

## СОВМЕСТНЫЕ ИСПЫТАНИЯ АРМР И ЭЧСР НА ЭНЕРГОБЛОКАХ АЭС

Люльчак В. В., Малышев В. В., Мезенцев П. П., Саньков А. А.  
Московский филиал «Центратомтехэнерго» АО «Атомтехэнерго», г. Москва, Россия

Устойчивость работы и качество поддержания основных технологических параметров энергоблока в стационарном режиме и, особенно, в переходных режимах напрямую зависят от качества настройки основных регуляторов энергоблока – автоматического регулятора мощности реактора (АРМР) и электронной части системы регулирования (ЭЧСР). Законы регулирования АРМР и ЭЧСР в основных эксплуатационных режимах приведены в таблице 1, и одной из особенностей взаимодействия систем является различие на порядок в характерных временах процессов в зависимости от выбранной программы управления «турбина следует за реактором» или «реактор следует за турбиной» (от единиц до десятков секунд).

Таблица 1 – Основные эксплуатационные режимы АРМР и ЭЧСР

Режим работы		Параметр регулирования	Закон регулирования
АРМР	«Н»	Мощность РУ	Релейный трехпозиционный
	«Т»	Давление пара в ГПК	Внешний ПИ-закон к контуру по $N_{ру}$ или импульсный ПИ-закон с обратной связью по $N_{ру}$
ЭЧСР	«РД»	Давление пара в ГПК	ПИ-закон по положению РК с первичной составляющей по частоте вращения
	«РМ»	Мощность ТГ	

Проведение совместных испытаний АРМР и ЭЧСР ставит целью определение таких параметров настройки АРМР и ЭЧСР в стационарных и переходных режимах, при которых достигалось бы максимальное быстродействие совместной работы АРМР и ЭЧСР при отсутствии колебательности переходных процессов. С точки зрения теории автоматического управления для настройки АРМР и ЭЧСР энергоблок, как объект управления, представляется многосвязным объектом. Скоординированное управление энергоблоком двумя системами осложняется следующими факторами:

- зависимость характеристик объекта управления от уровня мощности (таблица 2);
- смена заданных значений регулируемых параметров при автоматических и ручных изменениях режимов работы АРМР и ЭЧСР;
- собственно многосвязность объекта управления за счет наличия внутренних перекрестных связей по технологическому параметру (давление пара в ГПК).

Первый фактор обусловлен изменением дифференциальной эффективности ОР СУЗ, смещением рабочей точки по расходной характеристике РК ТГ, изменением состава подключенного технологического оборудования энергоблока. В таблице 2 приведена вариация параметров объекта управления в диапазоне от 50 до 100 %  $N_{ру}$ . Данная особенность компенсируется автоподстройкой параметров регуляторов в зависимости от уровня мощности или установкой компромиссных параметров настроек в случае незначительной вариации параметров объекта. Принятием в качестве заданных значений.

Таблица 2 – Вариация параметров объекта управления в диапазоне от 50 до 100 %  $N_{PY}$

Режим работы		Коэффициент передачи	Постоянная времени
АРМР	«Н»	0,4...0,7% $N_{PY}$ на 1% хода ОР СУЗ	Релейный трехпозиционный
	«Т»	0,2...0,3 кгс/см <sup>2</sup> ·мин на 1% хода ОР СУЗ	100...60 с
ЭЧСР	«РД»	0,5...0,2 кгс/см <sup>2</sup> ·мин на 1% хода РК ТГ	10...15 с
	«РМ»	2,5...0,7% $N_{TG}$ на 1% хода РК ТГ	1...1,5 с

Примечание – оценка параметров дана на основе результатов совместных испытаний АРМР и ЭЧСР на энергоблоке № 3 Ростовской АЭС.

Второй фактор заключается в возможном возникновении несоответствия заданных значений при ручной и автоматической смене режимов работы основных регуляторов, что имеет место в переходных (динамических) режимах энергоблока. Данная особенность компенсируется настройкой диапазонов отслеживания заданного значения и специальным алгоритмом отслеживания заданного значения регулятора, когда в качестве заданного значения принимается текущее значение технологического параметра, взятое за несколько секунд до автоматической смены режима работы.

Непосредственно проблематика комплексной наладки основных регуляторов обусловлена третьим фактором, многосвязностью, и выражается в том, что за счет взаимосвязи по технологическому параметру изменение параметров настройки одной системы приводит к изменению запаса устойчивости смежной системы. Так, например, достижение оптимального с точки зрения критериев качества переходного процесса по электрической мощности повышает колебательность процесса регулирования давления пара во втором контуре от АРМР в режиме «Т».

В действительности, ни одна из перекрестных передаточных функций  $W_{jk}(s)$  ТОО, изображенного на рисунке 1, не равна нулю. Это значит, что при выборочном возмущении любого из входных параметров 1 или 2 и неизменном значении другого входного параметра эти возмущения передаются на все выходы 1, 2 и 3.

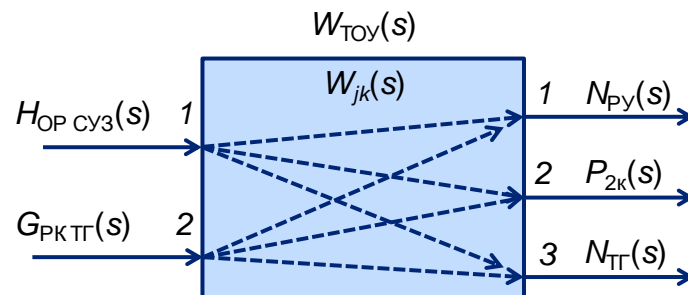


Рисунок 1 – Структурная схема энергоблока, как многосвязного объекта управления

Структурная схема замкнутой САУ в различных режимах работы АРМР и ЭЧСР представлена на рисунках 2 и 3. В теории полная автономность контуров регулирования достигается подбором таких перекрестных связей  $W_{комп}(s)$  внутри регулятора, при которых перекрестные передаточные функции замкнутой системы обращаются в ноль. При условии полной автономности контуров регулирования каждый контур не нуждается в подстройке после изменения параметров настройки другого контура.

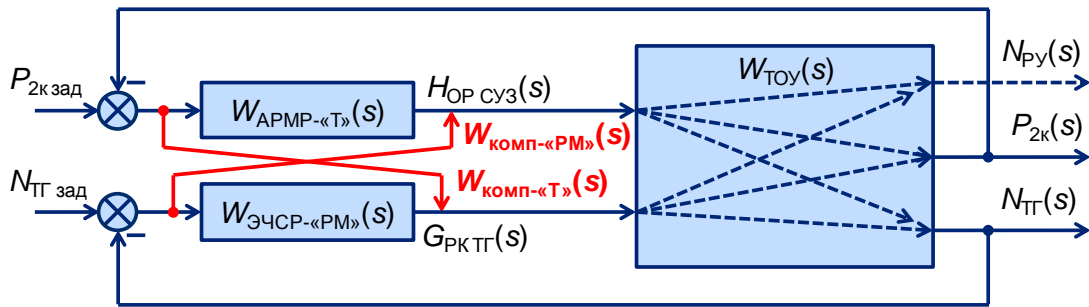


Рисунок 2 – Структурная схема управления энергоблоком как многосвязной САР для режима «реактор следует за турбиной»

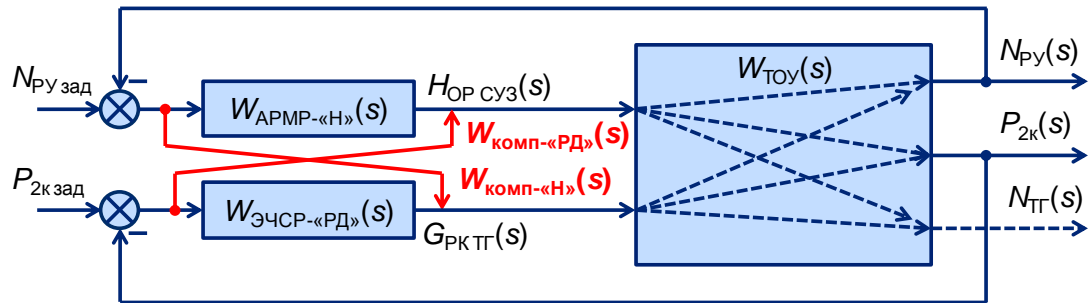


Рисунок 3 – Структурная схема управления энергоблоком как многосвязной САР для режима «турбина следует за реактором»

На практике, достижение даже односторонней автономности (когда достигается автономность только одного контура) нереализуемо в полном объеме, так как функции необходимых для этого корректирующих звеньев содержали бы дифференцирующие звенья высокого порядка. В упрощенном виде, когда достигается не полная эквивалентность исходной и развязанной по управляющим воздействиям САР, данный метод применяется на объектах теплоэнергетики. Наиболее простым примером является пропорциональный ввод сигнала рассогласования турбинного регулятора (ЭЧСР) в обратную связь регулятора мощности реактора (или котла для ТЭС). При работе энергоблока с постоянным давлением второго конура данный корректирующий сигнал одновременно является и форсирующим, и стабилизирующим.

На типовых проектах АЭС данный подход не применяется по причине изначально запланированной работы на стационарном уровне мощности, и, следовательно, отсутствию жестких требований по динамике выдачи мощности. Изменение принятой концепции построения АРМР и ЭЧСР на существующих АЭС на данный момент так же нецелесообразно, и осложнялось бы по следующим причинам:

- отсутствие расчетов по обоснованию безопасности основных режимов энергоблока с измененными алгоритмами работы основных регуляторов;
- изначально низкий уровень интеграции, реализация основных регуляторов на разной технике, исходя из условий их полной автономности.

По перечисленным выше причинам настройка АРМР и ЭЧСР на энергоблоках АЭС в процессе совместных испытаний проходит итерационно. По опыту проведения совместных испытаний АРМР и ЭЧСР на энергоблоках № 3, № 4 Калининской АЭС и № 2, № 3 Ростовской АЭС определена оптимальная последовательность внесения возмущений в различных комбинациях исходных режимов работы АРМР и ЭЧСР, достаточная для достижения указанной цели:

- проверка переключения режимов работы АРМР и ЭЧСР;
- проверка автоматического перехода АРМР из режима «Н» в режим «Т» по повышению давления в ГПК;

- проверка совместной работы АРМР и ЭЧСР внесением возмущения изменением заданного значения давления в ГПК в АРМР. Исходный режим АРМР – «Т», режим ЭЧСР – «РМ»;
- проверка совместной работы АРМР и ЭЧСР внесением возмущения изменением заданной мощности генератора в ЭЧСР. Исходный режим АРМР – «Т», режим ЭЧСР – «РМ»;
- проверка совместной работы АРМР и ЭЧСР внесением возмущения изменением заданного значения давления в ГПК в ЭЧСР. Исходный режим АРМР – «Н», режим ЭЧСР – «РД»;
- проверка совместной работы АРМР и ЭЧСР внесением возмущения перемещением ОР СУЗ. Исходный режим АРМР – «Н», режим ЭЧСР – «РД».

Из-за наличия зависимости характеристик объекта управления от уровня мощности, указанная последовательность испытания повторяется на разных уровнях мощности от 50 до 100 %  $N_{ном}$  мощности РУ. Параметры настройки основных регуляторов корректируются, при необходимости, на каждом этапе проведения совместных испытаний.

Для повышения качества взаимодействия АРМР и ЭЧСР по приведению нагрузки РУ в соответствие нагрузке ТГ или наоборот в проектах АСУ ТП применяются различные варианты структур основных регуляторов и решения с осуществлением обмена дополнительными сигналами между подсистемами АСУ ТП. В частности, для обеспечения режимов участия энергоблока в первичном регулировании частоты сети внедряются дополнительные электрические связи между АРМР и ЭЧСР, ЭЧСР и СУЗ (рисунок 4).

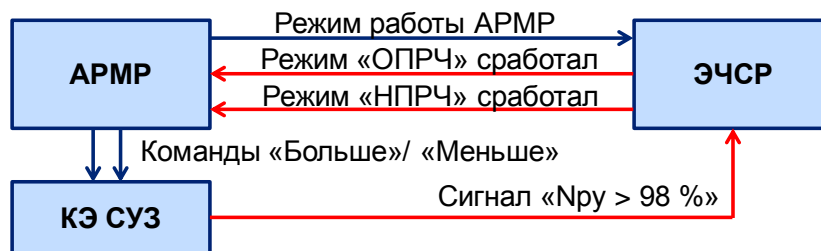


Рисунок 4 – Пример реализации дополнительных электрических связей между АРМР и ЭЧСР

Для достижения большей маневренности оптимальным является объединение основных регуляторов со стороны внешнего устройства, «общеплочного регулятора», принимающего внешнее задание, а также формирующего команды на изменение режимов работы основных регуляторов и упреждающее перемещение регулирующих органов (рисунок 5).

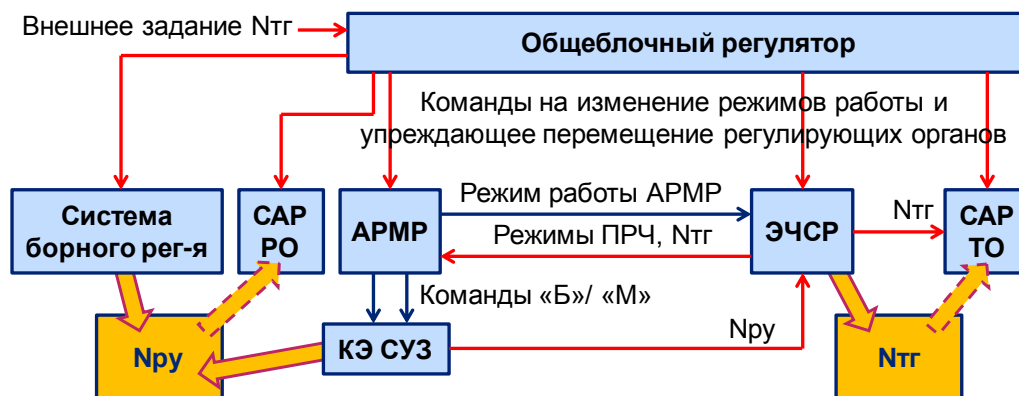


Рисунок 5 – Схема взаимодействия общеплочного регулятора с АСУ ТП энергоблока

В такой системе ЭЧСР принимает внешнее задание (плановое заданное значение мощности ТГ) и корректирует его с учетом ПРЧ и ВРЧ. АРМР на основе внешнего задания в зависимости от принятой программы управления воздействует на выделенную группу ОР. Система борного регулирования упреждающе компенсирует изменение аксиального офсета, вызванное работой АРМР, и последующие эффекты отравления. Для перспективного проекта АЭС ВВЭР-ТОИ концепция общеблочного регулятора разработана Московским филиалом «Центратомтехэнерго» АО «Атомтехэнерго» в рамках НИОКР по обоснованию маневренных режимов энергоблоков проекта ВВЭР-ТОИ.

### **Заключение**

Проведение совместных испытаний АРМР и ЭЧСР, выполняемых Московским филиалом «Центратомтехэнерго» АО «Атомтехэнерго», при вводе энергоблоков АЭС в эксплуатацию на каждом осваиваемом уровне мощности, позволяет достичь и подтвердить устойчивость совместной работы основных регуляторов.

Перспективой развития двух систем является доведение их совместной работы до уровня общеблочного регулятора, применяемого на данный момент только на объектах теплоэнергетики, в современных проектах АЭС (АЭС-2006, ВВЭР-ТОИ) и зарубежных АЭС (PWR-900, PWR-1300, CANDU), то есть на объектах с достигнутым или планируемым высоким уровнем маневренности. Работа такой системы, получающей внешнее задание, будет предполагать автоматический выбор режима работы основных регуляторов и формирование заданного значения для них по специальному закону с целью приведения регулирующих органов в желаемое положение, упреждая задержки и не дожидаясь отклонения регулируемых параметров АРМР, ЭЧСР и локальных САР с ПИ-регуляторами.