом постоянной скорости.

Алгоблок ALG_RAZR формирует команду включения в работу БРУ-К при повышении давления в ГПК до 50 кгс/см^2 и одновременном сбросе нагрузки на ТГ более 20% от максимального значения.

Алгоблок ALG_NAGR вычисляет величину сброшенной нагрузки.

Алгоблоки диагностики ALG_DIAGN1 – ALG_DIAGN4 формируют сигналы неисправности регулятора при недостоверных значениях входных сигналов ВЛР-2.1 и при технологических нарушениях в системе.

Программная реализация алгоритмов регулирования выполнена в автоматизированном режиме с помощью разработанного в ЗАО «Автоматика Э» языка технологического проектирования Teprol, который представляет собой интегрированную среду создания программного обеспечения контроллеров и содержит все средства для редактирования, компиляции, компоновки и отладки программ [4].

При использовании языка Teprol технологический алгоритм представляется в виде набора графически соединенных между собой программно-алгоритмических блоков из библиотечного набора. Схемный редактор позволяет набрать схему технологического алгоритма, а графический редактор создать новые блоки. Автоматизированы также компиляция набранной схемы в программу на языке С и создание загрузочного модуля. Инструментальный комплекс, использующий средства языка Teprol, позволяет автоматизировать отладку ПО и исследование характеристик контроллеров, в которых оно используется, с помощью встроенных средств моделирования.

Для иллюстрации приведена программная реализация средствами языка Teprol алгоритма формирования задания регулятору — алгоблока ALG_SET (рис. 2). Алгоблок на языке Teprol — укрупнённый, функционально законченный модуль, в развёрнутом виде представляющий собой схему программной реализации выполняемого им алгоритма. Входными параметрами в алгоблок ALG_SET являются обработанные в алгоблоке ALG_OBR сигналы от указателей положения клапанов БРУ-К и датчика уровня в конденсаторе, вычисленная в алгоблоке ALG_NAGR величина сброшенной нагрузки, а также команды по переключению режима работы САР БРУ-К и изме-

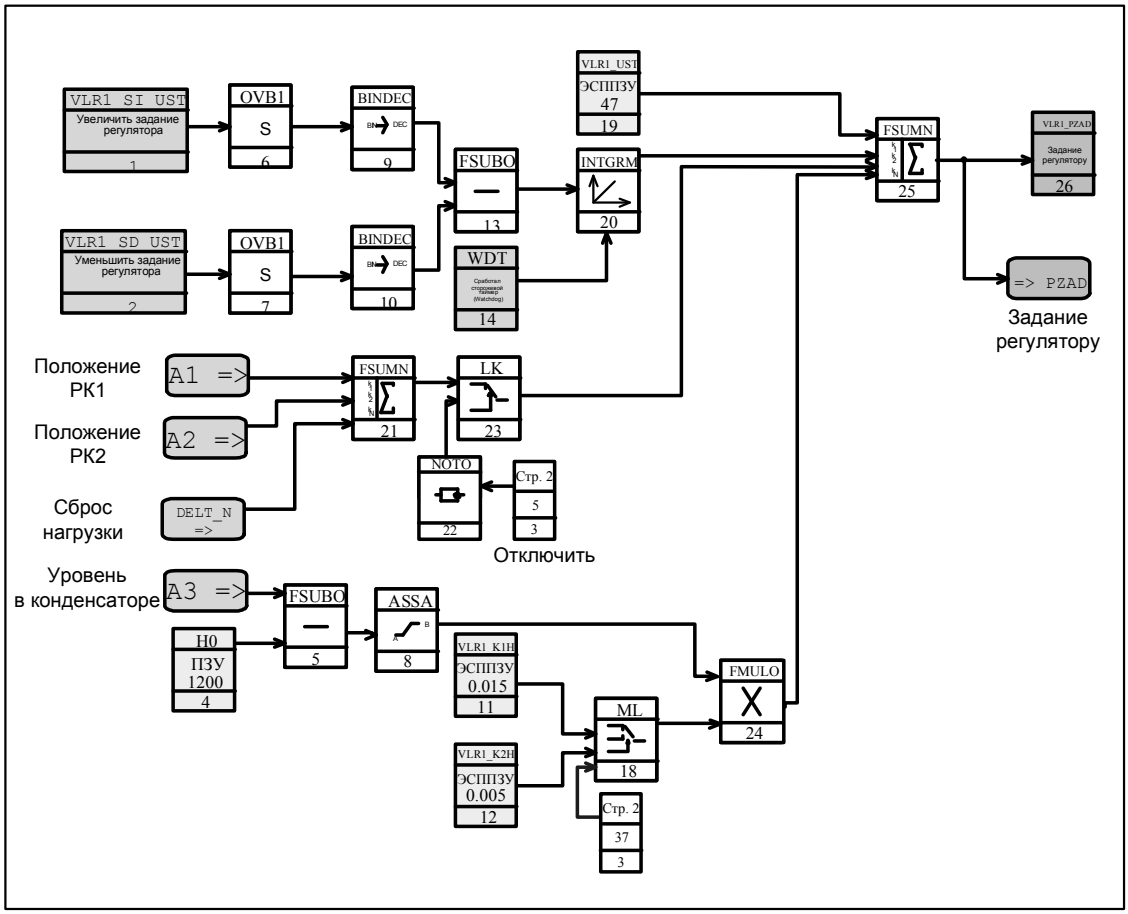

Рис. 2. Структура алгоблока ALG_SET формирования задания регулятору

нению задания. На выходе алгоблока ALG_SET формируется задание давления в ГПК, поступающее в алгоблок ALG_REG. Используемые в алгоблоках параметры настройки хранятся в электрически стираемом программируемом постоянном запоминающем устройстве (ЭСППЗУ) ВЛР-2.1.

На рис. 3 показана реализация на языке Teprol входящего в состав алгоблока ALG_REG импульсного ПД-преобразователя, осуществляющего собственно функцию импульсного регулирования, выполненного так же, как на традиционных средствах, на основе трехпозиционного релейного звена с гистерезисом, охваченного обратной связью в виде апериодического звена первого порядка.

На испытательном стенде ЗАО «Автоматика-Э» проведены динамические испытания по оценке качества регулирования САР БРУ-К и соответствия техническим требованиям. В результате проведенных исследований выработаны рекомендации по оптимизации настройки САР БРУ-К. При этом учитывалось следующее.

С одной стороны, при резком снижении потребления пара турбогенератором должно производиться быстрое открытие РК БРУ-К, обеспечивая немедленный сброс пара в конденсатор турбины. С другой стороны, быстрое перемещение РК может привести к недопустимому падению давления в ГПК (перерегулированию) и срабатыванию блокировки на отключение САР БРУ-К. Кроме того, необходимо по технологическим соображениям по возможности уменьшить количество срабатываний исполнительных механизмов РК БРУ-К при стабилизации давления.

Поэтому для выбора оптимальных настроек принят интегральный показатель качества, позволяющий учесть все названные факторы

$$J_3 = \int_0^T (\varepsilon^2 + (5u)^2 dt ,$$

где ε—величина отклонения давления в ГПК от заданного значения; u—выходной сигнала регулятора на ИМ; t—текущее время; T—верхний предел интегрирования, выбираемый не меньше времени переходного процесса.

Как видно из рис. 4а, критерий J_3, представляет собой сумму следующих показателей: J_1 (оценивающего величину ε), и рассматриваемого в установившемся режиме J_2 (учитывающего с весовым коэффициентом выход регулятора u). Минимизация принятого показателя качества J_3 позволяет обеспечить быстродействие системы, отсутствие перерегулирования, а также уменьшение количества срабатываний ИМ.

Кроме вышеизложенного, необходимо также принять во внимание, что основным рабочим режимом САР БРУ-К является так называемый пульсирующий режим, в котором выходная величина контура обратной связи следует за входной величиной регулятора, отличаясь от нее при движении ИМ в одном направлении на небольшую приблизительно постоянную величину. При этом ИМ включается несколько раз подряд в одном направлении, пока рассогласование не уменьшится до величины зоны нечувствительности.

В пульсирующем режиме при некоторых настройках САР БРУ-К в контуре регулирования могут возникнуть автоколебания, недопустимые в условиях нормальной эксплуатации как по технологическим соображениям, так и из-за опасности перегрева электродвигателя от частых реверсивных включений

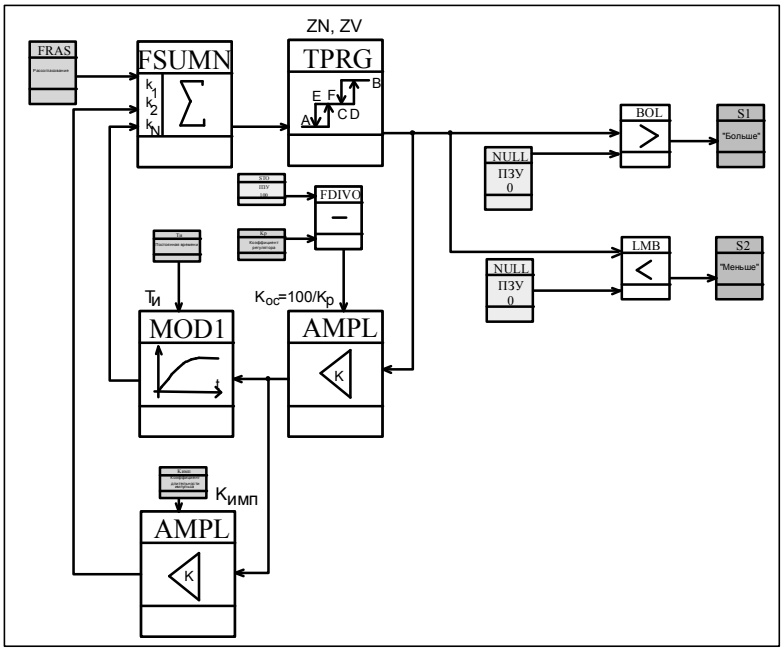

Рис. 3. Структура импульсного ПД-преобразователя

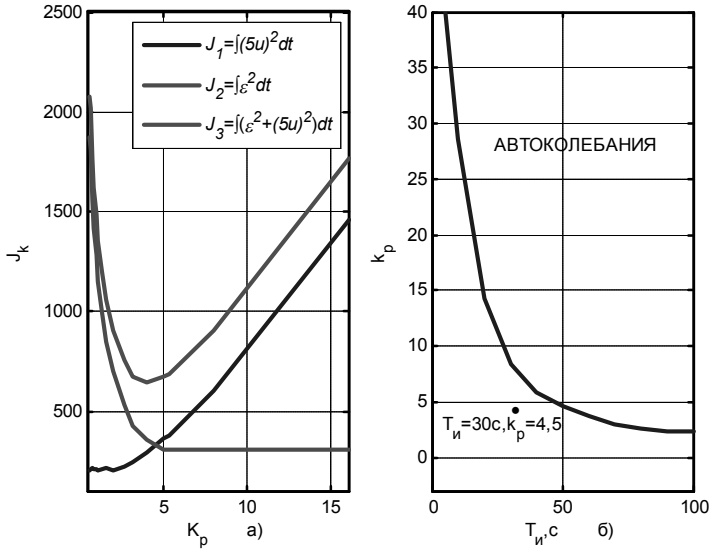

Рис. 4. Графики для выбора параметров настройки САР БРУ-К:
а — показатели качества работы, б — область рекомендуемых настроек k_p и $T_и$

и усиленной амортизации подвижных элементов исполнительного механизма.

По результатам динамических испытаний были определены области без автоколебаний для настроек основных параметров контура регулирования: коэффициента передачи регулятора k_p, постоянной времени T_u (рис. 4б) и коэффициента длительности импульса $k_{имп}$ (рис. 5).

На основе полученных результатов была выполнена оптимизация настройки контура регулирования САР БРУ-К и выработаны рекомендации для ее осуществления. Рекомендуется осуществлять оптимизацию настройки системы с помощью следующих последовательно выполняемых этапов.

Сначала устанавливается постоянная времени T_u в соответствии с постоянной времени объекта управления $T_{об}$, являющегося по динамическим характеристикам апериодическим звеном для технологического параметра — давления в ГПК. Определяется $T_u = (0{,}6-0{,}8)T_{об}$, как принято в практике наладочных работ для ПИ-регуляторов. Затем выбирается коэффициент передачи регулятора k_p, минимизирующий принятый интегральный показатель качества регулирования и находящийся в области отсутствия автоколебаний в системе (рис. 4). Далее из условия отсутствия автоколебаний выбирается желаемая длительность импульса по зависимости $t_{имп} = f(k_р, T_и)$ (рис. 5а) и, наконец, по графику на рис. 5б устанавливается соответствующий коэффициент $k_{имп} = f(k_р)$.

На рис. 6 представлены полученные при проведении испытаний на моделирующем стенде динамические процессы в САР БРУ-К с установленными оптимальными параметрами. Возмущающее воздействие отрабатывается системой в соответствии с требованиями к протеканию проверяемого технологического режима III.

Динамические испытания ПТК САР БРУ-К, построенного на базе цифровых регуляторов ВЛР 2.1,

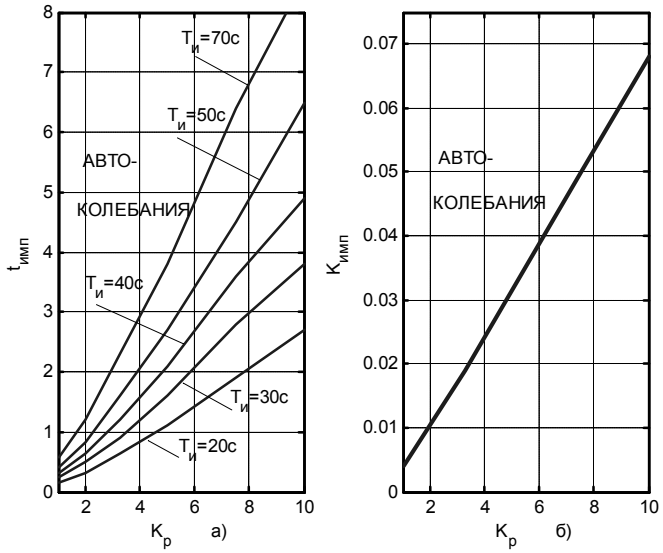

Рис. 5. Графики для выбора длительности импульса – зависимости:
а – $t_{имп} = f(k_р, T_и)$**, б –** $k_{имп} = f(k_р)$

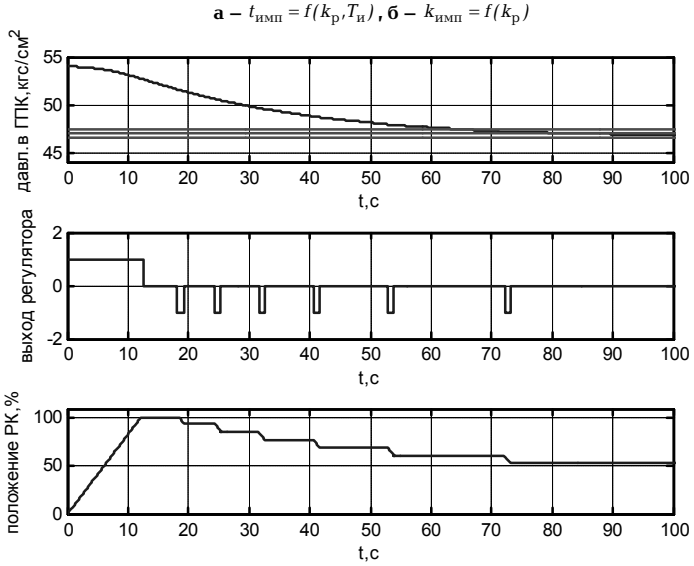

Рис. 6. Переходные процессы в САР БРУ-К при проведении испытаний

подтвердили выполнение требований к функционированию системы в различных эксплуатационных режимах.

Следует отметить, что высокий уровень диагностики состояния технических средств ПТК, технологического оборудования и параметров объекта управления, реализованный при построении ПТК САР БРУ-К, а также возможность регистрации и архивирования событий, возникающих в системе, позволяют повысить показатели надежности и улучшить качество протекания динамических режимов на энергоблоке.

Библиографический список

1. Иванов, В.А. Регулирование энергоблоков / В.А. Иванов. – Л.: Машиностроение, Ленингр. отд-ние, 1982. – 311 с.

2. НП-026-04 Требования к управляющим системам, важным для безопасности атомных станций. – М.: Технорматив, 2007. – 6 с.

3. Трофимов, А.И. Принципы построения автоматических регуляторов теплоэнергетических процессов АЭС / А. И. Трофимов, Н.Д. Егупов, Я.В. Слекеничс. – М.: Энергоатомиздат, 1999. – 340 с.

4. Раскин, Е.М. Инструментальный комплекс проектирования систем управления ЯЭУ на базе средств СПА-ПС. / Е.М. Раскин, Л.А. Денисова, М.И. Федосеев // Математические модели для исследования и обоснования характеристик оборудования и ЯЭУ в целом при их создании и эксплуатации: тез. докл. семинара НТС Минатома России «Динамика, теплогидравлика и безопасность реакторов и АЭС». – Гатчина: НИТИ, 2000. – С. 175 – 177.

РАСКИН Евгений Михайлович, кандидат технических наук, директор ЗАО «Автоматика-Э», доцент кафедры «Автоматизированные системы обработки информации и управления» Омского государственного технического университета.

ДЕНИСОВА Людмила Альбертовна, кандидат технических наук, доцент кафедры «Автоматизированные системы обработки информации и управления» Омского государственного технического университета, старший научный сотрудник ЗАО «Автоматика-Э».

ШИПИЛОВА Жанна Владимировна, инженер системотехнического отдела ЗАО «Автоматика-Э».

Адрес для переписки: 644050, г. Омск, пр. Мира, 11.

Статья поступила в редакцию 04.06.2010 г.

© Е. М. Раскин, Л. А. Денисова, Ж. В. Шипилова