

НЕКОТОРЫЕ ОЦЕНКИ РАБОТЫ ЗАЩИТНЫХ ФУНКЦИЙ СВРК ПРИ ВВОДЕ В ЭКСПЛУАТАЦИЮ ЭНЕРГООБЛОКОВ № 1 И №2 ТЯНЬВАНЬСКОЙ АЭС

Саунин Ю.В., Добротворский А.Н., Семенихин А.В.

ОАО "Атомтехэнерго",

Нововоронежский филиал "Нововоронежатомтехэнерго", г. Нововоронеж

Введение

В настоящее время при строительстве новых энергоблоков АЭС рассматриваются главным образом проекты энергоблоков с реакторами нового поколения типа ВВЭР повышенной безопасности. К числу проектных решений, повышающих безопасность, надежность и эффективность эксплуатации энергоблоков с ВВЭР является включение в состав системы внутриреакторного контроля (СВРК) программно-технических средств, обеспечивающих выполнение этой системой защитных функций по локальным внутриреакторным параметрам.

Позитивные качества, которые приобретаются с расширением состава функций СВРК новых поколений и усложнением алгоритмов функционирования сопряжено вместе с тем для первых энергоблоков с естественными трудностями ввиду отсутствия референции, как при проведении пусконаладочных работ на этапах ввода в эксплуатацию, так и при сопровождении и эксплуатации системы в ходе промышленной эксплуатации. По результатам пусконаладочных работ при вводе в эксплуатацию энергоблоков №1 и №2 Тяньваньской АЭС с реакторами ВВЭР-1000 (проект РУ В-428) сообщается о первом практическом опыте выполнения системой внутриреакторного контроля защитных функций в предусмотренном проектом объеме. Эти функции обеспечивают формирование сигналов защиты (предупредительной и аварийной) по внутриреакторным локальным параметрам (максимальное линейное энерговыделение ТВЭЛ и запас до кризиса теплообмена) и их передачу для исполнения в систему управления и защиты реактора.

Для оценок работы защитных функций использовались данные, полученные на разных этапах ввода в эксплуатацию и в разных режимах работы реакторной установки. Представлено сравнение данных по упрощенным моделям в программно-техническом комплексе защиты СВРК, где формируются сигналы защиты, и данных вычислительного комплекса СВРК верхнего уровня, где выполняются полномасштабные расчеты по восстановлению поля энерговыделения в активной зоне. В докладе рассматриваются и обсуждаются основные результаты оценки работы защитных функций, полученных по данным на разных этапах ввода в эксплуатацию и при разных режимах работы реакторной установки.

Основные проектные решения

Включение в СВРК защитных функций по локальным внутриреакторным параметрам стало возможным благодаря внедрению современных программно-технических средств и информационных технологий, а также накопленному многолетнему опыту эксплуатации СВРК разных модификаций [1 - 5], использующих для контроля энерговыделения в активной зоне датчики прямой зарядки (ДПЗ). Для энергоблоков №1, 2 Тяньваньской АЭС реализация в СВРК функций формирования сигналов защит по локальным внутриреакторным параметрам обеспечивалась следующими факторами:

- размещение в активной зоне в 54 тепловыделяющих сборках (ТВС) каналов нейтронных и температурных измерений (КНИТ) с 7-ю ДПЗ в каждом, которые равномерно расположены по высоте топливной части;
- использование апробированных корректирующих фильтров для устранения инерционности ("запаздывания") токов ДПЗ в быстропротекающих процессах при динамических режимах работы реакторной установки;

- обеспеченность измерений теплотехнических параметров с требуемой точностью и надежностью, используемых в алгоритмах расчетов;
- отработанные на референтных энергоблоках алгоритмы и программное обеспечение по восстановлению поля энерговыделения в активной зоне;
- использование современных программно-технических средств, соответствующих классу 2 НУ по ОПБ-88/97.

Поскольку в проекте РУ В-428 применена 4-х канальная структура систем безопасности, то исходя из этой структуры, 54 КНИТ разделяются на 4 канала, сигналы, которых заводятся в разнесенные по разным помещениям систем безопасности стойки нижнего уровня СВРК программно-технического комплекса защиты (ПТК-3). При этом каждая стойка ПТК-3 способна только по своим датчикам с определенной погрешностью формировать сигналы защит, так как КНИТ, входящие в нее, равномерно распределены по активной зоне (см. рис.1). В нормальном режиме эксплуатации каждая стойка ПТК-3 получает полную информацию от датчиков энерговыделения в активной зоне, т.к. все ПТК-3 соединены по локальной сети типа CAN.

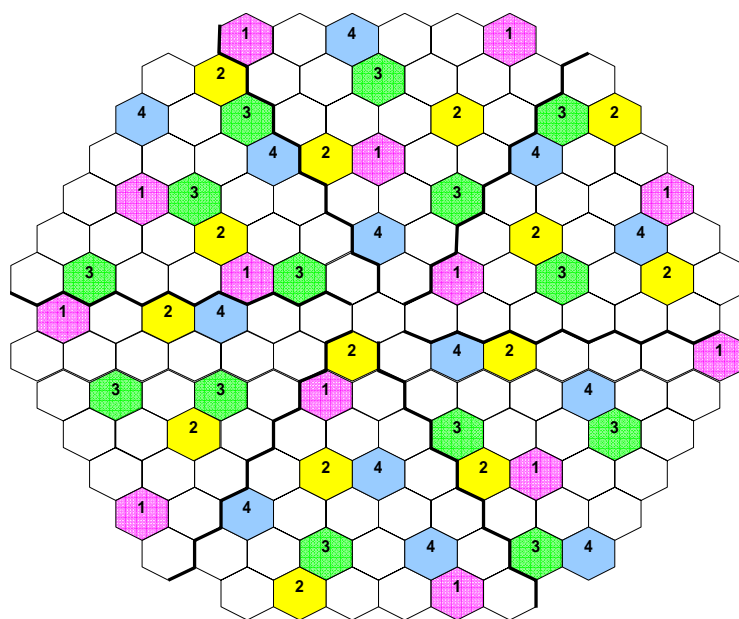


Рис.1. Распределение КНИТ по стойкам ПТК-3 СВРК
(1 – стойка №1, 2 - стойка №2, 3 - стойка №3, 4 - стойка №4)

Исходя из особых требований к аппаратуре систем, выполняющих защитные функции, расчет значений линейных энерговыделений максимально напряженных ТВЭЛ (ЛЭВ) и запасов до кризиса теплообмена (DNBR) в ПТК-3 проводится на основании упрощенного алгоритма восстановления поля энерговыделения в каждой из 163 ТВС в семи слоях по высоте активной зоны. Такой алгоритм должен позволять с запаздыванием не более двух секунд обнаружить превышение допустимых пределов локальными параметрами (например, при "самоходе" органов регулирования системы управления и защиты или при ошибочных действиях оператора реакторной установки) и выдать сигнал автоматической защиты [2, 5]. Более полное восстановление поля энерговыделения в пространстве 163x16, основанное на математической модели, включающей в себя совместное решение уравнения связи результатов измерения с искомым полем и уравнением диффузии нейтронов в разностном виде, проводится в вычислительном комплексе верхнего уровня (ВК ВУ) СВРК.

В наиболее общем виде алгоритм контроля ЛЭВ в ПТК-3 представляет собой преобразование 54x7 показаний токов ДПЗ (или меньшего количества в случае отбраковки ряда показаний) в линейное энерговыделение в 163x7 объемах активной зоны. Такое преобразование основано на использовании "функции влияния", под которой (см. рис.2)

подразумевается зависимость спада возмущения нейтронного потока от расстояния между центром ТВС, являющейся эпицентром возмущения, и датчиком, контролирующим это возмущение.

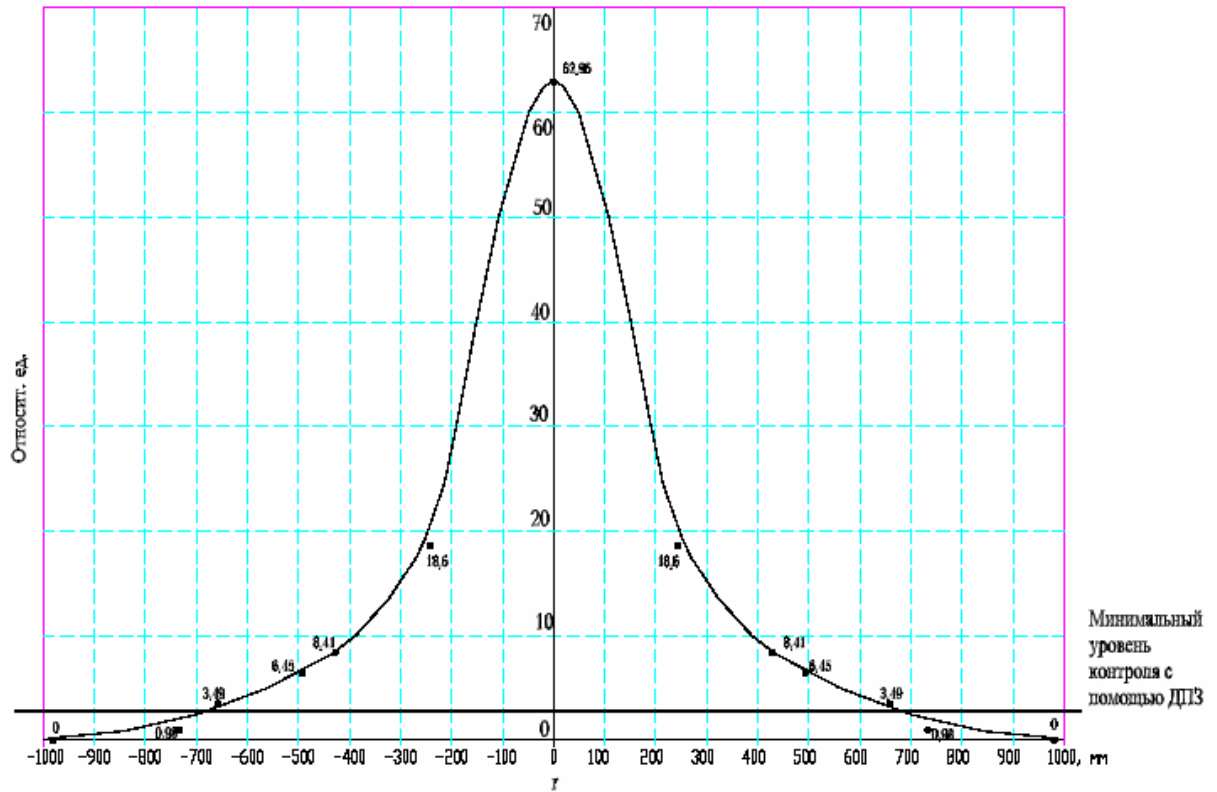


Рис.2. Функция влияния

В соответствии с данным алгоритмом линейное энерговыделение для каждой ТВС в любом слое вычисляется как линейная комбинация энерговыделения в этом слое в соседних 4-х ДПЗ:

$$\bar{A}_{ij} = \frac{\sum_{N(m)=1}^n A_{ijm} q_{jm} \eta_{im}}{\sum_{N(m)=1}^n q_{jm} \eta_{im}} \quad (1)$$

где A_{ijm} определяется как:

$$A_{ijm} = \frac{KK_{ij} \cdot KV_{ij}}{N_{m\text{вэл}} \cdot KV_{im}} \cdot \lambda_{im} \cdot Y_{im} \quad (2)$$

где: q_{jm} – значение коэффициента влияния, исходя из функции влияния; η_{im} – признак достоверности ДПЗ; KK_{ij} – коэффициент нагрузки максимально напряженного твэла; KV_{ij} и KV_{im} – коэффициенты объемной неравномерности для контролируемой ТВС и ТВС с ДПЗ; λ_{im} и Y_{im} – чувствительность и скорректированный ток ДПЗ соответственно; $N_{m\text{вэл}}$ – количество твэлов в ТВС; m – индекс номера канала, i – индекс ТВС, j – индекс слоя.

Поскольку существует вероятность, что по отдельному показанию тока ДПЗ может быть достигнута уставка срабатывания защиты по причине, не связанной с реальными изменениями в активной зоне, то в ПТК-3 применена логика "своего голоса". По этой логике при достижении уставки защиты в отдельной ТВС сигнал защиты в данном ПТК-3

сформируется, если одновременно будет достигнута уставка в контролируемой ТВС и в соседней ТВС с ДПЗ, принадлежащему данному ПТК-3.

Значения уставок защит по ЛЭВ определяются конструктором реакторной установки при обосновании безопасности. Для энергоблока с реакторной установкой В-428 уставки защиты по ЛЭВ были заданы следующим образом: 448 Вт/см для слоев от низа активной зоны до ее середины, а затем линейное уменьшение с реперной точкой 360 Вт/см на высоте 80 % от низа активной зоны. Уставки по ЛЭВ для максимально-напряженного ТВЭЛ в активной зоне могут быть изменены при обновлении настроечной информации на уставки по ЛЭВ для максимально-напряженного периферийного ТВЭЛ или для ТВЭЛ с уран-гадолиниевым топливом. При изменении количества петель с работающими ГЦН производится коррекция уставок умножением существующих уставок на понижающий коэффициент: 0,76 – для режима с 3-мя работающими ГЦН; 0,59 – для режима с 2-мя работающими ГЦН в противоположных петлях и 0,46 – для режима с 2-мя работающими ГЦН в смежных петлях.

Алгоритм расчета запаса до кризиса теплообмена в 7х163 участках активной зоны в ПТК-3 в общем виде состоит в определении критического теплового потока Q_{ij}^{kp} [6] и его отношения к текущей линейной мощности наиболее напряженного твэл \bar{A}_{ij} (1, 2) с учетом геометрии поверхности теплообмена и методических погрешностей:

$$DNBR_{ij} = K \frac{Q_{ij}^{kp}}{\bar{A}_{ij}} \quad (3)$$

$$K = \frac{\pi \cdot d \cdot (1 - K_f)}{K_q} \quad (4)$$

$$Q_{ij}^{kp} = f_F \cdot 0,795 \cdot ((1 - X_{ij})^{0,105 \cdot P_{\theta x} - 0,5}) \cdot (\rho \omega)^{0,311 \cdot (1 - X_{ij}) - 0,127} \cdot (1 - 0,0185 \cdot P_{\theta x}) \quad (5)$$

где: d – диаметр твэла; K_f – погрешность формулы для критического теплового потока; K_q – коэффициент запаса по мощности; f_F – форм-фактор; X_{ij} – относительная энтальпия; $P_{\theta x}$ – давление на входе в активную зону; $\rho \omega$ – средняя массовая скорость теплоносителя в ячейках ТВС.

Как видно из формулы (5) критический поток является функцией от давления на входе $P_{\theta x}$ в активную зону, относительной энтальпии X_{ij} в точке по высоте и массовой скорости теплоносителя $\rho \omega$. В свою очередь относительная энтальпия является функцией линейного энерговыделения \bar{A}_{ij} , давления $P_{\theta x}$ на входе в активную зону и температуры $T_i^{\theta x}$ на входе в ТВС:

$$X_{ij} = \frac{I_{ij}(\bar{A}_{ij}, \rho \omega) + I_i^{\theta x}(T_i^{\theta x}, P_{\theta x}) - I'(P_{\theta x})}{I''(P_{\theta x}) - I'(P_{\theta x})} \quad (6)$$

где: I_{ij} , $I_i^{\theta x}$ – энтальпия воды на данном участке ТВС и на входе в ТВС; I' , I'' – энтальпия воды и пара на линии насыщения.

Следует отметить, что температура на входе в ТВС также является расчетной величиной, которая определяется с учетом расхода теплоносителя в петлях 1 контура, темпе-

ратуры в холодных нитках петель и коэффициентов влияния температур в холодных нитках петель на входную температуру. Для определения коэффициентов влияния в составе комплексных испытаний СВРК проводятся испытания по определению температурного поля теплоносителя на входе в активную зону [7]. Кроме этого, расчетными величинами, влияющими на формирование сигналов защит, и которые определяются в ПТК-3, являются тепловая мощность по параметрам 1 контура и расходы теплоносителя в петлях 1 контура.

Описание выполненных работ

Для оценок готовности и правильности работы защитных функций СВРК по локальным внутриреакторным параметрам в составе комплексных испытаний СВРК на этапах ввода энергоблоков №1, 2 Тяньваньской АЭС был предусмотрен и выполнен ряд специальных испытаний, которые ранее не проводились.

На этапе физического пуска и подэтапе освоения уровня мощности 25-30% от номинальной мощности этапа энергетического пуска были проведены испытания по проверке режима передачи настроечной информации из ВК ВУ в ПТК-3. Целями выполнения этих испытаний являлось подтверждение работоспособности штатного режима в состояниях наиболее близким к состояниям начала работы функций защит. В ходе испытаний по всем проектным каналам передавались специально подготовленные тестовые пакеты, и оценивалось соответствие передаваемой и принимаемой информации, а также временные характеристики и отображение сервисной информации.

На подэтапе освоения уровня 25-30% от номинальной мощности этапа энергетического пуска проводились испытания по проверке формирования и передачи в систему аварийной и предупредительной защиты (АЗ-ПЗ) сигналов защиты по внутриреакторным параметрам. Данные испытания являлись наиболее важными из всех испытаний, которые проводились до начала работы защитных функций в штатном режиме, ввиду отсутствия возможности подачи на вход ПТК-3 в автономном режиме всего пакета исходной информации. Этот пакет должен состоять из более 400 различных сигналов и соответствовать определенному реальному состоянию для данной топливной загрузки активной зоны. При активном участии разработчиков системы определилась следующая методика испытаний по проверке формирования и передачи в систему АЗ-ПЗ сигналов защит:

- поочередное проведение проверки для всех стоек ПТК-3, для исключения возможности ложного срабатывания защит;
- в проверяемой стойке посредством специальной предварительной корректировки и передачи пакета настроечной информации имитируется увеличение текущей мощности реактора более 30 % от номинальной мощности и достигается переход в режим работы защит по локальным внутриреакторным параметрам;
- посредством специальной предварительной корректировки и передачи пакета настроечной информации снижается значение соответствующей уставки и последовательно проверяется формирование и передача сигналов ПЗ и АЗ по локальному энерговыделению по основным и резервным каналам;
- аналогично проводится проверка формирования и передачи сигналов защит в проверяемой стойке по запасу до кризиса теплообмена.

На всех подэтапах энергетического пуска и опытно-промышленной эксплуатации в стационарных режимах работы на разных уровнях мощности реактора проводилась проверка функций контроля состояния реакторной установки и достоверности выходной информации СВРК. Целью данных проверок является оценка достоверности информации по измеряемым и расчетным параметрам, которые задействованы в алгоритмах работы функций защит по локальным внутриреакторным параметрам: токи ДПЗ, давления и перепады давления, температуры, расходы, состояние основного оборудования и т.д. При данных проверках проводится сравнение информации по однотипным и параллельным каналам контроля, а также сравнение с режимными значениями, оценка устойчивости

информации и работа архивных функций. Оценка непосредственно параметров внутриреакторных защит проводилась сравнением с аналогичными параметрами, рассчитанными в ВК ВУ, а также определением их соответствия реальному режиму работы реакторной установки при проверках.

При проведении динамических испытаний, связанных с отключениями ГЦН, проводилась проверка функций контроля состояния реакторной установки и достоверности выходной информации СВРК в переходных режимах. Целью данных проверок, в основном, являлось оценка работоспособности и правильности алгоритмов защитных функций при изменении режимов работы реакторной установки.

Результаты испытаний и их обсуждение

При всех испытаниях по проверкам режима передачи настроечной информации была подтверждена работоспособность и правильность работы данного режима. По результатам работ, выполненных на энергоблоке №1, было показано, что проверку данного режима в рабочих условиях достаточно проводить только на этапе энергетического пуска непосредственно перед проведением и во время проведения проверки правильности формирования и передачи сигналов защит по локальным внутриреакторным параметрам. Работы при вводе в эксплуатацию энергоблока №2 выполнялись уже с данным решением.

Результаты испытаний по проверкам правильности формирования и передачи сигналов защит по локальным внутриреакторным параметрам показали, прежде всего, безусловную необходимость их проведения и правильность выбранной методологии. На энергоблоке №1 при первой проверке было выявлено, что сигналы защит формируются в ПТК-3, но не передаются в систему АЗ-ПЗ. При выяснении причин были выявлены ошибки в подключении разъемов на стойках ПТК-3 из-за несоответствий в технической документации. При повторных испытаниях после внесения изменений в схемы подключений разъемов выявилось несоответствие сигналов по ЛЭВ и DNBR в СВРК и в системе АЗ-ПЗ. Это проявлялось в том, что сигнал, сформированный в СВРК по ЛЭВ, в системе АЗ-ПЗ воспринимался как сигнал по DNBR и, соответственно, наоборот. При анализе причин выявилась неправильная коммутация сигналов во внешних разъемах стоек ПТК-3. Из-за необходимости внесения изменений в программно-технические средства ПТК-3 данные испытания были повторены ещё несколько раз. Такие результаты дают основания для того, чтобы при промышленной эксплуатации данные испытания были отнесены к периодическим эксплуатационным испытаниям систем, важных для безопасности. Проведение испытаний должно предусматриваться не реже одного раза в каждой кампании возможно в ограниченном объеме (например, проверка формирования и передача только в одной стойке или только по одному из сигналов), но с каждой последующей проверкой должны изменяться проверяемые стойки или сигналы.

Результаты проверок параметров внутриреакторных защит в стационарных режимах представлены в таблице 1. В этой таблице показаны значения параметров по данным ПТК-3 и ВК ВУ, полученные для энергоблоков №1, 2 при освоении одинаковых уровней мощности. Из представленных данных видно, что для стационарных режимов, которые являются основными эксплуатационными режимами работы энергоблока, по ЛЭВ различие значений в ПТК-3 и ВК ВУ не превышает 5 Вт/см. Это различие меньше погрешности 5 %, которая определена для ЛЭВ в проекте. По DNBR наибольшее различие составляет 0,5, что также меньше погрешности 17 %, определенной в проекте для DNBR.

Таблица 1

Параметры внутриреакторных защит в стационарных режимах работы

Мощность, % Nном	Энергоблок №1		Энергоблок №2	
	ЛЭВ (ПТК-3 / ВУ), Вт/см	DNBR (ПТК-3 / ВУ)	ЛЭВ (ПТК-3 / ВУ), Вт/см	DNBR (ПТК-3 / ВУ)
75	241 / 240	5,7 / 5,4	240 / 242	4,7 / 5,2
90	269 / 267	4,4 / 4,1	323 / 328	3,2 / 3,5
100	237 / 236	3,5 / 3,9	333 / 330	3,1 / 3,1

На рис.3 представлено поведение основных параметров энергоблока и защит по ЛЭВ при динамическом испытании режима отключения 2-х ГЦН из 4-х работающих на энергоблоке №1.

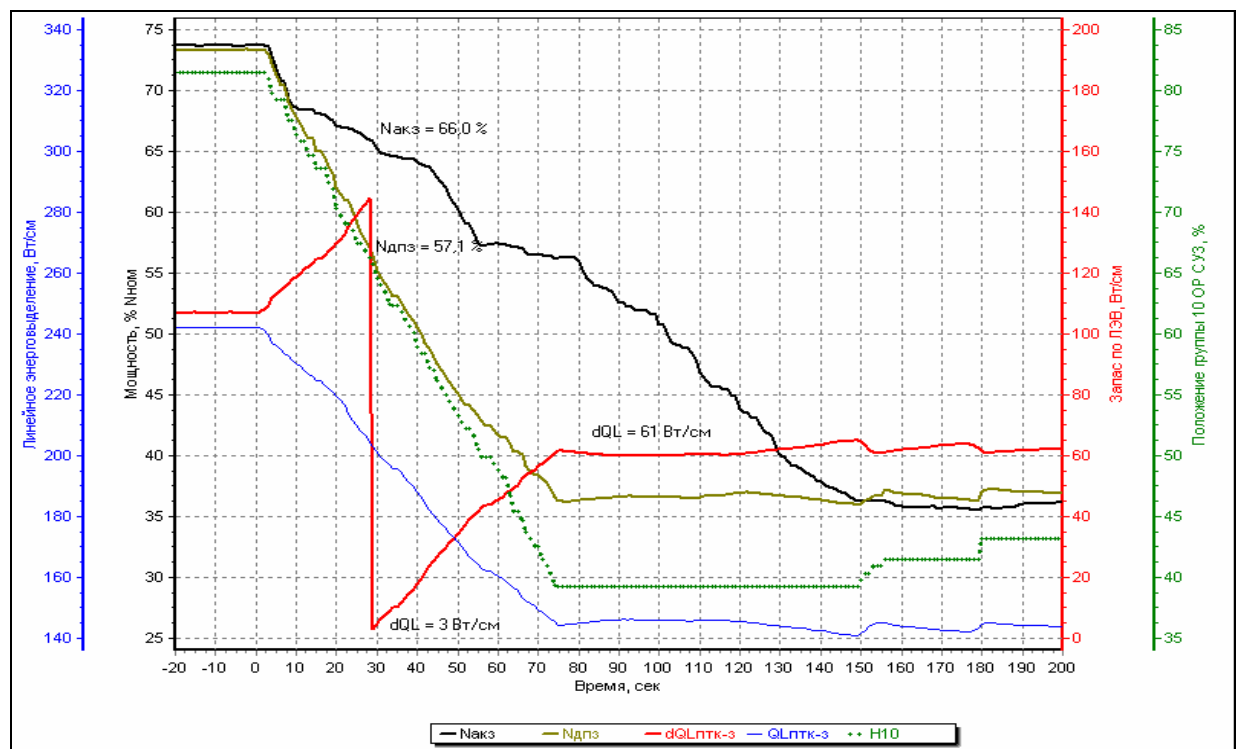


Рис.3. Изменение основных параметров энергоблока и локальных защит по ЛЭВ при отключении 2-х ГЦН из 4-х работающих

Как видно из рисунка после отключения 2-х ГЦН началась медленная разгрузка блока с мощности 73 % до 40 %, а на 30 секунде в соответствии с проектным алгоритмом функционирования защит по ЛЭВ произошло скачкообразное уменьшение уставки по ЛЭВ умножением номинального значения на 0,59. В этот момент мощность реактора еще составляла 60% от номинальной мощности, что выше эксплуатационного значения для стационарного режима, и наименьший запас до уставки предупредительной защиты второго рода составил 3 Вт/см. Очевидно, что изменение уставки по ЛЭВ произошло до завершения переходного процесса, связанного с разгрузкой энергоблока регулятором ограничения мощности реактора. Чтобы при аналогичных режимах избежать возможного ложного срабатывания защит, было предложено откорректировать время задержки исходя из реальных данных, полученных при анализе выбегов ГЦН. В ходе дальнейших работ главный конструктор реакторной установки установил время задержки на 80 сек.

На рис.4 представлено поведение параметров защит по DNBR при динамическом испытании режима с отключением ГЦН на энергоблоке №1. Как видно из рисунка, поведение DNBR в ПТК-3 и ВК ВУ различно, а именно, перед разгрузкой значение больше на ВК ВУ, а после разгрузки наоборот. Анализ данных и алгоритмов функционирования показал, что отмеченное обстоятельство связано с особенностью расчета DNBR в ПТК-3 исходя из подключений внешних связей. Особенность заключается в том, что в отличие от ВК ВУ в ПТК-3 не заводится сигнал от датчика перепада давления на реакторе, и поэтому значение перепада давления на реакторе вводится как константа, равная номинальному значению для режима работы со всеми ГЦН (0,392 МПа). Кроме этого, при расчете DNBR используется значение давления на входе в активную зону, что некорректно учитывает изменение давления теплоносителя по высоте активной зоны. Для устранения этого недостатка, было предложено откорректировать значение данной константы, взяв ее уменьшенное значение (0,1 – 0,2 МПа), но главным конструктором реакторной установки было принято решение об обнулении данной константы для увеличения консерватизма. В результате, в дальнейшем значение DNBR в ПТК-3 было всегда меньше значения в ВК ВУ.

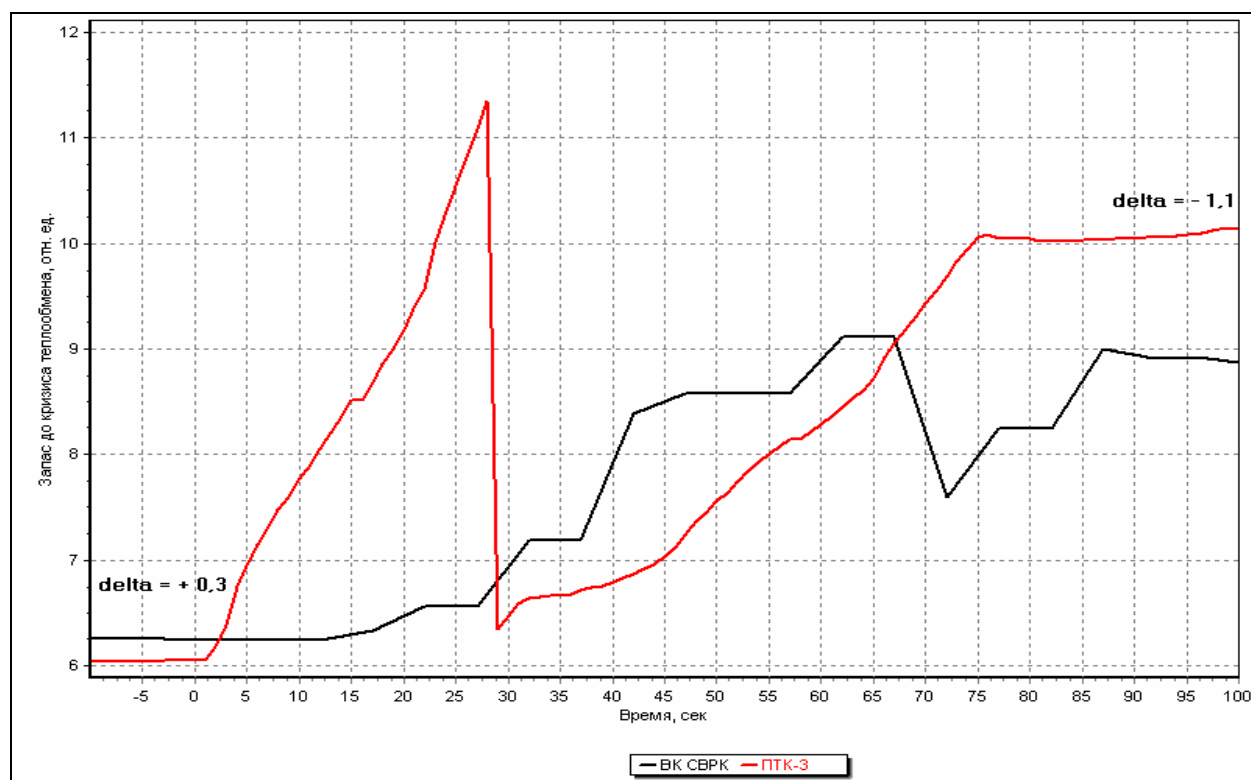


Рис.4. Изменение DNBR в ПТК-3 и ВК ВУ СВРК при отключении ГЦН

При испытаниях с отключениями ГЦН на подэтапе освоения номинальной мощности энергоблока №1 был отмечен переход уставок по ЛЭВ без задержки по времени в одном подканале ПТК-3 стоек 1-3 и в обоих подканалах стойки 4. Результатом этого стало срабатывание защиты по 4 каналу. Выполненный анализ показал, что в данном случае причинами были ошибки в ссылках программ функционирования, допущенных при корректировках по результатам предыдущих испытаний.

Существенным событием в ходе выполнения работ на энергоблоке №2 стало срабатывание аварийной защиты по ЛЭВ при динамических испытаниях режима отключения одного ГЦН из 3-х работающих на номинальном уровне мощности. Проектной работой всех основных регуляторов блока при данном режиме обеспечивался запас до уставок данной защиты и тем более до уставок аварийной защиты. Таким образом, это срабатывание защиты можно отнести к событию ложного срабатывания. По нашему мнению ос-

новными причинами данного ложного срабатывания являлись следующие особенности состояния ПТК-3 и проведения испытания на энергоблоке №2 по сравнению с аналогичным испытанием на энергоблоке №1:

- недостаточно обоснованное изменение уменьшающего коэффициента для уставки защиты по ЛЭВ при изменении режима работы на работу с 2-мя противоположными ГЦН (0,46 вместо 0,59);
- чрезвычайно быстрые темпы (несоответствующие проектным и среднестатистическим по всем ранее введенным в эксплуатацию энергоблокам аналогичных проектов) вывода энергоблока №2 на номинальный уровень мощности, что определило характерную для первой топливной загрузки сильную неравномерность энерговыделения в начале кампании на номинальном уровне мощности.

Вместе с тем следует отметить, что с учетом отмеченных особенностей, как показали последующие расчеты с имитацией данного режима, работа защитных функций не вызвала бы ложного срабатывания аварийной защиты.

В таблице 2 приведены значения параметров защит в ПТК-3 и ВК ВУ в нестационарных режимах работы реакторной установки до начала, и после завершения переходных процессов при ряде динамических испытаний.

Таблица 2

Параметры внутриреакторных защит в нестационарных режимах работы

Наименование испытания	Время	Мощность , %Nном	Положение ОР СУЗ			ЛЭВ (Вт/см)		DNBR	
						ПТК -3	ВУ	ПТК -3	ВУ
			Н10	Н9	Нупз				
Отключение 1 из 4 ГЦН (Блок №1)	Исходное	100,2	86	КВ	КВ	239	239	3,3	3,9
	Через 8 мин	29,5	51	КВ	КН	77	80	14,5	16,3
Отключение 1 из 4 ГЦН (Блок №2)	Исходное	100,5	85	КВ	КВ	329	325	3,1	3,6
	Через 2 мин	53,5	КВ	КВ	15	173	175	5,2	5,7
Отключение 1 из 3 ГЦН (Блок №1)	Исходное	64,8	82	КВ	КВ	153	155	5,5	6,4
	Через 5 мин	50,7	77	КВ	КВ	131	131	5,4	6,3
Отключение 1 из 3 ГЦН (Блок № 2)	Исходное	64,3	75	КВ	КВ	223	223	4,9	5,7
	Через 1 мин	48,9	60	КВ	КВ	183	182	5,0	5,8
Отключение 2 из 4 ГЦН (Блок №1)	Исходное	100,1	88	КВ	КВ	242	242	3,3	3,7
	Через 5 мин	33,7	74	КВ	КН	83	85	8,4	9,1
Сброс элек- трической на- грузки на 400 МВт (Блок №1)	Исходное	100,3	87	КВ	КВ	260	260	3,3	3,7
	Через 5 мин	37,9	17	67	КН	84	89	11,8	13,5
Сброс элек- трической на- грузки на 400 МВт (Блок № 2)	Исходное	100,1	80	КВ	КВ	336	331	3,0	3,5
	Через 4 мин	60,8	31	80	КН	233	235	5,5	6,4

По представленным данным видно, что, как и в стационарных режимах, различия в значениях в ПТК-3 и ВК ВУ не превышали проектных погрешностей при любых разгруз-

ках энергоблоков с изменениями положения органов регулирования СУЗ, которые наблюдались в ходе динамических испытаний. Аналогичный вывод был получен и по анализу данных, полученных при испытаниях по измерению нейтронно-физических характеристик.

На основании полученных практических результатов в ходе ввода в эксплуатацию энергоблоков №1, 2 Тяньваньской АЭС для повышения качества и надежности работы функций защит по локальным внутриреакторным параметрам представляется необходимым следующее:

1. Усовершенствовать алгоритм расчета режима работы петли 1 контура с учетом реального выбега ГЦН (по экспериментальным кривым, получаемым при теплогидравлических испытаниях с помощью системы пусконаладочных измерений) и использования перепада давления на ПГ вместо дискретного сигнала состояния ГЦН и электрической мощности ГЦН.

2. Исключить учет электрической мощности ГЦН в алгоритме расчета тепловой мощности реактора, т.к. данный алгоритм не в полной мере соответствует основному алгоритму расчета тепловой мощности, который используется при обработке результатов испытаний по сведению тепловых балансов.

3. В принятых алгоритмах защита по DNBR очень жестко связана с защитой по ЛЭВ (из-за единого параметра линейного энерговыделения), что делает маловероятным возможность формирования сигнала по DNBR без сигнала по ЛЭВ, за исключением режима после отключения ГЦН с 30 по 80 секунду, когда будут еще высокими уставки по ЛЭВ. По нашему мнению, при уменьшении уставок следует учитывать то, что основной защитой должен служить сигнал по DNBR. В испытании, приведшем к ложному срабатыванию АЗ, значение DNBR было ~5,0 (см. таблицу 2). Например, это можно сделать, если принять уставки плавающими и включить учет значения офсета или интегральной мощности твэла.

4. Включить в алгоритм расчета DNBR использование текущего значения перепада давления на реакторе и учитывать изменение давления по высоте активной зоны.

5. С учетом обязательного выполнения испытаний по определению температурного поля на входе в активную зону и их включения в состав комплексных испытаний СВРК принять однозначное решение о применимости алгоритма расчета температуры на входе в ТВС с использованием коэффициентов влияния температур холодных ниток.

6. Необходимо выполнить разработку и включить в состав программно-технических средств СВРК штатное сервисное программное обеспечение для возможной автоматизации ряда процедур при проверках правильности формирования и передачи сигналов защит на пониженных уровнях мощности, как при вводе в эксплуатацию, так и при промышленной эксплуатации.

Заключение

При вводе в эксплуатацию энергоблоков №1, 2 Тяньваньской АЭС с ВВЭР-1000 получен первый практический опыт проведения пусконаладочных работ по СВРК на новых программно-технических средствах с включением принципиально новых защитных функций по внутриреакторным локальным параметрам. Выполненные работы показали необходимость включения ряда новых испытаний, связанных с проверками работы защитных функций, в состав комплексных испытаний СВРК на этапах ввода в эксплуатацию и при промышленной эксплуатации. На основании практических результатов была отработана методология проведения и анализа результатов новых видов испытаний.

Полученные оценки работы защитных функций по результатам выполненных пусконаладочных работ позволяют заключить, что, в основном, проектные решения по этим функциям были приняты правильными. Вместе с тем, исходя из выявленных замечаний, даны предложения по возможностям повышения качества и надежности работы функций

защит по локальным внутриреакторным параметрам, что может быть использовано для проектов аналогичных и новых энергоблоков с ВВЭР.

Список литературы

1. V.Mitin, N.Milto, M.Kuzmichev, L.Shishkov, S.Tsyganov. SPND detectors response at the control rod drop in VVER-1000. Measurements and modeling results. 16th Symposium of AER on VVER reactor physics and reactor safety. Slovakia, 2006
2. Митин В.И., Калинушкин А.Е., Голованов М.Н., Филатов В.П. Основные решения по модернизированной системе внутриреакторного контроля реакторов ВВЭР-1000. Материалы 6-го собрания Международного симпозиума "Измерения, важные для безопасности реакторов", Москва, 2007
3. Быков А.В. Реализация концепции модернизации СВРК ВВЭР-1000 АЭС Украины на базе ПО "КРУИЗ". Материалы 6-го собрания Международного симпозиума "Измерения, важные для безопасности реакторов", Москва, 2007.
4. Seung Hana, Ung Soo Kimb, Poong Hyun Seongb. A methodology for benefit assessment of using in-core neutron detector signals in core protection calculator system (CPCS) for Korea standard nuclear power plants (KSNPP). Annals of Nuclear Energy. Volume 26, Issue 6, April 1999, Pages 471-488.
5. Обоснование и анализ функции надежности функций защит по локальным параметрам. Отчет. РНЦ "Курчатовский Институт", инв. №32/1-38-106 от 28.03.06.
6. Кириллов П.Л. Справочник по телогидравлическим расчетам. М., Атомэнергоиздат, 1984.
7. Саунин Ю.В., Добротворский А.Н., Семенихин А.В. Исследование температуры теплоносителя на входе в активную зону на примере реактора Тяньваньской АЭС (Китай). Атомная энергия, 2007, т.103, вып.2, август 2007, с.93-98.