

# МНОГОФУНКЦИОНАЛЬНЫЕ СРЕДСТВА КОНТРОЛЯ НЕЙТРОННО-ФИЗИЧЕСКИХ ПАРАМЕТРОВ ЯДЕРНЫХ УСТАНОВОК И ИХ ПРИМЕНЕНИЕ

*И. М. Пискорский, М. А. Овчинников, Г. Н. Пикулина, В. А. Юхневич,  
Р. В. Грачев, А. А. Савиных, М. В. Сусяков*

ФГУП «РФЯЦ-ВНИИЭФ», г. Саров Нижегородской обл.

В РФЯЦ-ВНИИЭФ активно проводятся научно-исследовательские работы и испытания на радиационную стойкость материалов, элементов, приборов и узлов с использованием исследовательских ядерных установок (ИЯУ): ядерных реакторов и критических стенов [1]. Существующая аппаратура для систем управления и защиты (СУЗ) ИЯУ разрабатывалась в шестидесятых-восьмидесятых годах прошлого столетия. Назрела потребность в замене морально и физически устаревших систем с целью повышения безопасности работы ИЯУ, что можно достигнуть, в том числе путем развития функциональных возможностей электронной аппаратуры, входящей в состав СУЗ [2].

Начиная с 2010 года, сотрудники ИЯРФ РФЯЦ-ВНИИЭФ работают над созданием специализированной аппаратуры для контроля нейтронно-физических параметров ИЯУ. Она активно используется при модернизации СУЗ реакторов и критических стенов института. Конкретным примером такой разработки служит унифицированный аппаратно-программный комплекс каналов контроля мощности (АПК ККМ), предназначенный для измерения физической мощности и скорости ее изменения. АПК ККМ входит в состав новой СУЗ стенов ГИР2-КР, введенного в эксплуатацию в 2015 году, и обеспечивает диапазоны измерения мощности ИЯУ и изменения ее периода –  $(10^{-5} \div 10^6)$  Вт и  $(1 \div 200)$  с, соответственно. Каналы АПК построены по блочно-модульному принципу, где основной структурной единицей является контрольно-управляющий блок (КУБ). КУБ представляет собой крейт, в котором в качестве контроллера с микропроцессорным управлением используется блок обработки данных (БОД). В аппаратной части комплекса используются измерительные модули токовой камеры, измерительные модули токовой камеры логарифмические, измерительные модули счетчика нейтронов и высоковольтные преобразователи напряжения для обеспечения питанием блоков детектирования [3].

В рамках развития выбранной идеологии было решено расширить номенклатуру разрабатываемых модулей для использования при модернизации СУЗ ИЯУ. При определении назначения и функциональных возможностей вновь проектируемых устройств применялись принципы аппаратно-программного, структурного, функционального разнообразия, как одного из основных инструментов защиты от отказов [4].

Применение этих принципов обеспечивает устойчивость к отказам по общей причине, не приводит к излишнему усложнению проектирования систем на основе разрабатываемых модулей и не вызывает их сильного удорожания [5].

В результате были спроектированы или находятся на стадии разработки модуль измерения периода (МИП) разгона, модуль измерения энерговыделения (МИЭ), блок токовой защиты аппаратный (БТЗА). В них используются современные быстродействующие микросхемы, позволяющие принимать и обрабатывать большой объем данных в реальном масштабе времени, а также расширить функциональный спектр каждого модуля.

Модули могут работать автономно или в составе крейтов КУБ под управлением БОД, генерируя сигналы на срабатывание средств предупредительной и аварийной защиты при выходе значений измеряемых параметров за пределы заданного диапазона.

МИП, блок-схема которого показана на рис. 1, предназначен для аппаратного измерения установившегося периода увеличения мощности реактора (период разгона) в интервале изменения его физической мощности от 1,5 до 1000 Вт (от  $5 \cdot 10^{10}$  до  $3,3 \cdot 10^{13}$  дел. АЗ/с) в реальном масштабе времени.

Значение периода разгона реактора является одним из важных параметров контроля при управлении реактором. Период разгона определяется как время, в течение которого мощность реактора изменяется в  $e \approx 2,71$  раз. Период разгона – величина динамическая, при неизменной мощности период разгона равен бесконечности и становится измеряемым только при изменении мощности. Период разгона определяется временем жизни одного поколения нейтронов в реакторе и значением избыточной реактивности. Для любого конкретного реактора время жизни одного поколения нейтронов есть практически постоянная величина, и период разгона определяется только значением избыточной реактивности, характеризующим степень отклонения системы от критического состояния [6].

Самым ответственным моментом управления реактором является его пуск. Главная задача обеспечения безопасности при этом в недопущении надкритичности выше установленного предела или взаимосвязанного предела по периоду увеличения мощности реактора [7].

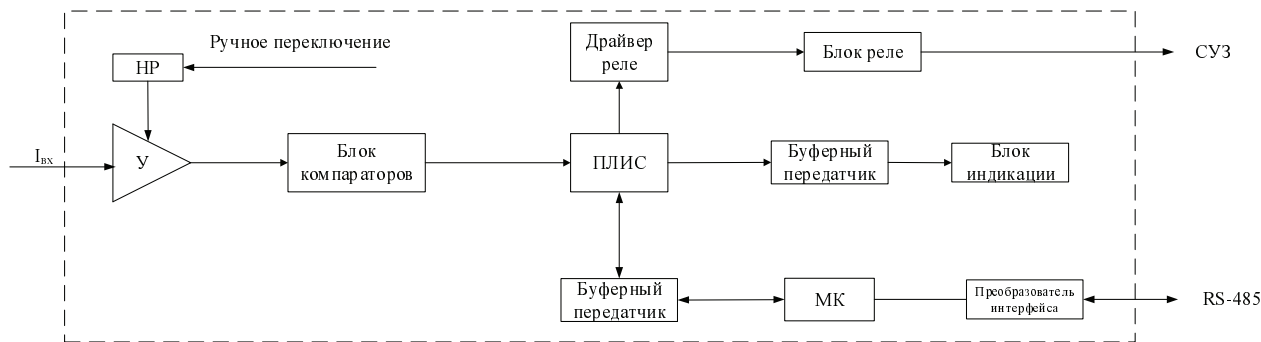


Рис. 1. Блок схема МИП

С этой целью для установок ВНИИЭФ разработаны и аттестованы методики измерения установившегося периода разгона реактора (времени, за которое число делений в активной зоне увеличивается в  $e$ -раз на экспоненциальном участке разгона реактора), находящегося в надкритическом состоянии. Эти измерения проводятся на начальном этапе эксперимента для определения значения стартовой реактивности.

Алгоритм работы модуля МИП следующий. Сигнал тока с детектора поступает на преобразователь ток-напряжение, выполненный на операционном усилителе (ОУ), который преобразует его в пропорциональное значение напряжения. Коэффициент преобразования схемы задается через нагрузочные резисторы (НР). После преобразования сигнал поступает на блок компараторов.

Блок состоит из четырех компараторов (К), срабатывание которых задается с помощью подстроечных резисторов. С помощью блока компараторов выделяется интервал времени, в течение которого сила тока детектора, пропорциональная плотности потока нейтронов (физической мощности) разгоняющегося реактора, увеличивается в  $e$ -раз.

В начальный момент времени, при запуске модуля, на выходе компараторов устанавливается сигнал высокого уровня. Когда значение напряжения на входе превышает заданное значение, на выходе компаратора устанавливается сигнал низкого уровня. Сигналы с компараторов поступают на программируемую логическую интегральную схему (ПЛИС) через схему согласования уровней сигналов.

Сигналы запускают и останавливают 32-разрядные таймеры-счетчики. За время разгона реактора измерение периода производится дважды. Измеренное значение периода разгона реактора отображается на индикаторах на передней панели модуля и передается на верхний уровень через микроконтроллер. Для согласования уровней между индикаторами, микроконтроллером и ПЛИС используются буферные передатчики.

МИП генерирует сигналы аппаратного сброса и программного сброса при выходе значения периода нарастания мощности (разгона) за пределы разрешенных диапазонов.

Определение периода разгона происходит на 3-х поддиапазонах: от 10 мкс до 10 мс; от 1 до 999 мс; от 0,1 до 999 с. Погрешность определения на первом поддиапазоне – 2 мкс, на втором – 0,1 мс и третьем – 0,1 с. Рабочий поддиапазон выбирается вручную или с помощью программы.

МИЭ предназначен для измерения энерговыделения и выдачи сигналов в СУЗ при работе ИЯУ в статическом и квазиимпульсном режимах.

Блок-схема МИЭ показана на рис. 2.

Оперативный контроль значений энерговыделения в активной зоне реактора необходим во всех режимах работы ИЯУ, где управление осуществляется с учетом запаздывающих нейтронов. При этом решаются следующие задачи:

- обеспечение безопасности работы реактора за счет автоматического срабатывания аварийной защиты в квазиимпульсном режиме по установленному уровню максимального энерговыделения;

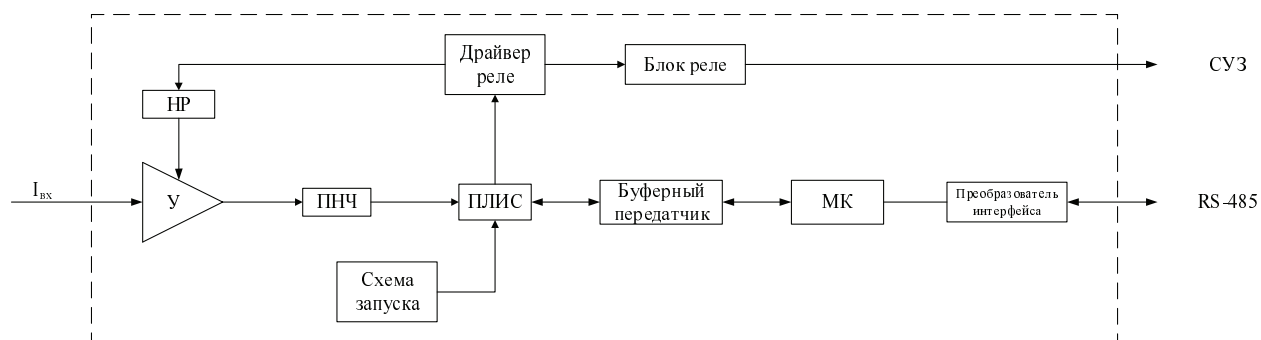


Рис. 2. Блок схема МИЭ

- повышение эффективности использования реактора для экспериментальных исследований [8], за счет установленного ограничения по энерговыделению, позволяющего безопасно генерировать квазиимпульсы делений различной длительности и различной формы;

- использование измеренного значения энерговыделения при калибровке и поверке систем контроля и измерениях с применением штатных методик;

- учет значения суммарного энерговыделения при проведении экспериментальных исследований и испытаний на радиационную стойкость.

Суммарное энерговыделение рассчитывается как полный интеграл физической мощности реактора за заданный интервал времени.

Запуск МИЭ происходит по внешнему сигналу через схему запуска. Сигнал с детектора поступает на вход усилителя (У) с регулируемым коэффициентом усиления. С усилителя он подается на вход преобразователя напряжение-частота (ПНЧ), который преобразует входной сигнал в импульсы, пропорциональные напряжению и поступающие на вход ПЛИС.

В микросхеме ПЛИС происходит суммирование числа импульсов, подсчет количества импульсов за период, среднее количество импульсов. Полученные значения хранятся во внутренней памяти ПЛИС.

При наборе максимального числа импульсов, эквивалентного заданному предельному значению суммарного энерговыделения, вырабатываются аварийные сигналы.

Для чтения внутренних регистров и задания уставок ПЛИС подключается к микроконтроллеру (МК) посредством буферного передатчика, согласующего уровни напряжения на выводах микросхем.

МК предназначен для передачи команд и данных между терминальным устройством и микросхемой ПЛИС. Интерфейс связи с верхним уровнем выполнен в формате RS485.

МИЭ измеряет энерговыделение ИЯУ в широком диапазоне изменения физической мощности. На

верхнем уровне происходит перерасчет измеренного количества импульсов в эквивалентное значение энерговыделения установки с учетом коэффициентов пропорциональности, учитывающих чувствительность используемых детекторов.

БТЗА, рис. 3, обеспечивает формирование сигнала аварийной защиты при превышении физической мощностью ИЯУ предельного порогового значения на аппаратном уровне без временных задержек.

Для обеспечения безопасности ИЯУ возможность срабатывания систем аварийной защиты в течение времени, сравнимого со временами жизни мгновенных нейтронов ( $10^{-7} - 10^{-3}$  с), было бы решением многих проблем [7]. Цель разработки БТЗА – максимально сократить временную задержку выработки аварийного сигнала при превышении заданного значения мощности.

Сигнал с детектора поступает на вход модуля и преобразуется в пропорциональное значение напряжения так же, как в модуле МИП, но при этом коэффициенты усиления ОУ могут задаваться как в ручном режиме, так и дистанционно, по командам с терминального устройства. Режим управления модуля задается аппаратно, переключателем на передней панели.

Далее преобразованный сигнал поступает на вход компаратора, уровень срабатывания которого задается специально настраиваемым резистором. Уставка срабатывания компаратора определяется при проведении физического пуска реактора. При срабатывании компаратора, сигнал поступает на формирователь аварийного сигнала (ФАС), построенного на триггере и реле. ФАС предназначен для формирования сигнала срабатывания аварийной защиты (АЗ).

Сигнал АЗ сохраняется даже после снижения мощности реактора до рабочих значений. Сброс может быть произведен программно, по команде с терминального устройства, либо аппаратно, по нажатию кнопки на передней панели модуля.

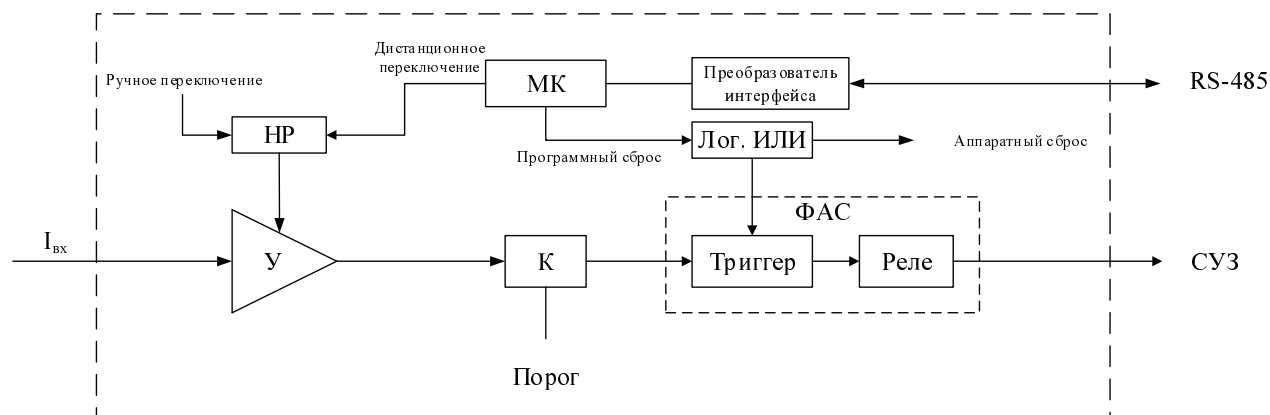


Рис. 3. Блок-схема БТЗА

Для каждого модуля разработана система команд. Набор команд каждого модуля одинаков, отличается только длина поля данные, см. таблицу.

Формат данных

&	AA	BB	CC	EE	FF	CR
старт	адрес	команда	данные		Контр. сумм.	конец

В общем случае, формат сообщений следующий:

1. Для установки параметров и данных:

Запрос: &AABBCC...EEFF<CR>;

Ответ: \$AABBCC...EEFF<CR>;

где & – признак начала сообщения запроса (символ ‘&’); \$ – признак начала сообщения ответа (символ ‘\$’); AA – адрес (номер) модуля на внутренней шине; ‘BB’ – номер регистра команды (старший бит является признаком чтения или записи в модуль); CC...EE – данные в коде HEX; CC – контрольная сумма; <CR> - признак окончания команды.

К служебным командам относятся изменения адреса модуля, чтения версии программного обеспечения, запрос информации о модуле.

Команды запроса формируются на верхнем уровне, ответы формируются функциональными модулями. Скорость передачи данных составляет 115200 бит/с, при этом вероятность ошибки при передаче сигналов составляет 0,2 %.

### Заключение

Таким образом, разработка и внедрение многофункциональных аппаратно-программных модулей для модернизации аппаратуры СУЗ ядерных реакторов и критических стендов во ВНИИЭФ продолжаются.

Использование новых модулей повышает уровень безопасности работы ИЯУ за счет реализации принципа разнообразия измерительных средств и расширяет диапазоны измерения физических параметров излучения ИЯУ.

На текущий момент собраны первые версии аппаратных частей перечисленных в докладе модулей, на которых разрабатывается и отлаживается управляющее программное обеспечение. В процессе отладки выявляются недостатки в применяемых схемотехнических решениях и вносятся изменения в конструкторскую документацию.

На следующем этапе планируются проведение стендовых испытаний модулей на ИЯУ и использование их в составе каналов контроля физических параметров излучения ИЯУ при модернизации СУЗ.

### Литература

1. Колесов В. Ф., Кувшинов М. И., Воронцов С. В. и др. Критические стенды и импульсные реакторы РФЯЦ ВНИИЭФ. 65 лет ВНИИЭФ // Физика и техника высоких плотностей энергий. Научное издание в 2-х выпусках. Вып. 1 // Саров: ФГУП РФЯЦ-ВНИИЭФ. 2011. С. 335.
2. Заикин А. А., Портнягин А. Ю. Современный интегрированный комплекс аппаратуры системы управления и защиты исследовательских реакторов // Ядерные измерительно-информационные технологии. 2004. № 3. С. 11–24.
3. Воинов М. А., Гунин С. В., Дроздов Ю. М. и др. Аппаратно-программный комплекс каналов контроля мощности исследовательских ядерных установок // Вопросы атомной науки и техники. Сер. Физика ядерных реакторов. 2017. Вып. 4. С. 123–128.
4. ГОСТ Р МЭК 61513-2011. Системы контроля и управления, важные для безопасности. Общие требования. Москва. 2011.
5. Алпеев А. С. Диверсные защиты. Разнообразие при проектировании аварийных защит атомных станций // Ядерная и радиационная безопасность. 2015. Т. 76. № 2. С. 1–4.
6. Беденко С. В. Основы управления нейтронным полем в ядерном реакторе: учебное пособие // С. В. Беденко, В. Н. Нестеров, И. В. Шаманин; Томский политехнический университет. – Томск: Томский Политехнический Университет, 2009. С. 176.
7. Юркевич Г. П. Система управления ядерными реакторами: Принципы работы и создания // Под ред. акад. РАН Хлопонина Н. С. – 2-е изд., перераб. и доп. – Москва: ЭЛЕКС–КМ, 2009. С. 448.
8. Мамаев Д. В., Колесов В. Ф., Кувшинов М. И., Пичугин А. М. Реактор БИГР // Импульсные реакторы: история создания и перспективы использования. Труды межотраслевой конференции. Т.1 // Под ред. С. В. Воронцова – Саров: РФЯЦ-ВНИИЭФ. 2016. С. 77–86.