

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

Ю.В.Саунин, А.Н.Добротворский, А.В.Семенихин  
филиал "НОВОВОРОНЕЖАТОМТЕХЭНЕРГО" ОАО "АТОМТЕХЭНЕРГО",

По результатам пусконаладочных работ при вводе в эксплуатацию сообщается о первом практическом опыте проведения новых видов комплексных испытаний СВРК в связи с включением в модернизированные СВРК защитных функций по локальным внутриреакторным параметрам. Приведено описание выполненных работ и 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.

**SOME ASSESSMENTS OF WORKS OF PROTECTIVE FUNCTIONS ICMS AT COMMISSIONING POWER UNITS № 1 AND №2 TIANWAN NPP.** Yu.V. Saunin, A.N. Dobrotvorsky, A.V. Semenihih (Branch of JSC "ATOMTECHENERGO" "NOVOVORONEZHATOMTECHENERGO")

By results of commissioning works is informed on the first practical experience of carrying out of new kinds of complex tests ICMS in connection with inclusion to the modernized ICMS of protective functions over local parameters. The description of the executed works is resulted and comparison of data on the simplified models in a program-technical complex of protection ICMS where signals of protection are formed, and data of computer complex ICMS of top level where full-scale calculations on restoration of a field energy-releasing in a core are carried out is presented/

## **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 относится включение в состав системы внутриреакторного контроля (СВРК) программно-технических средств, предназначенных для защитных функций. Защитные функции в СВРК должны обеспечивать 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.

Получение позитивных качеств СВРК новых поколений вследствие расширения состава выполняемых функций сопряжено с соответствующим усложнением алгоритмов функционирования СВРК и связанных с ней систем. Поэтому, на первых энергоблоках, где внедряются СВРК с новыми функциями, ввиду отсутствия референции, естественно ожидать замечаний и проблем, которые могут возникнуть как при проведении пусконаладочных работ на этапах ввода в эксплуатацию, так и при сопровождении и эксплуатации системы в ходе промышленной эксплуатации.

В настоящей статье на основании результатов 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 проекте объеме. 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.

## 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, используемых в алгоритмах расчетов, с требуемой точностью и надежностью;
- 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. 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.

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

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:

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

где:  $q_{jm}$  – значение коэффициента влияния, исходя из функции влияния;  $\eta_{im}$  – признак достоверности ДПЗ;  $KK_{ij}$  – коэффициент нагрузки максимально напряженного ТВЭЛ;  $KV_{ij}$  и  $KV_{im}$  – коэффициенты объемной неравномерности для контролируемой ТВС и ТВС с ДПЗ;  $\lambda_{im}$  и  $Y_{im}$  – чувствительность и скорректированный ток ДПЗ соответственно;  $N_{m\theta\lambda}$  – количество ТВЭЛ 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 канале ПТК-3 сформируется, если одновременно будет достигнута уставка хотя бы в одной из 4-х соседних ТВС с ДПЗ, принадлежащих данному каналу ПТК-3.

Значения уставок защит по ЛЭВ определяются на этапе проектирования 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 алгоритм предусматривается 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 ТВЭЛ;  $K_f$  – 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.

Необходимо отметить, что температура на входе в ТВС также является расчетной величиной, которая определяется с учетом расхода теплоносителя в петлях 1 контура, температуры 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 при освоении уровня мощности 25-30% от номинальной мощности на этапе 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.

При освоении уровня 25-30% от номинальной мощности на этапе 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 определились следующие основные технические положения методики испытаний по проверке формирования и передачи в систему АЗ-ПЗ сигналов защит:

- в проверяемой стойке ПТК-3 посредством специальной предварительной корректировки и передачи пакета настроечной информации имитировать увеличение текущей мощности реактора более 30 % от номинальной мощности и достичь перехода в режим работы защит по локальным внутриреакторным параметрам;
- посредством специальной предварительной корректировки и передачи пакета настроечной информации снизить соответствующую уставку и последовательно проверить формирование и передачу сигналов ПЗ и АЗ по локальному энерговыделению или по запасу до кризиса теплообмена в основных и резервных каналах.

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 измеряемых и расчетных параметров, которые включены в алгоритмы функционирования защит по локальным внутриреакторным параметрам. 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 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, является оценка работоспособности и правильности алгоритмов защитных функций при изменении режимов работы реакторной установки.

### Результаты испытаний и их обсуждение

Результаты испытаний по проверкам правильности формирования и передачи сигналов защит по локальным внутриреакторным параметрам показали, прежде всего, безусловную необходимость проведения таких работ и правильность выбранной методологии. Проведение данных испытаний позволило своевременно выявить и устранить ряд ошибок, препятствующих проектной работе. Очевидно, что эти испытания необходимо проводить и при промышленной эксплуатации в качестве периодических эксплуатационных испытаний систем важных для безопасности.

В таблице 1 представлены основные результаты проверок параметров внутриреакторных защит в стационарных режимах. 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,<br>% N <sub>ном</sub> | Энергоблок №1              |                      | Энергоблок №2              |                      |
|---------------------------------|----------------------------|----------------------|----------------------------|----------------------|
|                                 | ЛЭВ (ПТК-3 / ВУ),<br>Вт/см | DNBR<br>(ПТК-3 / ВУ) | ЛЭВ (ПТК-3 / ВУ),<br>Вт/см | DNBR<br>(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.1 представлено поведение основных параметров энергоблока и защит по ЛЭВ при динамическом испытании режима отключения 2-х ГЦН из 4-х работающих на энергоблоке №1.

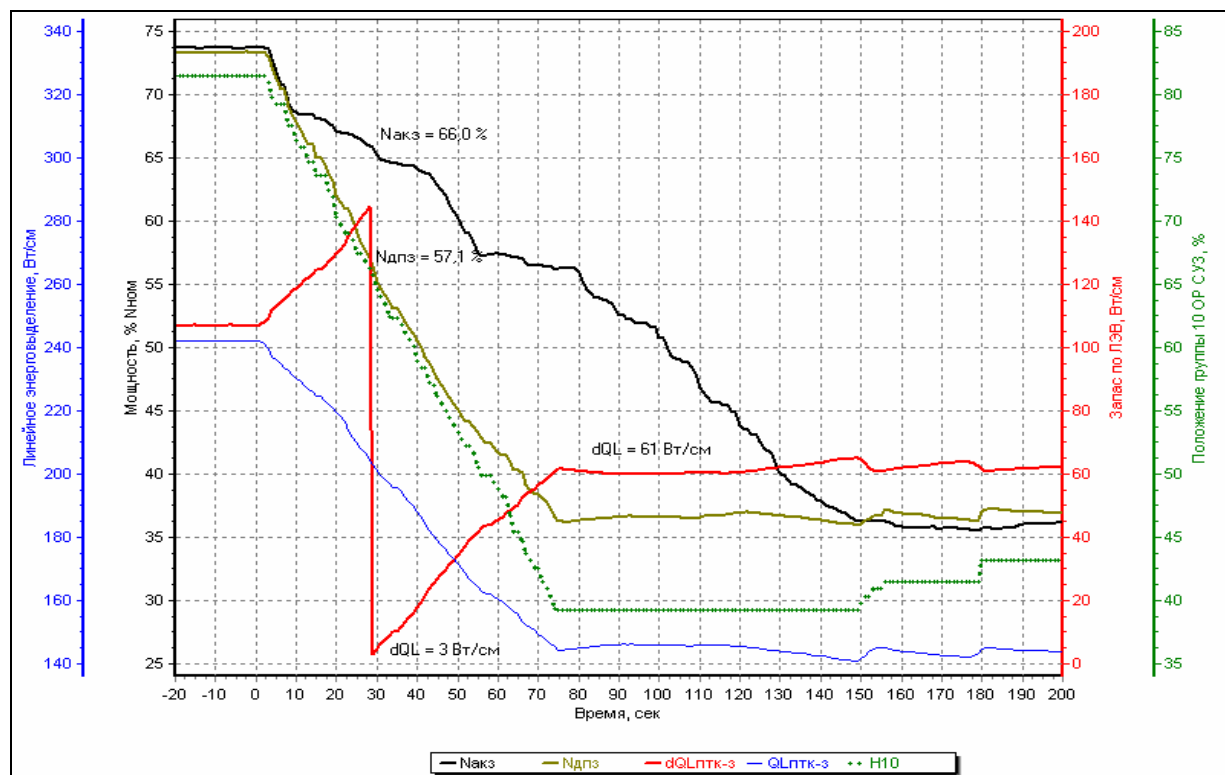


Рис.1. Изменение основных параметров энергоблока и локальных защит по ЛЭВ при отключении 2-х ГЦН из 4-х работающих

Как видно из рисунка после отключения 2-х ГЦН началась 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 дальнейшем время задержки было изменено и стало составлять 80 секунд.

На рис. 2 представлено изменение DNBR при динамическом испытании режима с отключением ГЦН на энергоблоке №1. Как видно из рисунка, поведение DNBR в ПТК-3 и ВК ВУ было различно, а именно, перед разгрузкой DNBR 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 возможностей подключений внешних связей. Особенность заключается в том, что в отличие от ВК ВУ в ПТК-3 нет сигнала от датчика перепада давления на реакторе, и поэтому значение перепада давления на реакторе используется 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 из-

менение 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). В дальнейшем было принято решение об обнулении данной константы для увеличения консерватизма и, таким образом, DNBR в ПТК-3 стал всегда меньше, чем DNBR в ВК ВУ

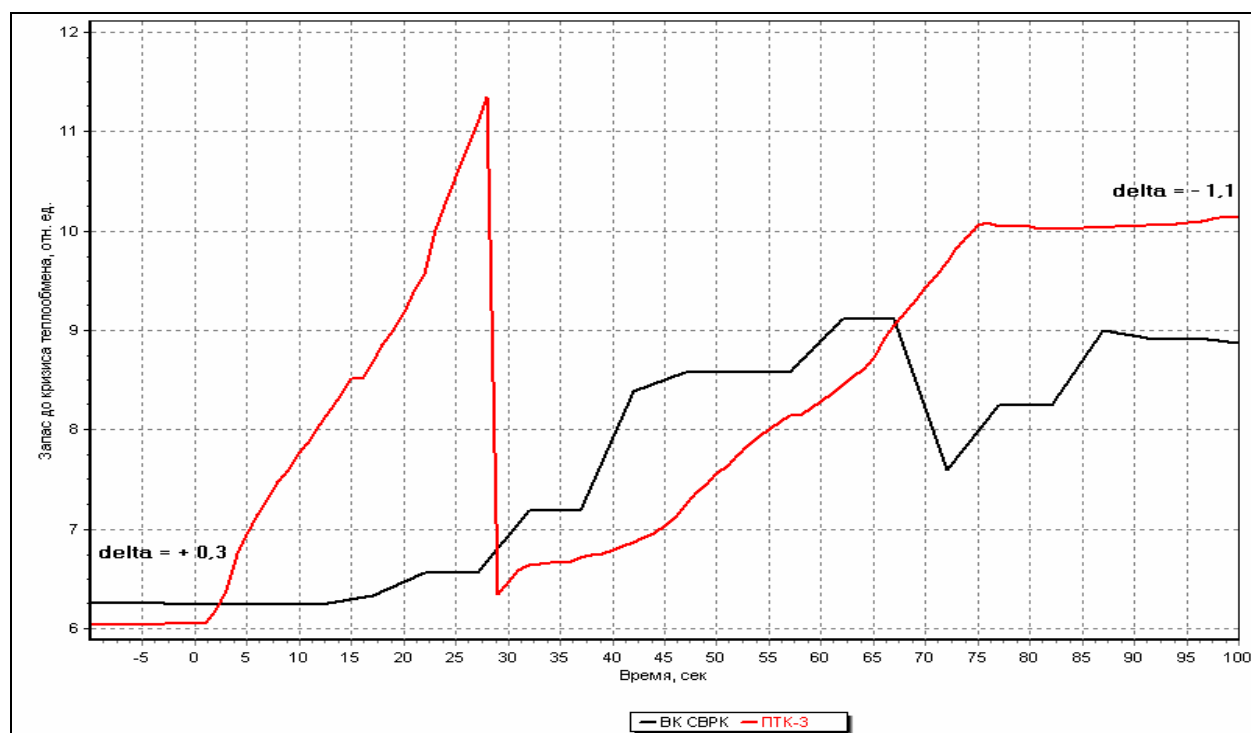


Рис.2. Изменение DNBR в ПТК-3 и ВК ВУ СВРК при отключении ГЦН

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 событие можно отнести к ложному срабатыванию аварийной защиты. К основным причинам данного события можно считать следующие особенности состояния ПТК-3 и условия 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 реакторной установки 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 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<br>испытания  | Время       | Мощ-<br>ность,<br>%Nном | Положение<br>ОР СУЗ |          |                     | ЛЭВ (Вт/см) |     | DNBR  |      |
|--|-------------|-------------------------|---------------------|----------|---------------------|-------------|-----|-------|------|
|  |             |                         | 10<br>гр.           | 9<br>гр. | Групп-<br>па<br>УПЗ | ПТК-3       | ВУ  | ПТК-3 | ВУ   |
|  |             |                         |                     |          |                     |             |     |       |      |
| Отключение 1<br>из 4 ГЦН<br>(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<br>из 4 ГЦН<br>(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<br>из 3 ГЦН<br>(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<br>из 3 ГЦН<br>(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<br>из 4 ГЦН<br>(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-<br>трической на-<br>грузки на<br>400 МВт<br>(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-<br>трической на-<br>грузки на<br>400 МВт<br>(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 разгрузках 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.

Полученный опыт проведения необходимых натурных испытаний в ходе ввода в эксплуатацию энергоблоков №1, 2 Тяньваньской АЭС и выполненные оценки работы защитных функций СВРК позволяют сделать следующие предложения для повышения качества и надежности работы защит по локальным внутриреакторным параметрам:

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 возможного 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. Включить в алгоритм расчета DNBR использование текущего значения перепада давления на реакторе и учет изменения давления по высоте активной зоны.

4. Принять однозначное решение о применимости алгоритма расчета температуры на входе в ТВС по коэффициентам влияния температур холодных ниток и обязательного выполнения испытаний по определению температурного поля на входе в активную зону в составе комплексных испытаний СВРК.

5. Провести уточнение алгоритмов защиты в режимах, требующих изменения уставок для более полного соответствия реально протекающим процессам в активной зоне

6. 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 натурных испытаний 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 натурных испытаний при вводе в эксплуатацию 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. 16<sup>th</sup> 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.