

Моделирование аналоговых регуляторов энергблока АЭС с ВВЭР-1000 для кода RELAP5/MOD3.2

А.А.Болибок

Энергоатом Инжиниринг-Сервис
Запорожская обл., г. Энергодар
Украина

тел: (6139) 1-78-91

факс: (6139) 3-89-19

e-mail: eis5@mgw.nppzap.zaporizhze.ua

АННОТАЦИЯ.

В докладе представлено описание модели аналоговых регуляторов на аппаратуре "Каскад-2" и УКТС, используемых при эксплуатации энергблоков АЭС с реакторами ВВЭР-1000. Модель реализована с использованием кода RELAP5/Mod3.2, в рамках проекта ВАБ энергблока N5 ЗАЭС, и предназначена для анализа аварийных переходных процессов.

Выполнен анализ работы модели регуляторов системы подпитки-продувки первого контура в переходных процессах с потерей теплоносителя. В сравнении с реальным инцидентом, происшедшим на ЗАЭС 10.07.98, представлены результаты расчетов "малой" течи теплоносителя первого контура, компенсируемой системой подпитки-продувки.

ВВЕДЕНИЕ.

В данной работе сделана оценка влияния работы модели аналоговых регуляторов для энергоблока АЭС с ВВЭР-1000 при анализе аварийных переходных процессов. Традиционно, при создании моделей энергоблоков уделяется значительное внимание теплофизическим и гидравлическим процессам и недооценивается влияние, оказываемое автоматическими системами управления энергоблока на эти процессы. В некоторых случаях, для того, чтобы корректно оценить действия оператора по оптимальному управлению аварией и выявить возможные ошибки в инструкциях, необходимо, в том числе, иметь точную модель регуляторов энергоблока.

При разработке теплогидравлической модели энергоблока N5 ЗАЭС, в рамках проекта ВАБ, была создана модель аналоговых и цифровых регуляторов для кода RELAP5/Mod3.2, в соответствии с реальными алгоритмами и параметрами настройки. В данной работе представлено описание только модели аналоговых регуляторов 1-го контура. Автор выражает благодарность специалистам Запорожской АЭС и предприятия "ЛьвовОРГРЭС" за помощь в разработке и участие в дискуссиях.

1. Общие положения

Как известно, аналоговые регуляторы на энергоблоке подразделяются по реализации на две группы – это регуляторы 1-го и 2-го контура на аппаратуре "Каскад-2" и УКТС, и нестандартные регуляторы системы СУЗ реактора. Автоматический регулятор мощности реактора АРМ-5С является составной частью системы регулирования мощности энергоблока, совместно с системой ЭГСР и устройством РОМ-2. Эти регуляторы оказывают влияние на переходной процесс, только при работе энергоблока на мощности. Более важной задачей является моделирование регуляторов 1-го и 2-го контура, в том числе аналоговых регуляторов, которые оказывают влияние на энергоблок в течение всего переходного процесса.

На энергоблоках ЗАЭС эксплуатируются следующие основные регуляторы 1-го контура на аппаратуре "Каскад-2" и УКТС:

- Давления 1-го контура – YPC01,05;
- Уровня в компенсаторе давления (КД) – YPC02,03;
- Разности температур теплоносителя в КД и горячих петлях ГЦК в режимах разогрева, расхолаживания – YPC04;
- Расхода продувочной воды 1-го контура – ТКС01,02
- Перепада давления на напоре подпиточных насосов и давления в 1 контуре – ТКС21,22,23;
- Расхода подпиточной воды 1-го контура – ТКС24,25,26;
- Перепада давления на уплотнениях ГЦН – YDC11,21,31,41 и др.

В модели реализованы следующие регуляторы YPC01,02,05; ТКС21-23.

Основным элементом аппаратуры "Каскад-2" и УКТС являются блоки Р-27, настройка которых определяет закон регулирования для каждой системы управления в различных комбинациях (Пропорционально-Интегро-Дифференциальный). Наиболее часто применяются П – пропорциональный и ПИ-пропорционально-интегральный законы регулирования. На вход блока подаются нормированные сигналы с датчиков измерений технологических параметров энергоблока, формируется величина разбаланса и время управляющего воздействия на исполнительный механизм (ИМ). При этом сигналы на ИМ выдаются импульсами или блокируются при формировании технологических запретов и нахождении разбаланса в зоне нечувствительности регулятора.

При реализации алгоритма работы для теплогидравлической модели энергоблока необходимо было решить следующие проблемы, которые не могли быть разрешены стандартными средствами кода RELAP5/Mod3.2 на уровне пользователя:

- Разделение пропорциональной составляющей TSP, которая вычисляется по величине разбаланса EP и интегральной составляющей TSI, которая вычисляется по величине разбаланса, превышающей зону нечувствительности EP/Δ_n для ПИ-закона управления;
- Формирование времени TAU управляющего воздействия на ИМ;
- Выдача импульсов на перемещение ИМ, с учетом блокировок;
- Запоминание времени невыданного воздействия DT с предыдущего такта – временного шага расчета.

Измерения технологических параметров поступают на вход блока Р-27 непрерывно, в виде токовых сигналов. Для расчетного кода необходимо учитывать дискретность сигналов, определяемых

численной схемой, которая в модели учитывается искусственным тактированием и выбором величины такта – временного шага расчета.

Разработка модели каждого аналогового регулятора состояла из следующих этапов:

- Нормировка входных сигналов с датчиков измерений (расчетных теплогидравлических параметров) и вычисление уставок регулятора;
- Вычисление величины разбаланса;
- Формирование блокировок и технологических запретов;
- Вычисление времени управляющего воздействия, в соответствии с законом регулирования;
- Формирование импульсов на выдачу управляющего воздействия на ИМ.

Предполагается, что все регуляторы 1-го контура в модели работают в автоматическом режиме, и временем самобаланса можно пренебречь. Контроль исправности датчиков, формирующих входные сигналы для разбаланса регуляторов, не ведется, так как используются расчетные значения теплогидравлических параметров модели энергоблока.

2. Методы реализации алгоритма работы регуляторов

Рассмотрим методику расчета на примере системы подпитки-продувки 1-го контура, регуляторов подпиточных насосов ТКС21-23 и уровня в КД УРС02.

1. Регуляторы ТКС21-23 предназначены для поддержания заданного перепада давления 20 кгс/см² на регулирующих клапанах уровня КД, т.е. между напорным трубопроводом подпиточных насосов и давлением 1-го контура. Управление осуществляется посредством изменения частоты вращения (воздействием на гидромuftу подпиточных насосов). Каждый из трех подпиточных насосов оснащен индивидуальным регулятором перепада давления. Алгоритм и характеристики работы регуляторов реализованы согласно [5, п.6.4.4].

Предполагается, что изначально в работе находится один насос (ТК21D02) с действующим регулятором ТКС21. По сигналу АВР включается второй насос (ТК23D02), который с задержкой на 15сек увеличивает суммарный расход подпитки до 80м³/ч. В модели рассматривается взаимная работа двух насосов, которые по проекту обеспечивают максимальную пропускную способность тракта подпитки.

2. Регулятор УРС02 предназначен для поддержания заданного количества теплоносителя в первом контуре и уровня в КД. Изменение расхода подпитки 1-го контура осуществляется воздействием на регулирующие клапана ТК31,32S02. Алгоритм и характеристики работы регулятора реализованы согласно [5, п.6.4.2].

Модель первого контура реализована на основе 3-х петлевой схемы. Предполагается, что расход подпитки в каждую петлю составляет 1/4 от общего массового расхода подпитки 1 контура (для 3-й сдвоенной расчетной петли расход 2/4G_{подп}). Поскольку регулирующие клапана уровня КД ТК31,32S02 установлены на байпасных линиях и работают последовательно, в модели они объединены в общий клапан, который работает с общей ход-расходной характеристикой [1, табл.3.1.6]. Также предполагается, что регулятор постоянно находится в работе и время самобаланса может не учитываться. Модель регенеративного теплообменника системы подпитки-продувки (РТО) реализована на граничных условиях, при которых температура подпиточной воды изменяется в зависимости от дебаланса расходов подпитки-продувки, составленной на основе данных эксплуатации [5, п.3.1].

2.1. Нормировка входных сигналов и определение уставок регулятора

В качестве входных сигналов используются расчетные теплогидравлические параметры модели энергоблока, как объекта управления. Для таких параметров, как давление, температура, уровень расход теплоносителя учитываются поправки и нормировочные шкалы датчиков измерений.

Уставки для каждого регулятора формируются на основе постоянных проектных значений или функциональных зависимостей.

1. Для модели регуляторов давления подпиточных насосов ТКС21-23 производится расчет:

- Регулируемого перепада давления по тракту подпитки $\Delta P_{\text{ТЕК}}$;

$$\Delta P_{\text{ТЕК}} = \frac{P_{\text{Подп}} - P_{\text{К}}}{250 \text{ кгс / см}^2} \cdot 100\%$$

- Заданного значения уставки - перепада давления по тракту подпитки $\Delta P_{\text{Зад}}$;

$$\Delta P_{\text{зад}} = \frac{20 \text{ кгс/см}^2}{250 \text{ кгс/см}^2} \cdot 100\% = 8\%$$

- Положения гидромурфты в зависимости от частоты вращения вала насоса;

$$f_{i-1} = f_{\text{min}} + \frac{(f_{\text{max}} - f_{\text{min}})}{100\%} \cdot S_{\text{ТЕК}} = 1850 + 70,5 \cdot S_{i-1}$$

$$S_{i-1} = A_0 + A_1 \cdot f_{i-1}$$

где S_{i-1} - положение гидромурфты на предыдущем врем.шаге, %

f_{i-1} - частота вращения на предыдущем врем.шаге, об/мин

$f_{\text{min}}=1850$ об/мин

$f_{\text{max}}=8900$ об/мин

$A_0=-26.24113475$

$A_1=14.1843972-03$

- Начальное положение гидромурфты подпиточного насоса $S_0=90\%$.

2. Для модели регулятора уровня в КД УРС02 производится расчет:

- Текущего значения весового уровня в КД, который учитывает температурную коррекцию;

$$L_{\text{ТЕК}} = \frac{L_{\text{ВЕС}}^{\text{КД}}}{11.4} \cdot 100\%$$

- Заданного значения уровня в КД, согласно зависимости от максимальной средней температуры по петлям ГЦТ, представленной на Рис.1 [5];

$$L_{\text{зад}} = \frac{L_{\text{УСТ}}}{11.4} \cdot 100\% = 8\%$$

$$L_{\text{УСТ}} = f(T_{\text{СР}}^{\text{max}})$$

- Массового расхода подпитки 1к $G_{\text{подп}}$, нормированного на диапазон измерения расхода подпитки, с учетом коэффициента ввода расхода подпитки в формулу материального баланса:

$$G_{\text{подп}} = k_1 \cdot \frac{G_{\text{ТЕК}}^{\text{подп}}}{100\text{т/ч}} \cdot 100\%$$

- Массового расхода продувки 1к $G_{\text{прод}}$, нормированного на диапазон измерения расхода продувки, с учетом коэффициента ввода расхода продувки в формулу материального баланса:

$$G_{\text{прод}} = k_2 \cdot \frac{G_{\text{ТЕК}}^{\text{прод}}}{80\text{т/ч}} \cdot 100\%$$

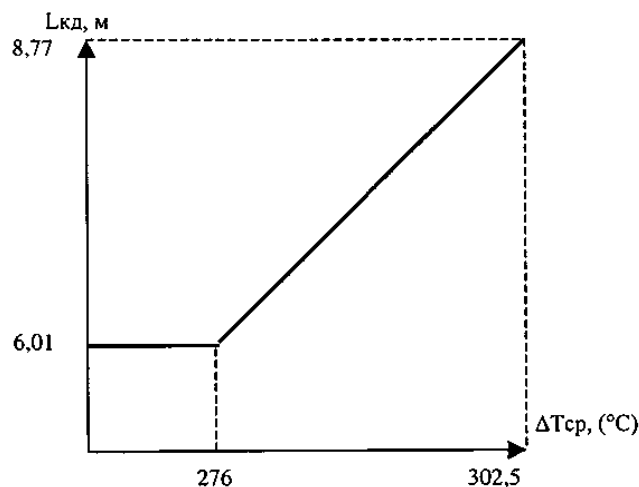


Рис.1. Зависимость уставки для регулятора уровня КД.

Для регулятора уровня в КД предполагается, что в сигнале материального баланса 1-го контура не участвуют расходы подачи и слива уплотняющей воды ГЦН. Это незначительно отражается на расчете, так как вода уплотнений ГЦН не попадает в 1-й контур.

2.2. Вычисление величины разбаланса

Величина разбаланса определяет степень отклонения регулируемого параметра от заданного значения (уставки).

1. Для модели регуляторов давления подпиточных насосов ТКС21-23 расчет суммарного разбаланса производится по формуле:

$$EP = \alpha_1 \cdot (\Delta P_{\text{ТЕК}} - \Delta P_{\text{Зад}}) + \alpha_2 \cdot (S_{i-1} - S_0)$$

где $\alpha_1=1$ - коэффициент ввода сигнала по давлению;

$\alpha_2=0.02$ - коэффициент ввода сигнала обратной связи по положению ИМ;

$S_0=90\%$ - начальное положение гидромурфты, %

Демпфирование величины разбаланса осуществляется в модели с помощью контрольной переменной RELAP LAG, со временем $T_d=3$ сек:

$$EPD = \int_0^t \left(\frac{EP - EPD}{T_d} \right) \cdot dt = \text{LAG}(EP, T_d)$$

2. Для модели регуляторов уровня в КД УРС02 расчет суммарного разбаланса производится по формуле:

$$EP = \alpha_1 \cdot (G_{\text{ПОДП}} - G_{\text{ПРОД}}) + \alpha_2 \cdot (L_{\text{ТЕК}} - L_{\text{Зад}})$$

где $\alpha_1=0.5$ - коэффициент ввода сигнала по материальному разбалансу;

$\alpha_2=1$ - коэффициент ввода сигнала по уровню КД;

Демпфирование величины разбаланса осуществляется в модели с помощью контрольной переменной RELAP LAG, со временем $T_d=6.6$ сек:

$$EPD = \int_0^t \left(\frac{EP - EPD}{T_d} \right) \cdot dt = \text{LAG}(EP, T_d)$$

2.3. Формирование блокировок и запретов

Управляющее воздействие регулятора может быть прервано достижением определенных условий (значений технологических параметров), при которых регулятор отключается от привода ИМ. Такие сигналы подразделяются на два типа: технологические запреты (по уставкам защит и блокировок энергоблока) и блокировки выдачи управляющего воздействия, сформированные внутри регулятора. Блокировки регулятора формируются при достижении разбаланса EP зоны нечувствительности $\pm \Delta_H$ или, если время управляющего воздействия TAU меньше $T_{\text{min}}=0.1$ сек. Минимальное время хода выбирается из условий работы ИМ. Условие технологического запрета формируется в модели при достижении расчетных значений теплогидравлических параметров определенных уставок. При выполнении одного из этих условий значение TAU обнуляется.

2.4. Вычисление времени управляющего воздействия и выдача импульсов на ИМ

Время воздействия TAU для рассматриваемых регуляторов вычисляется в соответствии с ПИ-законом управления, который реализуется в разностной форме, с учетом тактирования – временного шага RELAP. Далее представлено общее описание алгоритма работы регулятора на одном расчетном шаге:

- Время управляющего воздействия на ИМ вычисляется, как сумма пропорциональной TSP и интегральной TSI составляющих, с учетом времени невыданного воздействия с предыдущего временного шага:

$$TAU = (TSP + TSI) \cdot K_p + DT = (EPD - EPDX + \frac{(EPD - \Delta_H) \cdot dt}{T_i}) \cdot K_p + DT$$

где EPD - EP демпфированное на текущем временном шаге, %

EPDX - EP демпфированное на предыдущем временном шаге, %

Δ_H - зона нечувствительности, %

K_p - коэффициент усиления, сек/%
 DT - время невыданного воздействия на пред. временном шаге, сек

- Блокировка управляющего воздействия TAU посредством умножения на 0 при выполнении одного из следующих логических условий δ_1 - разбаланс в пределах зоны нечувствительности или δ_2 - технологический запрет:

$$TAU_{\delta} = TAU(\delta_1 \oplus \delta_2)$$

- Блокировка управляющего воздействия TAU_{δ} посредством умножения на 0 при выполнении логического условия по T_{min} δ_3 - время $abs(TAU_{\delta}) < 0.1$ сек:

$$TAU_{\delta\delta} = TAU_{\delta}(\delta_3)$$

- В случае если $TAU_{\delta\delta} \neq 0$, определение знака управляющего воздействия:

$$TAU_{\delta\delta} < 0 \text{ - "БОЛЬШЕ"},$$

$$TAU_{\delta\delta} > 0 \text{ - "МЕНЬШЕ"}$$

$$sign(TAU_{\delta\delta}) = \frac{TAU_{\delta\delta}}{abs(TAU_{\delta\delta}) + 1 \cdot 10^{-10}}$$

- Выдача управляющего воздействия и запоминание остатка DT производится только при ложном условии δ_3 - отсутствии блокировки по T_{min} , за счет вычитания из $TAU_{\delta\delta}$ текущего временного шага:

$$DT = sign(TAU_{\delta\delta}) \cdot [abs(TAU_{\delta\delta}) - dt + dt \cdot \delta_3]$$

где $\delta_3 = 1$ при выдаче управляющего воздействия на "МЕНЬШЕ" (иначе $\delta_3 = 0$);

Таким образом, выдача управляющих воздействий осуществляется импульсами, с частотой не менее T_{min} и длительностью, в течение которой величина TAU находится за пределами зоны нечувствительности регулятора.

1. Для модели регуляторов давления подпиточных насосов ТКС21-23 реализован механизм постоянной скорости ИМ. При сигнале на перемещение ИМ (гидромуфты) следует уменьшение или увеличение числа оборотов насоса. Приращение частоты вращения к текущему значению осуществляется с постоянной скоростью $\pm V$, исходя из полного времени сервомотора гидромуфты 160сек.

$$V = \frac{8900 - 1850}{160} = 44.0625 \frac{\text{об / мин}}{\text{сек}}$$

Частота вращения на текущем временном шаге f_i определяется следующим образом:

$$f_i = f_{i-1} - V \cdot dt(0) \cdot \delta^- + V \cdot dt(0) \cdot \delta^+$$

где $\delta^- = 1$ при выдаче управляющего воздействия на "МЕНЬШЕ" (иначе $\delta^- = 0$);

$\delta^+ = 1$ при выдаче управляющего воздействия на "БОЛЬШЕ" (иначе $\delta^+ = 0$);

Для моделирования поля работы подпиточного насоса используется понятие смещенного напора.

По текущей частоте вращения и давлению на напоре насоса (из предположения постоянного давления на всасе насоса 6 кгс/см^2) определяется смещенный напор H_{max} , приведенный к максимальной частоте вращения 8900 об/мин:

$$H_{max} = (P_{напора} - 6) \cdot \frac{(8900)^2}{(f_i)^2}$$

Определение объемного расхода подпитки 1 контура, при текущей частоте вращения, осуществляется по величине смещенного напора H_{max} с использованием паспортной напорной характеристики насоса для максимальной частоты [5, табл.3.1.4]. Определение суммарного расхода от двух насосов подпитки, при включении резервного насоса по АВР производится из предположения перехода основного насоса в режим поддержания постоянного расхода $65 \text{ м}^3/\text{ч}$. Резервный насос включается в режим поддержания давления и обеспечивает максимальную пропускную способность линии подпитки $80 \text{ м}^3/\text{ч}$. Полученный суммарный расход, с учетом плотности холодной жидкости до РТО, переводится в массовый расход и используется в качестве управляющей контрольной переменной в модели насоса подпитки ($tmdrjun$).

Кроме того, в модели предусмотрена возможность подачи раствора из баков запаса борного концентрата 40 г/кг , на всас насосов подпитки. Такое переключение может быть выполнено имитацией действий оператора.

2. Для регулятора уровня в КД УРС02 сигнал на перемещение ИМ (регулирующих клапанов подпитки) формируется при условии ненулевого значения ТАУ, с учетом положительного или отрицательного знака на закрытие ("МЕНЬШЕ") или на открытие ("БОЛЬШЕ") клапанов соответственно.

Изменение расхода подпитки осуществляется импульсным перемещением штока клапанов (изменением площади проходного сечения) с постоянной скоростью $\pm V$, которая определяется ходом штока и временем полного открытия/закрытия последовательно двух клапанов по 35сек каждый.

3. Работа модели регуляторов системы подпитки-продувки первого контура в переходном процессе.

На следующем этапе разработки модели аналоговых регуляторов 1-го контура была выполнена проверка представленной методики в переходном процессе. Расчеты проводились на модели энергоблока N5 ЗАЭС, разработанной в рамках проекта ВАБ.

Необходимо оценить насколько эффективно работает модель регуляторов в динамике, и сравнить расчет с данными измерений технологических параметров энергоблока. Для этой цели был выбран переходной процесс, в котором регуляторы системы подпитки-продувки играют наиболее важную роль.

Нарушение 6ЗАП-П02-13-07.98 "Течь теплоносителя первого контура, компенсируемая системой подпитки-продувки" произошло на блоке N6 ЗАЭС 10.07.98. Исходным событием послужило разрушение узла крепления полуси обратного клапана на трубопроводе впрыска компенсатора давления.

Возможный максимальный диаметр проходного сечения отверстия по результатам замера на клапане составил 12мм. Расчетный диаметр течи 11мм определен на начальной стадии процесса расчетным путем по скорости снижения уровня в КД до срабатывания аварийной защиты реактора.

Далее представлено описание последовательности основных событий в процессе инцидента.

| | |
|----------|-----------------------------------------------------------------------------------------------------------------------|
| 20:53:57 | Формирование сигналов "Дебаланс подпитки-продувки", "Повышение давления в ГО > 0.0015". Включение 1-3 групп ТЭН КД. |
| 21:05:26 | Сброс ОР СУЗ аварийной защиты от КУ БЩУ действием оператора. |
| 21:05:36 | Посадка СК ТА-6 от КУ БЩУ действием оператора. |
| 21:05:36 | Начало работы БРУ-К. |
| 21:06:04 | Включение резервного насоса подпитки 1 контура (АВР) по повышению расхода подпитки до 65м ³ /ч. |
| 21:06:19 | Отключение групп ТЭН КД по снижению уровня в КД ниже 4.2м. |
| 21:06:47 | Закрытие БРУ-К. |
| 21:07:00 | Снижение уровня в КД менее 4.0м. Нарушение предела безопасной эксплуатации по уровню в КД. |
| 21:09:20 | Закрытие клапанов продувки 1 контура действием оператора. |
| 21:10:52 | Снижение температуры подпиточной воды 1 контура до 80°C. Открытие клапанов продувки 1 контура действием оператора. |
| 21:25:41 | Начало работы БРУ-К. |
| 21:26:16 | Отключение ГЦН-2 |
| 21:41:03 | Закрытие БРУ-К. |
| 22:26:00 | Стабилизация параметров 1 контура ($P_{1к}=120\text{кгс/см}^2$, $L_{кд}=6\text{м}$, $T_{1к}=270^\circ\text{C}$). |

Таблица 1. Значения основных параметров энергоблока N6 и расчетной модели до начала нарушения.

| Параметр | Измерение | Расчет |
|-----------------------------------------------------|-----------|--------|
| Мощность РУ по ИК, МВт | 3005 | 3000 |
| Давление на выходе из акт.зоны, кгс/см ² | 160.3 | 159.9 |
| Давление в ГПК, кгс/см ² | 60.0 | 60.0 |
| Уровень в КД, м | 8.69 | 8.77 |
| Ср.температура т/н 1к в горяч. нитках, °С | 319.8 | 320.0 |
| Ср.температура т/н 1к в холодн.нитках, °С | 287.2 | 289.8 |
| Уровни в парогенераторах (4 метра), м | | |
| • ПГ-1 | 2.57 | 2.13 |
| • ПГ-2 | 2.54 | 2.17 |
| • ПГ-3 | 2.45 | 2.17 |
| • ПГ-4 | 2.59 | 2.13 |

| | | |
|-------------------------------------|-------|-------|
| Расходы питательной воды на ПГ, т/ч | | |
| • ПГ-1 | 1473 | 1478 |
| • ПГ-2 | 1442 | 1450 |
| • ПГ-3 | 1516 | 1450 |
| • ПГ-4 | 1390 | 1481 |
| Температура пит.воды ПГ, °С | 219.6 | 220.0 |
| Температура подпиточной воды 1к, °С | 259.9 | 265.5 |
| Расход подпитки 1 контура, м³/ч | 18.3 | 22.1 |
| Расход продувки 1 контура, м³/ч | 21.6 | 21.6 |

В работе находилось следующее основное оборудование: 4 ГЦН (YD10-40D01), 4 ПГ (YB10-40W01), 2 ТПН (RL41,42D01), ТГ (ЭГСР), регуляторы питания ПГ и производительности ТПН, регуляторы давления 1-го контура и уровня в КД (в работе 1,2 группы ТЭН КД) – в автоматическом режиме.

В расчете приняты следующие допущения:

- Место течи выбрано с учетом расположения обратного клапана на трубопроводе впрыска КД;
- Модель регенеративного теплообменника системы подпитки-продувки (РТО) реализована на граничных условиях, при которых температура подпиточной воды изменяется в зависимости от дебаланса расходов подпитки-продувки;
- Перед началом переходного процесса в модели работает одна 1-я группа ТЭН КД;
- Параметры стационарного состояния модели незначительно отличаются от состояния энергоблока перед началом нарушения;
- Поскольку используется 3-х петлевая схема (2-я и 3-я петли объединены), моделирование работы оборудования 2-й петли энергоблока (работа регуляторов питания ПГ-2 и отключение ГЦН-2) выполнено на одиночной расчетной петле;
- Действия оператора реализованы по времени зарегистрированных событий.

Результаты расчета будут представлены с точки зрения анализа работы регуляторов 1-го контура. Следует отметить, что в модели реализованы только регуляторы давления 1-го контура, уровня в КД, и давления на напоре подпиточных насосов. В данном переходном процессе не вступают в работу регуляторы впрыска в КД и регуляторы расхолаживания компенсатора давления.

Открытие течи в расчете принято после 60 сек. До 756 сек. энергоблок находится на мощности, при этом наблюдаются следующие процессы:

- ТЭН КД включаются по проектным уставкам при снижении давления в 1-м контуре;
- Медленное снижение уровня в КД;
- Увеличение расхода подпитки и появление дебаланса расходов подпитки-продувки.

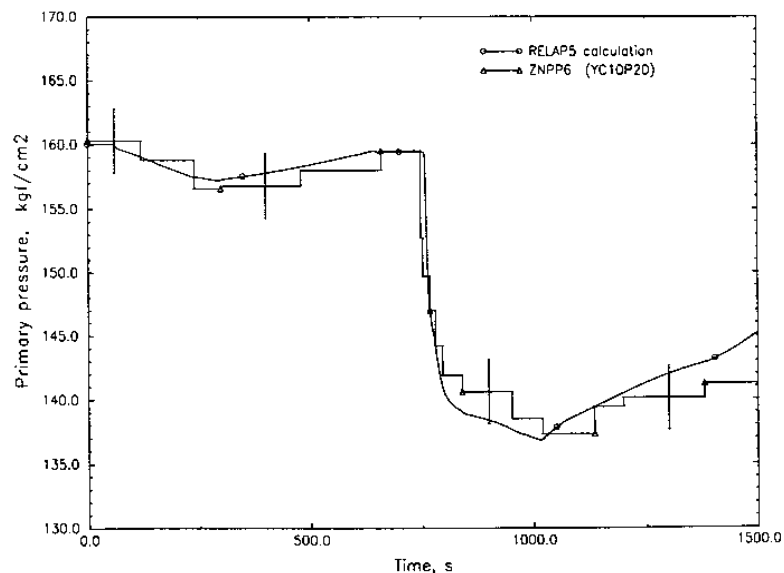


Рис.2 Измеренное и расчетное давление 1-го контура.

На Рис.2 представлено сравнение измеренного и расчетного значений давления 1-го контура. Данные энергоблока взяты из аварийных архивов комплекса "Титан-2", зарегистрированных на УВС. Для измеренных данных на всех рисунках указан тип датчика, и проектная норма точности информационно-измерительного канала. Минимальное расчетное значение давления 1-го контура составляет 137 кгс/см^2 , минимальное значение по данным, зарегистрированным УВС – 137.3 кгс/см^2 .

На Рис.3 показано изменение уровня в КД, который поддерживается регулятором уровня YPC02. В модели данного регулятора учитывается изменение уставки уровня, как функции средней температуры теплоносителя на входе и выходы из реактора (Рис.1). Данный факт особенно влияет на переходной процесс после 756 сек, когда срабатывает аварийная защита.

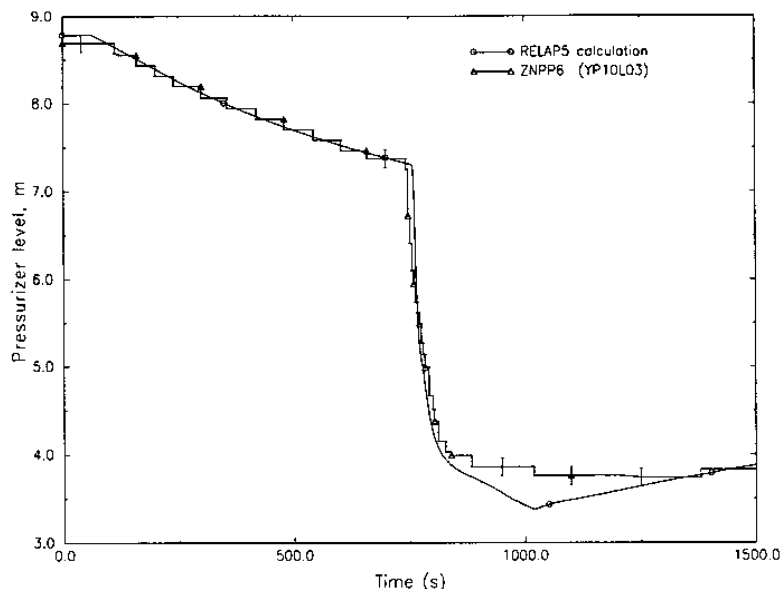


Рис.3 Измеренное и расчетное значения уровня в КД.

По величине снижения уровня в КД ($L_{\text{КД}} < 4 \text{ м}$) на 817 сек в расчете отмечено нарушение Предела Безопасной Эксплуатации, что соответствует данным энергоблока. Данный факт объясняется совпадением следующих физических процессов:

- Компенсация объема теплоносителя, вследствие снижения средней температуры т/н 1-го контура после срабатывания АЗ. Данный процесс обоснован проектом, и снижение уровня должно составлять не более 3м;
- Захолаживание 1-го контура со стороны 2-го. Произошла работа БРУ-СН и снижение давления в ГПК до 57 кгс/см^2 . Кроме того, произошла избыточная подпитка ПГ и изменение температуры питательной воды при отключении ПВД, что привело к завышению уровня в ПГ;
- Далее на Рис.7 будет отмечено захолаживание 1-го контура, вследствие увеличения расхода подпитки и снижения температуры подпиточной воды. В расчете она снизилась с 265°C до 103°C ;
- В условиях течи 1-го контура, дополнительный вклад в потерю теплоносителя внесла работающая система продувки, расход от которой составлял $21.3 \text{ м}^3/\text{ч}$, что сопоставимо с расходом в течь $53.4 \text{ м}^3/\text{ч}$ на этот момент.

С точки зрения работы регуляторов, после срабатывания аварийной защиты происходит резкое снижение уровня в КД и увеличение отрицательного разбаланса по уровню для регулятора YPC02 (см.выше п.2.2-2). В то время как положительный сигнал по материальному дебалансу расходов подпитки-продувки еще не изменился, поэтому свой вклад в снижение уровня вносит инерционность системы подпитки. Нагружение гидромуфты подпиточного насоса, полное время сервомотора которой составляет 160 сек, а также время на полное открытие регулирующих клапанов по 35 сек каждый, приводит к определенной задержке для компенсации изменения объема 1-го контура. На Рис.4 показана расчетная величина суммарного разбаланса EPD регулятора YPC02, по которой определяется время воздействия на регулирующие клапана. Горизонтальными линиями отмечена граница зоны нечувствительности $\Delta_n = \pm 0.9\%$. Импульсы на перемещение ИМ (открытие клапанов) будут формироваться вплоть до 914 сек, пока разбаланс не войдет в зону нечувствительности и не сформируется сигнал блокировки регулятора.

Минимальное расчетное значение уровня в КД составляет 3.38м, минимальное значение по данным, зарегистрированным УВС – 3.74м.

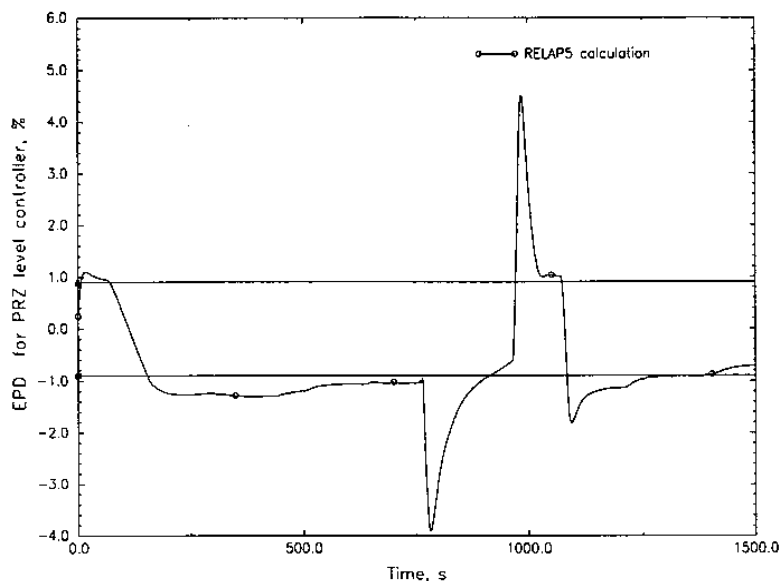


Рис.4 Расчетный разбаланс регулятора уровня КД.

Далее, на 965 сек расчета, имитируется действие оператора по закрытию клапанов продувки 1-го контура. Это приводит к резкому возрастанию сигнала положительного материального баланса расходов подпитки-продувки и его преобладанию в суммарном разбалансе регулятора EPD. Начинают выдаваться импульсы на закрытие регулирующих клапанов за счет увеличения времени управляющего воздействия TAU, которое представлено на Рис.5. На примере Рис.4 и Рис.5 можно увидеть, каким образом разбаланс регулятора EPD согласуется с TAU. После резкой выдачи сигнала на закрытие клапанов и снижения расхода подпитки, суммарный разбаланс уменьшается, но остается выше зоны нечувствительности $\pm\Delta_n$ и продолжает формировать импульсы на закрытие с меньшей частотой, пока оператор на 1072 сек не откроет клапана продувки 1-го контура повторно.

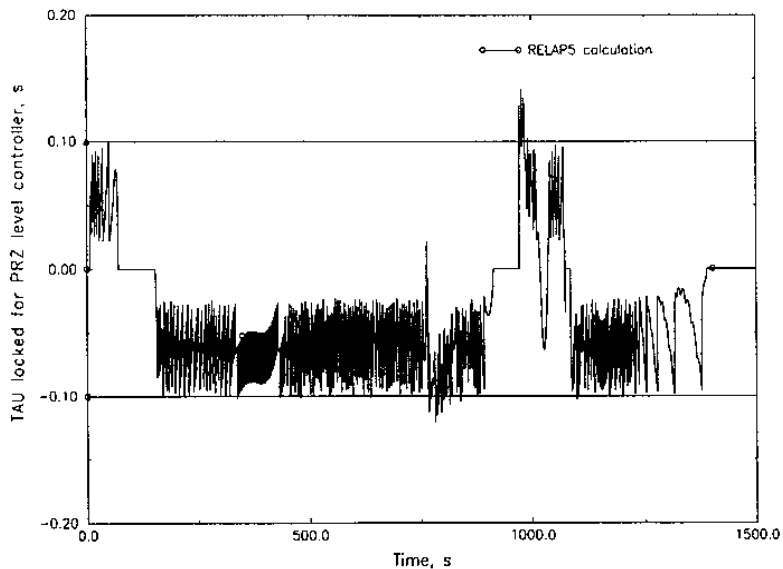


Рис.5 Расчетное время воздействия на ИМ (с учетом блокировок).

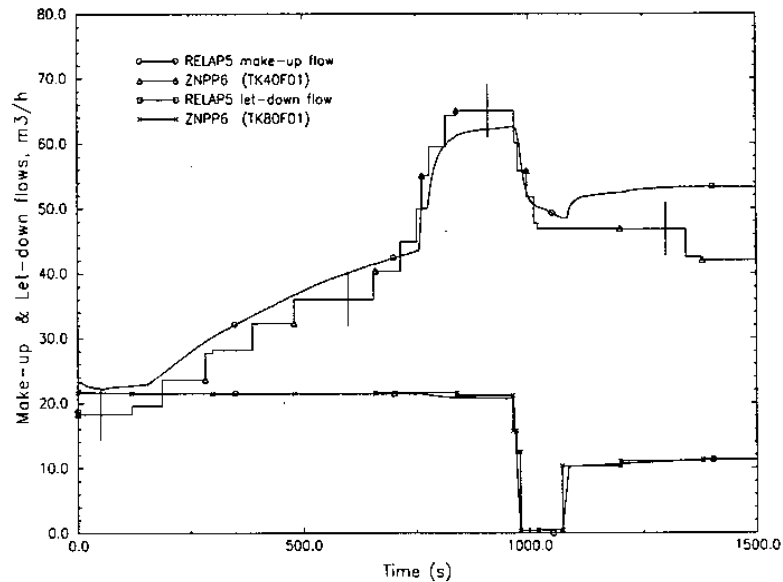


Рис.6 Расходы подпитки и продувки 1-го контура.

На Рис.6 представлены измеренные и расчетные значения расходов подпитки и продувки 1-го контура. Первые 765 сек расчета, показывают, что скорость нагружения подпитки согласуется со скоростью снижения уровня в КД (Рис.3). На этом этапе расход увеличивается за счет открытия клапанов регулятора уровня КД (Рис.4,5). Т.е. отрицательный разбаланс уровня от заданной уставки постоянно увеличивается, т.к. энергоблок находится еще на мощности, но это отклонение постоянно компенсируется увеличением разбаланса подпитки-продувки. При этом суммарный разбаланс EPD постоянно находится за пределами зоны нечувствительности, но время управляющего воздействия TAU невелико, в результате импульсы получаются кратковременными. После срабатывания АЗ реактора уровень КД резко падает и вызывает рост расхода подпитки до 60-65 м³/ч. Закрытие продувки вызывает увеличение составляющей материального баланса. Максимальное расчетное значение расхода подпитки 1-го контура составляет 62.6 м³/ч, максимальное значение по данным, зарегистрированным УВС – 65 м³/ч. Изменение температуры подпитки в модели согласуется с данными энергоблока и, в общем, зависит от дебаланса расходов подпитки-продувки через РТО.

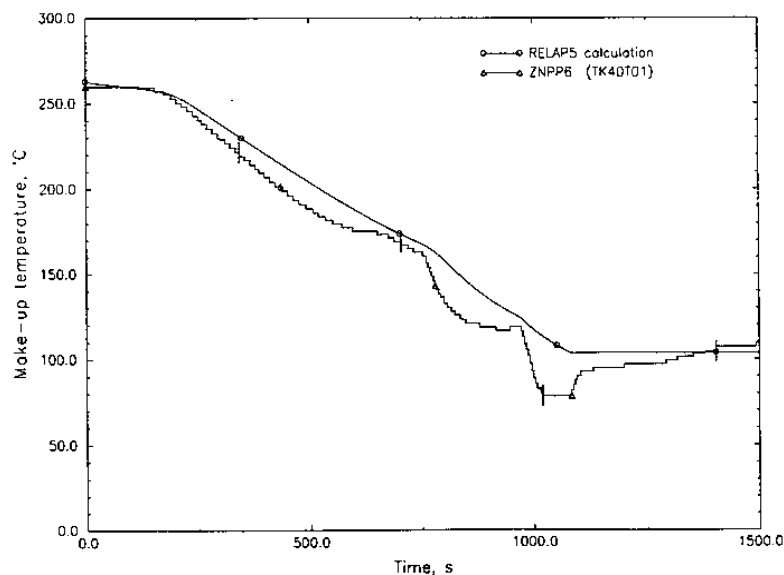


Рис.7 Измеренная и расчетная температура подпитки 1-го контура.

Минимальное расчетное значение температуры подпиточной воды составляет 103°C, минимальное значение по данным, зарегистрированным УВС – 78.5°C. Такое отличие возникает только в момент закрытия продувки, что объясняется недостатком экспериментальных данных в таком режиме работы РТО. На протяжении переходного процесса расчетные и измеренные данные согласуются в пределах нормы точности измерения температуры.

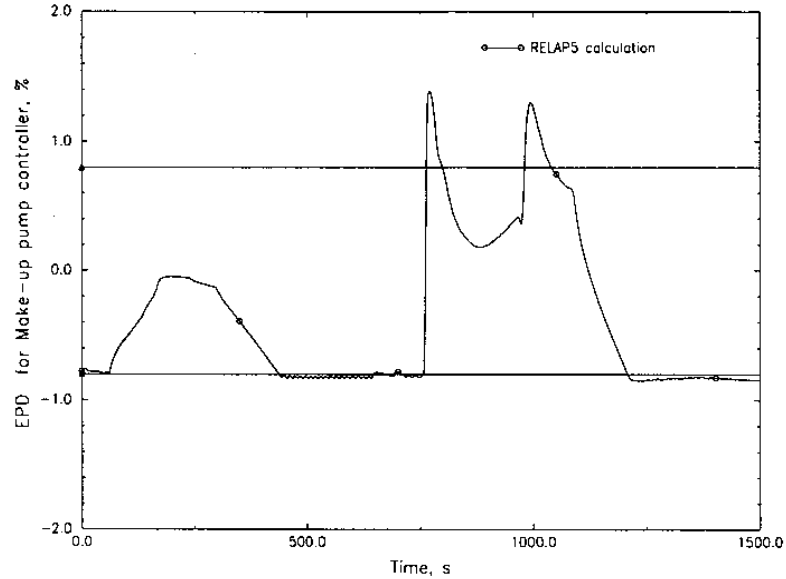


Рис.8 Расчетный разбаланс регулятора давления подпиточного насоса.

Следует отметить, что значение расхода подпитки 1-го контура зависит, как от регулятора уровня в КД УРС02, так и от регуляторов давления подпиточных насосов ТКС21-23. На Рис.8 представлено расчетное значение разбаланса регулятора давления EPD и зоны нечувствительности $\Delta_{н}=\pm 0.8\%$. Снижение разбаланса ниже -0.8% после 450 сек расчета, происходит после открытия регулирующих клапанов уровня в КД и снижения перепада давления. Соответственно, после срабатывания АЗ реактора, давление в 1-м контуре снижается и регулируемый перепад возрастает. На Рис.9 представлено TAU расчетное время воздействия на ИМ гидромурфты подпиточного насоса и минимальное время длительности импульсов $T_{min}=0.1$ сек.

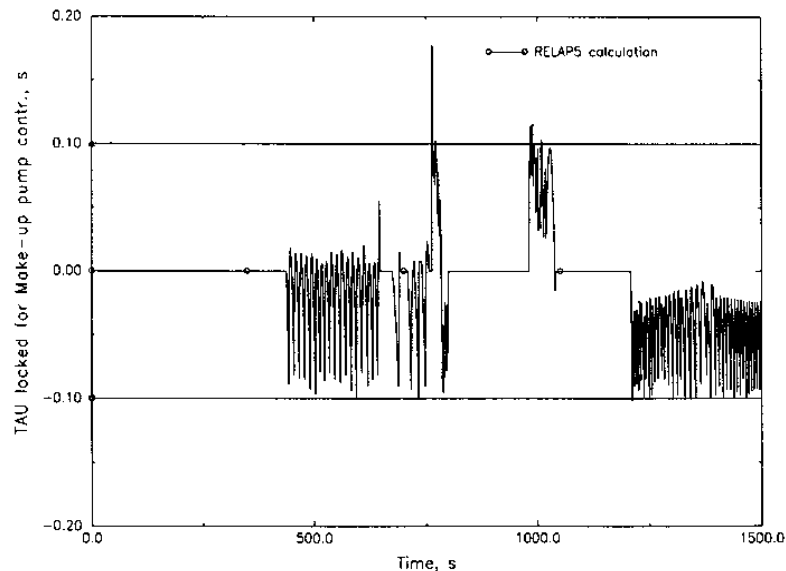


Рис.9 Расчетное время воздействия на ИМ (с учетом блокировок).

4. Заключение

Существенным преимуществом настоящей модели регуляторов является простота гидравлического тракта и исполнительных механизмов, входящих в систему управления, которая, тем не менее, позволяет имитировать работу аналоговых регуляторов 1-го контура на функциональном уровне с достаточно хорошим приближением.

Модель регуляторов позволяет детально изучить аварийные переходные процессы (в рамках разработанной теплогидравлической модели энергоблока N5 ЗАЭС). Возможности созданной модели регуляторов позволяют оценить и сравнить эффективность работы систем управления и действий оператора в аварийных ситуациях. В некоторых случаях может быть выбран оптимальный путь ликвидации нештатных ситуаций и снижения циклов нагружения на оборудование энергоблока.

5. Литература

1. Отчет о нарушении в работе АЭС №63АП-П02-13-07.98: "Течь теплоносителя 1-го контура, компенсируемая системой подпитки-продувки".
2. Relap5/Mod3 Code Manual. Vol.1
3. Relap5/Mod3 Code Manual. Vol.2
4. Relap5/Mod3 Code Manual. Vol.5
5. База данных по ЯППУ энергоблока №5 ЗАЭС.
6. Технологический регламент безопасной эксплуатации 5-6 блоков 2-й очереди Запорожской АЭС. 5,6.ПТ.ГТ.УС.РГ.03.

