

УДК 681.5

## РАЗРАБОТКА СИСТЕМЫ УПРАВЛЕНИЯ ТИРИСТОРНЫМИ АГРЕГАТАМИ КИПЯЩЕГО СТЕНДА

© 2021 г. П. С. Бондарь<sup>1,\*</sup>, А. О. Толоконский<sup>2</sup>

<sup>1</sup> Научно-исследовательский центр “Курчатовский институт”, Москва, 123182, Россия

<sup>2</sup> Национальный исследовательский ядерный университет “МИФИ”, Москва, 115409, Россия

\*e-mail: bon.pavel2010@yandex.ru

Поступила в редакцию 02.09.2021 г.

После доработки 11.10.2021 г.

Принята к публикации 12.10.2021 г.

В статье отражены процессы разработки и внедрения программного обеспечения алгоритмов управления тиристорных агрегатов кипящего стенда КС НИЦ “Курчатовский институт”. В материале рассматривается общее назначение кипящего стенда, работа тиристорных агрегатов и нагрев экспериментального участка. Авторами были изучены устройство тиристорных агрегатов кипящего стенда, система управления нагревом, а также принципы построения систем управления в режиме реального времени, системы технологического программирования для различных их иерархических уровней. Особое внимание в статье уделено системе алгоблочного программирования среднего уровня, на базе которой были построены основные алгоритмы управления кипящего стенда. На основании полученных данных были разработаны и реализованы алгоритмы управления оборудованием кипящего стенда, прикладное программное обеспечение которых функционирует в режиме реального времени и позволяет оптимальным образом, с точки зрения качества управления, осуществлять управление нагревом экспериментального участка, а также более точно и оперативно контролировать выходные токи тиристорных агрегатов. В статье проводится анализ результатов проведенных экспериментов реализованного программного обеспечения после проведения экспериментов на различных мощностях и различных режимах работы кипящего стенда.

**Ключевые слова:** программа, алгоритм, управление, тиристор, агрегат, стенд, нагреватель

**DOI:** 10.1134/S2304487X21040027

### ВВЕДЕНИЕ

На кипящем стенде КС, со времени его пуска в 1967 году, непрерывно ведутся эксперименты, в которых исследуются различные модели и сборки ТВС водо-водяных реакторов, в результате чего определяются гидравлическое сопротивление, кризис теплоотдачи при кипении, устойчивость принудительной и естественной циркуляции теплоносителя, поперечное перемешивание теплоносителя, интенсификация теплообмена за счет использования решеток-интенсификаторов, понижение теплотехнических запасов из-за локальных нарушений геометрии топливной сборки. Эти исследования необходимы для обоснования теплотехнических запасов активных зон реакторов и оптимизации конструкций тепловыделяющих сборок (далее – ТВС) реакторов. С помощью данных, полученных в результате исследований различных моделей ТВС на кипящем стенде КС, возможно оптимизировать работу водо-водяных реакторов, разработать оптимальные конфигурации ТВС для реакторов, увеличить безопасность и КПД атомных электростанций.

Система электронагрева моделей ТВС подготавливается к подаче электрического тока на экспериментальный пучок модели ТВС, входящий в состав первого контура кипящего стенда. Вход в кризисное состояние поверхности трубок модели ТВС осуществляется плавным повышением электрической мощности, подаваемой на модель ТВС, при сохранении величин остальных режимных параметров неизменными. Поскольку кризис теплоотдачи исследуется в стационарных режимах, вход в кризисное состояние производится плавно.

За работу электронагревателя первого контура циркуляции в составе кипящего стенда и подачу мощности на участок экспериментальной установки отвечают тиристорные агрегаты, что является распространенным решением задачи для подобных комплексов и систем [1]. Для того чтобы гарантировать плавное нарастание мощности и оптимальную работу тиристорных агрегатов по выходному току и выдаваемой мощности, необходимо внедрить в АСУ ТП стенда программное обеспечение алгоритмов управления тиристор-

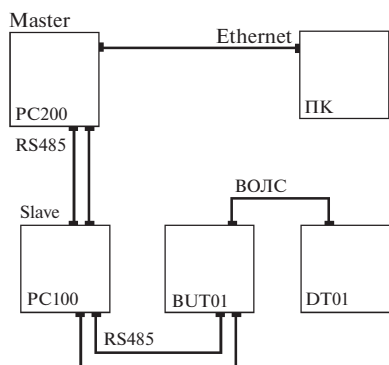


Рис. 1. Структура управления и сбора данных тиристорных агрегатов.

ными агрегатами, обеспечивающее сведение токов, идущих через тиристоры, уменьшение биеений и взаимное регулирование токов по всем агрегатам [2].

Оптимизация системы управления тиристорными агрегатами кипящего стенда КС направлена на получение лучших показателей нагрева экспериментального пучка модели ТВС стенда, большого КПД при нагреве благодаря уменьшению дребезга токов тиристорных агрегатов и, как следствие, нивелированию тепловых потерь из-за флуктуации мощности нагревателя, а также на большую продолжительность жизни трубок модели ТВС при исследовании кризиса теплоотдачи в течение нескольких экспериментов.

### МЕТОДИКА ПРОВЕДЕНИЯ ЭКСПЕРИМЕНТА

Электропитание экспериментальных участков осуществляется от преобразовательной подстанции общей мощностью 10 000 кВт и построено на тиристорах. Быстродействующие тиристоры предназначены для применения в качестве ключевых элементов в цепях преобразователей электроэнергии, где требуются малое время включения и выключения, высокие скорости нарастания тока и напряжения [3]. Преобразовательная подстанция состоит из четырех управляемых тиристорных выпрямителей, выходная мощность каждого из которых равна 2500 кВт. Необходимо разработать систему управления тиристорами, предварительно проведя анализ их характеристик [4].

Схема преобразовательной подстанции позволяет осуществить все возможные варианты параллельной и независимой работы четырех агрегатов. Напряжение выпрямленного тока изменяется от 0 до 150 В на первом диапазоне регулирования и от 0 до 300 В на втором диапазоне. Наибольшая мощность преобразовательной подстанции получается при параллельной работе

всех четырех агрегатов на общую нагрузку на втором диапазоне регулирования [5]. При этом выходной ток равен 40 кА, а напряжение 200 В. На втором диапазоне регулирования напряжение может быть увеличено до 300 В, но при этом необходимо пропорционально уменьшить выходной ток так, чтобы суммарная выходная мощность не превышала 10 000 кВт.

Использование тиристоров обусловлено, в том числе, тем, что наличие управляющего электрода у тиристора и возможность управлять его моментом включения при прямой полярности приложенного к нему напряжения, позволяют строить выпрямители с плавным изменением среднего значения выпрямленного напряжения на нагрузке [6]. Для нормальной эксплуатации кипящего стенда КС необходимо, чтобы рассогласование токов между двумя шкафами одного тиристорного агрегата не превышало 500 А, а дребезг и выбросы отдельных токов не превышал 50 А на всем диапазоне мощности, равном 5 МВт при работе всех четырех тиристорных агрегатов.

АСУ ТП кипящего стенда КС построена с использованием SCADA-системы из программного-технического комплекса “УМИКОН” и содержит в себе автоматизированные рабочие места научных сотрудников, человеко-машинный интерфейс с выводом важных для наблюдения параметров экспериментальной установки, программную часть (программное обеспечение, алгоритмы управления верхнего и среднего уровня, мнемосхемы, база данных реального времени, архивы данных) и аппаратную часть (персональные компьютеры, станции сбора данных, серверы, модули центрального процессора, модули среднего и нижнего уровня, силовое оборудование) [7]. На рис. 1 показано подключение модулей нижнего и среднего уровней для связи с АРМ и организации управления тиристорными агрегатами.

Модуль центрального процессора PC200 представляет собой функционально законченную адаптированную к промышленным условиям PC-совместимую ПЭВМ с расширенной поддержкой гальванически развязанных внешних интерфейсов. Модуль PC100 предназначен для организации связи и взаимодействия с модулями ввода-вывода и ПЭВМ, а также для выполнения вычислений, обработки сигналов ввода-вывода, поддержки распределенных сетей и т.п. Модуль BUT01 предназначен для управления трехфазным полностью контролируемым мостовым выпрямителем. Используется совместно с модулем DT01. Внешний вид модуля BUT01 представлен на рис. 2.

Модуль DT01 предназначен для размножения импульса поджига на 8 тириستоров типа T143-500. Внешний вид модуля DT01 представлен на рис. 3.

В персональном компьютере функционирует база данных реального времени — программа

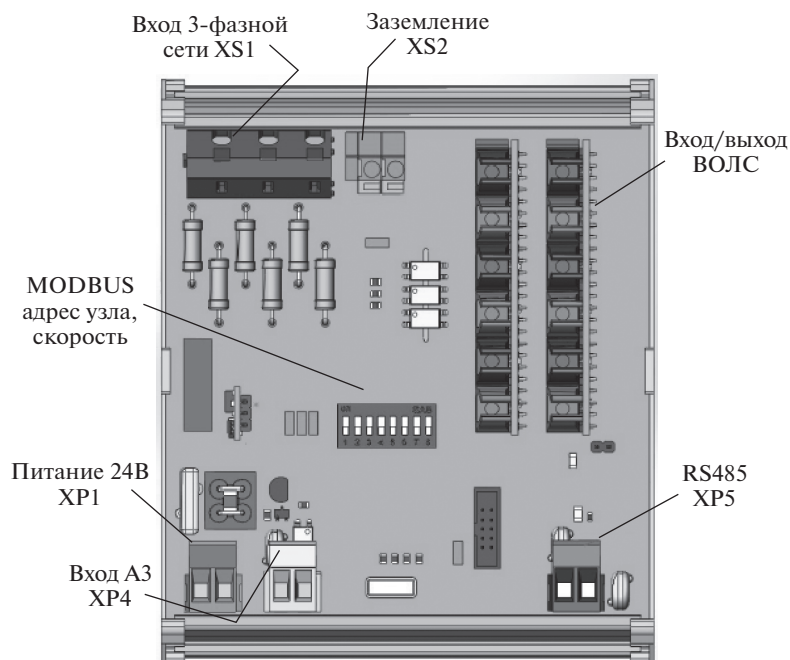


Рис. 2. Внешний вид модуля БУТ01.

MWBridge, включающая в себя базы данных реального времени и алгоблочное программирование верхнего и среднего уровня [8, 9].

Программирование среднего уровня производится непосредственно в модуле центрального процессора PC100, управляющие команды из которого поступают в модуль управления тиристорами БУТ01 по интерфейсу RS-485.

### ХОД РАБОТЫ

Система управления кипящим стендом КС основана на функционале SCADA-системы ПТК “УМИКОН” со встроенными базами данных, алгоблочным программированием верхнего и среднего уровней. При проектировании системы управления технологическим процессом в рамках крупной экспериментальной установки важно учитывать необходимость сбора, анализа и хранения большого объема данных, управления технологическим электронным оборудованием, организации системы защиты и безопасности при отказе [10–12]. Используемый подход к проектированию АСУ ТП кипящего стенда и выбору программно-технического комплекса, включающего в себя модули центрального процессора и связи с оборудованием нижнего уровня, а также алгоблочное программирование верхнего и среднего уровней для построения системы управления, обусловлено необходимостью плавного и точного управления технологическим процессом [13, 14]. Изменение мощности нагревателя экспериментального участка с помощью тиристорных агрега-

тов необходимо для предотвращения выбросов по температуре, запроектных кризисов теплоотдачи и, как следствие, разрушения исследуемого канала.

На рис. 4 представлено тело алгоблочной программы среднего уровня, в котором реализован алгоритм управления тиристорными агрегатами.

Интерфейс программирования выполнен в виде набора типовых и сервисных графических

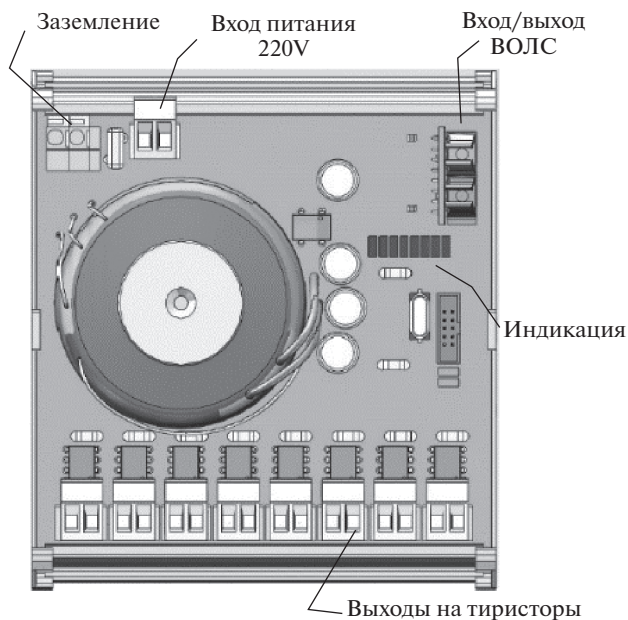


Рис. 3. Внешний вид модуля ДТ01.

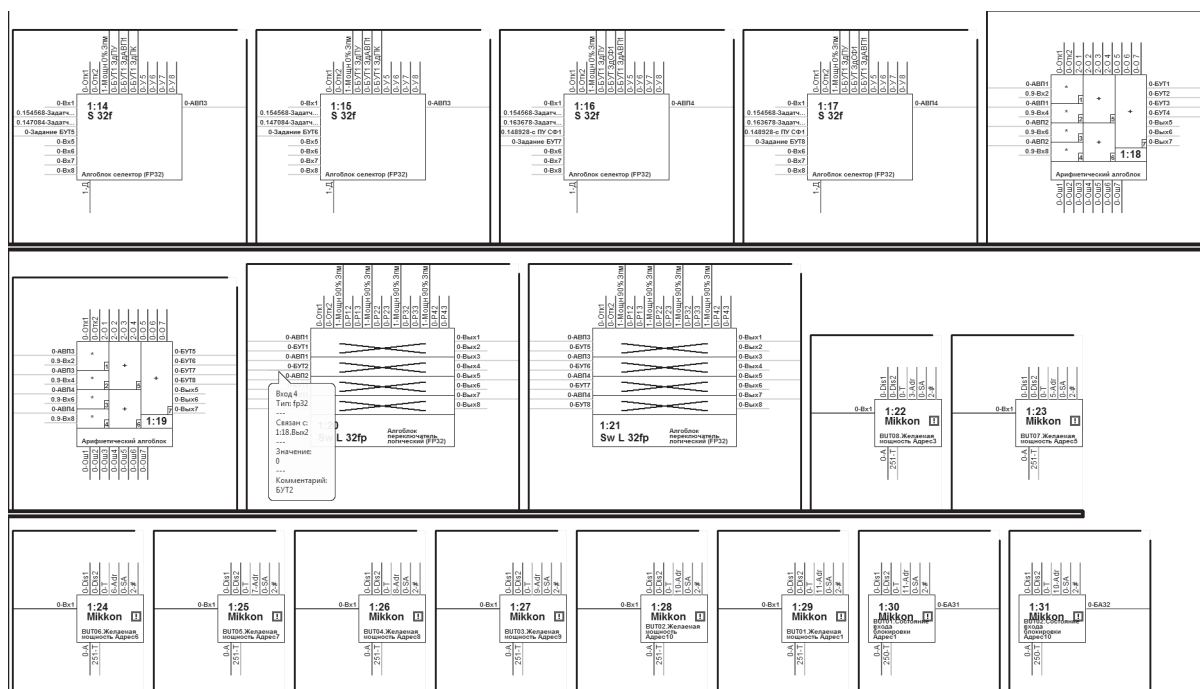


Рис. 4. Часть алгоритма управления тиристорными агрегатами.

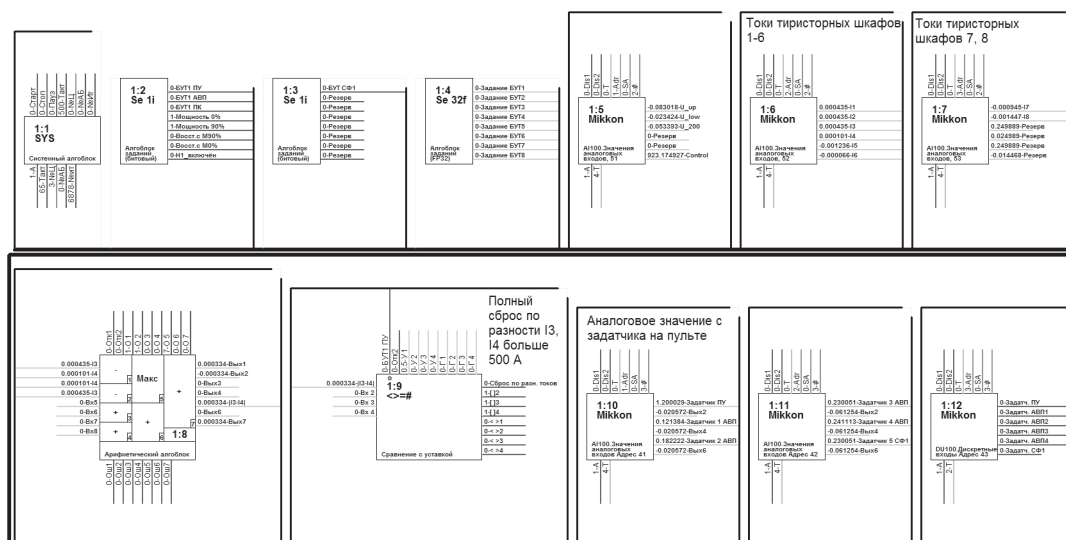


Рис. 5. Начальные алгоблоки программы.

блоков, содержащих в себе наборы функций либо служащие для приема и выдачи необходимых сигналов и их преобразования. Ниже приведено описание алгоритма.

На рис. 5 показаны начальные алгоблоки программы — служебный алгоблок, алгоблоки задания для выбора источника управления мощностью, алгоблоки аналоговых значений с выбранного источника управления мощностью.

Алгоблок задания источника управления мощностью позволяет переключаться между несколькими задатчиками мощности, расположенными в нескольких пунктах управления технологическим процессом кипящего стенда. Алгоблок “Сравнение с уставкой”, представленный на рис. 5, формирует сигнал на блоки аварийной защиты (БАЗ) при разнице между значениями токов со шкафов одного тиристорного агрегата более 500 А. Алгоблоки аналоговых модулей AI100

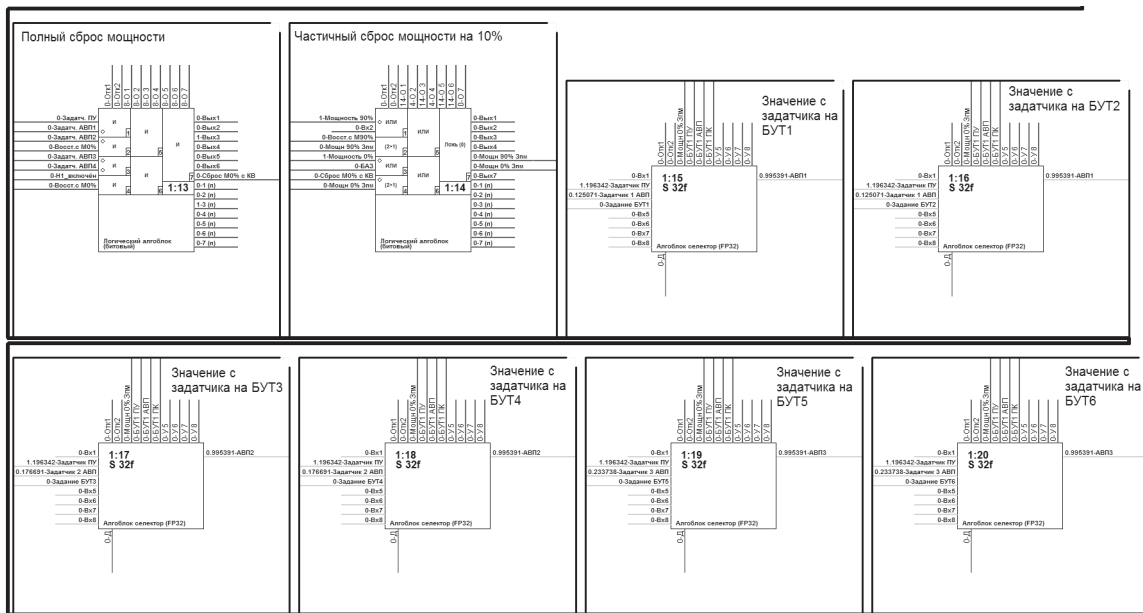


Рис. 6. Логические алгоблоки и алгоблоки-селекторы в теле алгоритма.

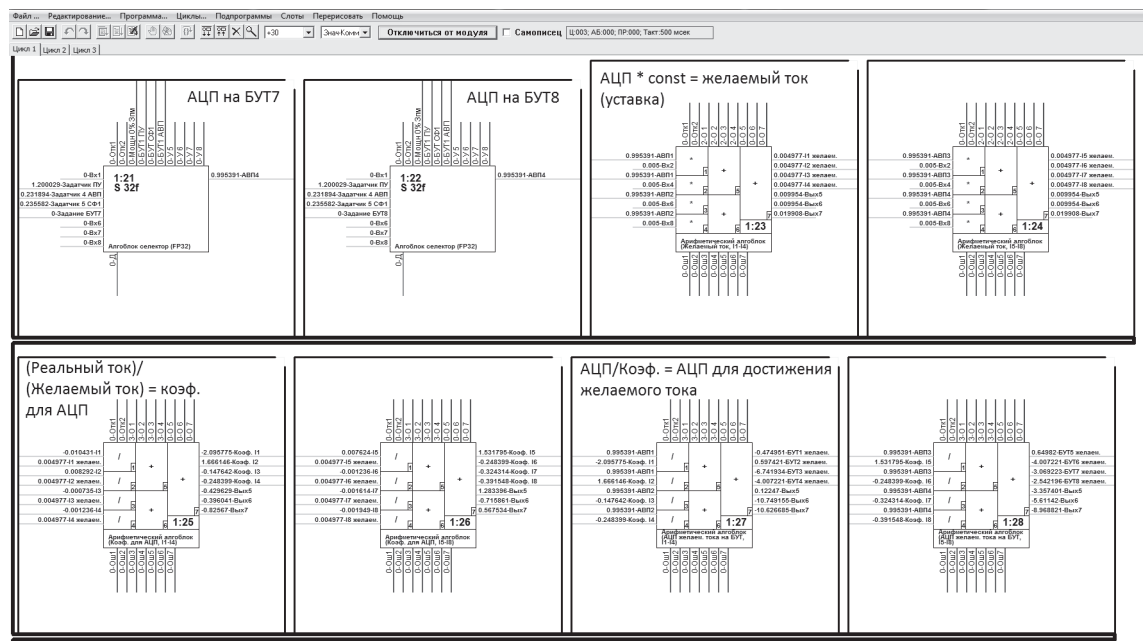


Рис. 7. Арифметические алгоблоки для расчета коэффициента токов.

передают данные с выбранного задатчика мощности, поступающие на вход данных модулей, на следующие алгоблоки программы для дальнейшего преобразования.

На рис. 6 представлены логические алгоблоки и алгоблоки-селекторы.

Логические алгоблоки служат для преобразования сигналов с уставок термодатчиков, датчиков дав-

ления и расходомеров в дискретные логические сигналы частичного и полного сброса мощности. Алгоблоки-селекторы необходимы для выбора одного из четырех аналоговых значений с задатчиков мощности в зависимости от выбранного задатчика.

На рис. 7 показаны арифметические алгоблоки для расчета аналогового значения, передаваемого на алгоблоки модулей БУТ.



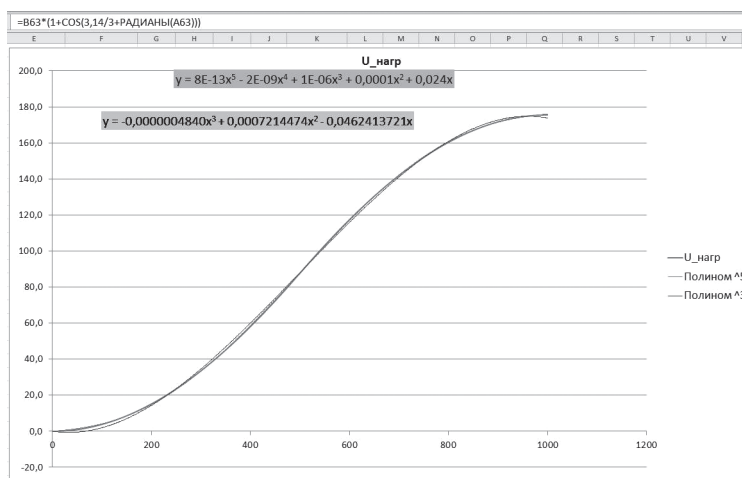


Рис. 8. Зависимость напряжения нагревателей от угла открытия тиристоров.

Ранее работа тиристорных агрегатов не обеспечивала плавную подачу мощности на нагревательные элементы первого контура, неконтролируемые флуктуации и дрейбз токов тиристорных шкафов, вызванные аналоговым контролем угла открывания тиристоров, приводили к нестабильному изменению мощности, в результате чего происходили запроектные кризисы теплоотдачи и, как следствие, сгорание и разрушение имитаторов твэлов — пустотелых медных трубок. Разработанная система управления тиристорными агрегатами направлена на плавное изменение токов тиристорных шкафов и, соответственно, плавное изменение мощности нагревательных элементов.

Как видно на рис. 7, желаемый ток (эталонное значение) является аналоговым значением с задатчика мощности, помноженным на постоянный коэффициент. В ходе работы реальные значения токов с тиристорных шкафов делятся на эталонное значение, и полученный в результате коэффициент используется для преобразования аналогового значения с задатчика мощности в сигнал для модулей БУТ на открытие тиристоров так, чтобы токи каждого тиристорного шкафа были одинаковы.

При отладке системы выяснилось, что постоянный мультипликативный коэффициент аналогового значения задатчика мощности вызывает сильный дрейбз токов из-за их расхождения с параметрами тиристорных агрегатов. Был проведен анализ зависимости напряжения на нагревательном элементе от угла открытия тиристоров. На рис. 8 показана данная зависимость.

Для данной зависимости были построены полиномы 3 и 5 степеней с хорошим приближением к расчетным значениям. С использованием расчетов и двух полиномов были получены три расчетных коэффициента для преобразования аналогового значения с задатчика мощности в эта-

лонное значение желаемого тока. Значения, наиболее близкие к рассчитанным, дал коэффициент, полученный с использованием формулы расчета напряжения нагревателей, приведенной на рис. 8, с учетом угла открытия тиристоров при соотношении полного диапазона угла открытия тиристоров с полным диапазоном значения с задатчика мощности.

Формула для расчета напряжения нагревательных элементов:

$$U_{\text{нагр}} = U_d \cos \frac{\pi \alpha}{180^\circ}, \quad (1)$$

$$U_{\text{нагр}} = U_d \left( 1 + \cos \frac{61\pi \alpha}{180^\circ} \right), \quad (2)$$

где  $U_{\text{нагр}}$  — напряжение нагревательных элементов,  $U_d$  — предельное напряжение заданной степени нагревателя,  $\alpha$  — угол открытия тиристоров (в градусах).

Формула (1) актуальна для угла открытия тиристоров от 0 до 60 градусов, формула (2) актуальна для угла от 61 до 120 градусов.

На рис. 9 показаны фильтры аналоговых значений для уменьшения влияния электрического дрейбза и флуктуаций входного сигнала в модуль аналоговых значений АИ100, а также алгоблоки модулей БУТ.

В арифметических алгоблоках, показанных на рисунке, вычисляется значение аналогового параметра с задатчика мощности при условии срабатывания сигнала частичного либо полного сброса. Далее результат вычислений идет в алгоблок БУТ для передачи данного параметра в модуль управления тиристорами. В соответствии с данным значением тиристоры откроются на определенный угол.

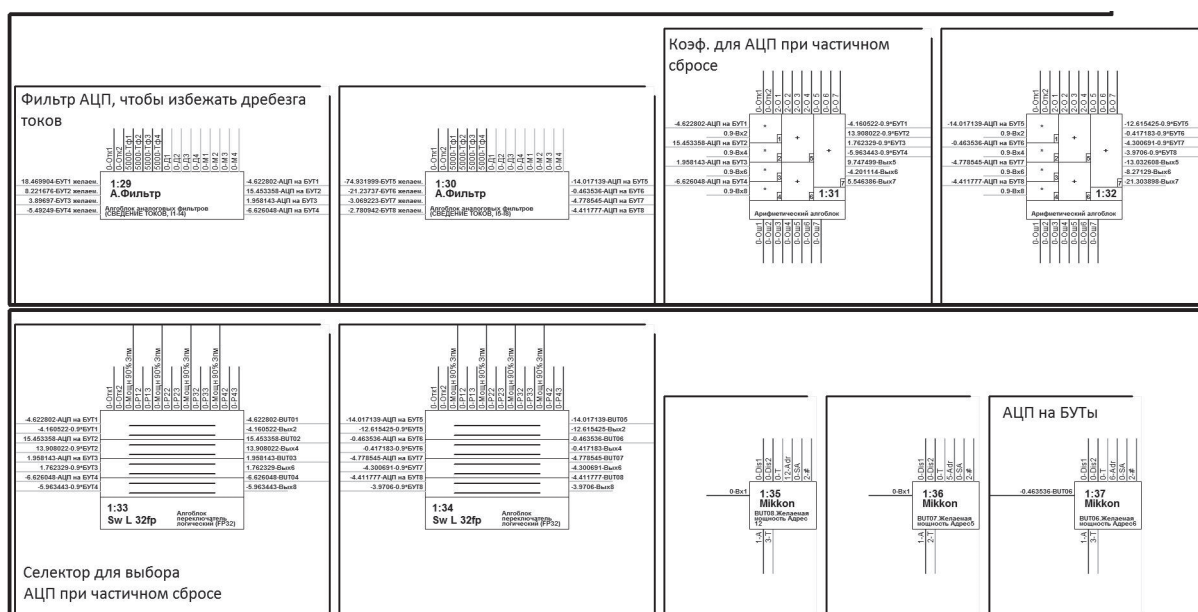


Рис. 9. Фильтр АЦП, передача значений на алгоблоки БУТ.

Написанный алгоритм позволяет переключать задание мощности между несколькими пультами задатчиками, частично или полностью сбрасывать мощность с нагревателя автоматически при поступлении аварийных сигналов, формировать сигналы аварийной защиты тиристорных агрегатов, транслировать команды управления с пульта кипящего стенда КС в модули нижнего уровня и обрабатывать выходные данные агрегатов, такие как токи тиристорных, мощность нагревателя, напряжение на плитах нагревателя. Алгоритм сведения токов к эталонному рассчитанному значению с учетом задатчика мощности написан с целью минимизировать разницу между токами тиристорных шкафов и оптимизировать работу нагревателя.

## РЕЗУЛЬТАТЫ И ИХ ОБСУЖДЕНИЕ

Такт работы программы, написанной с помощью алгоблочного программирования среднего уровня, составляет 50 мс, что достаточно для системы управления тиристорными агрегатами. Задание значения мощности нагревателя происходит с высокой частотой обновления, что позволяет задавать мощность плавно. Проведенные испытания внедренной системы управления показали хорошую сходимость выходных токов и их минимальное отклонение между агрегатами и в пределах ожидаемых величин. На рис. 10 представлен график зависимости изменения значений выходных токов от времени при росте мощности нагревателя.

Рассогласование между токами одного агрегата не превысило 10 А, отклонение токов от ожидаемых величин и выбросы токов также не вышли за пределы 10 А, что позволило плавно наращивать мощность нагревателя при выходе на новые режимы исследования экспериментальной части контура в серии экспериментов по исследованию кризиса теплоотдачи. Рассогласование токов разных тиристорных агрегатов составило в максимуме не более 30 А.

Существенным минусом является сильная неустойчивость системы при подключении всех восьми тиристорных шкафов (всех четырех тиристорных агрегатов). Подключение трех тиристорных агрегатов давало отличную сходимость токов на всем диапазоне работы агрегатов и нагрева рабочего участка, однако при включении одновременно четырех агрегатов при достижении значений 4 кА на один шкаф имели место сильные скачки, флуктуации и дребезг токов всех тиристорных шкафов, достигающие амплитуды в 1–1.5 кА.

Исходя из этого, можно заключить, что данная система отлично подходит для экспериментов с умеренным нагревом рабочего участка кипящего стенда с мощностью нагревателей не более 3 МВт. Однако существенная часть экспериментов на кипящем стенде предполагает повышение мощности нагревателей до максимальных 5 МВт на заданной ступени нагрева, что невозможно при работе созданной системы. В ходе дальнейшей работы для реализации сведения токов тиристорных шкафов к эталонному значению при мощности нагревателей, доходящей до максимума в

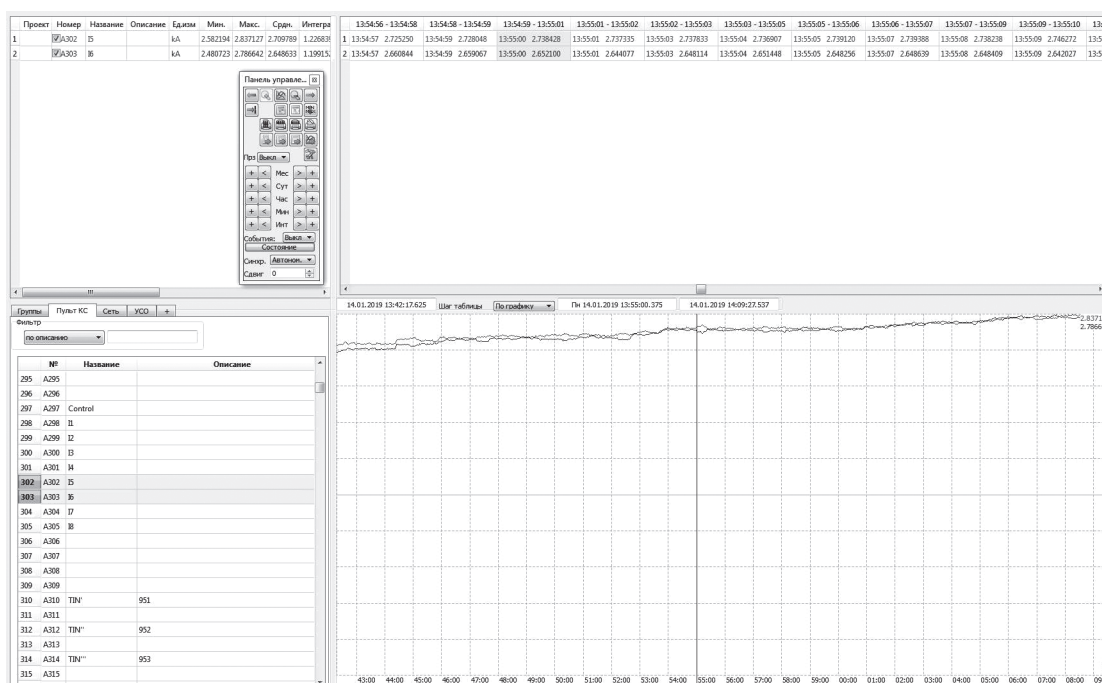


Рис. 10. График зависимости изменения значений выходных токов от времени.

5 МВт, планируется внедрить в алгоритм ПИ-регуляторы для корректировки аналогового значения с задатчика мощности и его преобразования в угол открытия тиристоров через модули БУТ. Рассматривается также возможность использования тока одного тиристорного шкафа как эталонного значения.

## ЗАКЛЮЧЕНИЕ

В соответствии с техническими требованиями и количеством аналоговых и дискретных сигналов была разработана структурная схема алгоритма управления тиристорными агрегатами кипящего стенда. Перед разработкой был проведен анализ и выбор программных средств и аппаратной части системы.

С помощью системы технологического программирования разработан и реализован алгоритм управления тиристорными агрегатами. Разработанная система прошла внедрение и испытания при проведении экспериментов и пробных пусков стенда КС.

Внедрение аппаратной части модернизации тиристорных агрегатов кипящего стенда (модулей управления тиристорами БУТ01 и ДТ01) позволило добиться более информативного и отзывчивого управления нагревом, осуществлять сбор и хранение данных по токам тиристорных шкафов, подаваемой на пучок модели ТВС мощности, информацию о состоянии тиристорных шкафов и блоков аварийной защиты, в то время как

до модернизации управление тиристорными агрегатами осуществлялось с помощью системы релейных схем. Тем не менее, оставалась нерешенной проблема плавной подачи мощности, регулирования токов всех тиристорных шкафов одновременно и существенного рассогласования токов тиристорных шкафов. Внедрение программной части модернизации тиристорных агрегатов решило данные проблемы, сделав возможными также выбор режима нагрева экспериментального пучка модели ТВС в зависимости от установленной ступени напряжения на тиристорных агрегатах, сведение и регулирование токов как одного, так и различных тиристорных агрегатов, приведение экспериментальных зависимостей напряжения нагревателя от угла открытия тиристоров в соответствие расчетным характеристикам.

Система показала отличные результаты работы только при мощности нагревателя не более 3 МВт, чего не всегда достаточно для наблюдения кризиса теплоотдачи и, как следствие, успешного проведения экспериментов. На данном этапе работ система позволяет максимально оптимизировать работу тиристорных агрегатов на мощности до 3 МВт. Для использования данной системы при мощности выше 3 МВт планируется модернизация алгоритма сведения токов и включение в него ПИ-регуляторов.



## СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. *Абрамович М.И., Бабайлов В.М., Либер В.Е.* Диоды и тиристоры в преобразовательных установках. М.: Энергоатомиздат, 1973 г. 432 с.
2. *Лебедев В.О., Власов В.А., Обносков А.В., Толоконский А.О.* Разработка системы технологического программирования на основе системно-ориентированного подхода для распределенных АСУ ТП на базе ПТК УМИКОН и опыт ее внедрения на объектах атомной промышленности // *Ядерные измерительно-информационные технологии*. 2009. № 2. С. 67–77.
3. *Замятин В.Я.* Мощные полупроводниковые приборы. Тиристоры: Справочник. М.: Радио и связь, 1984. 576 с.
4. *Акишин С.В.* Масштабируемый генератор тока для испытания силовых тиристоров. Поиск (Волгоград), 2019. № 1 (10). С. 295–306.
5. *Ковалев Ф.И., Мосткова Г.П.* Полупроводниковые выпрямители. М.: Энергия, 1967. 478 с.
6. *Капустин С.А., Тихомирова И.А.* Разработка физических моделей тиристоров и схем с использованием тиристоров для учебных исследований // Состояние и перспективы развития электро- и теплотехнологии (XVIII Бенардосовские чтения). Материалы междунар. науч.-техн. конф., 2015 г. С. 242–246.
7. *Лебедев В.О.* Об оптимальной структуре комплекса технических средств АСУТП // *Автоматизация в промышленности*. 2013. № 7. С. 64–67.
8. *Лебедев В.О.* Руководство пользователя MWBridge MLB. 2020 г.
9. *Paluh B.V., Vetrov A.N., Egereva I.A., Kozlova Yu.G.* The information system of evolution control of multistage processes of production and technical systems in fuzzy dynamic environments // *Открытые семантические технологии проектирования интеллектуальных систем*. 2017. № 7. С. 301–304.
10. *Колодников И.А., Лебедев В.О.* К вопросу об архитектуре современных АСУТП // *Автоматизация в промышленности*. 2018. № 8. С. 9–12.
11. *Nasiri A., Omid M., Taheri-Garavand A.* An automatic sorting system for unwashed eggs using deep learning // *Journal of Food Engineering*, 2020. V. 283. 110036.
12. *Patel A.R., Ramaiya K.K., Bhatia C.V., Shah H.N., Bhavsar S.N.* Artificial Intelligence: Prospect in Mechanical Engineering Field- a review // *Lecture Notes on Data Engineering and Communications Technologies*, 2021. V. 52. P. 267–282.
13. *Volodin V.S., Tolokonsky A.O.* Implementation of the diversity principle of software and hardware complexes of process control systems for nuclear facilities in educational process // *Izvestiya Vysshikh Uchebnykh Zavedeniy, Yadernaya Energetika*, 2018. V. 2018. № 1, Q4 P. 154–164.
14. *Balakin B.V., Delov M.I., Kutsenko K.V., Lavrukhin A.A., Laouar S., Litvintsova Y.E., Marchenko A.S., Maslov Y.A.* Analyzing temperature fluctuations to predict boiling regime // *Thermal Science and Engineering Progress*, 2017. V. 4. P. 219–222.

---

**Vestnik Natsional'nogo issledovatel'skogo yadernogo universiteta "MIFI", 2021, vol. 10, no. 4, pp. 328–337**

---

## Development of a Control System for the Thyristor Units of a Boiling Stand

**P. S. Bondar<sup>a,\*</sup> and A. O. Tolokonskiy<sup>b</sup>**

<sup>a</sup> National Research Center Kurchatov Institute, Moscow, 123182 Russia

<sup>b</sup> National Research Nuclear University MEPhI (Moscow Engineering Physics Institute), Moscow, 115409 Russia

\*e-mail: bon.pavel2010@yandex.ru

Received September 2, 2021; revised October 11, 2021; accepted October 12, 2021

**Abstract**—The development and implantation of a control system for the thyristor units of a boiling stand at the National Research Center Kurchatov Institute are described. The general purpose of the Boiling stand, the operation of thyristor units, and the experimental section heating are discussed. The design of the thyristor units of the boiling stand, the heating control system, the principles of constructing control systems in real time, and technological programming systems for their various hierarchical levels are studied. Particular attention is paid to the middle-level algorithmic programming system, which is the foundation for the main control algorithms of the boiling stand. Using the data obtained, control algorithms for the equipment of the boiling stand have been developed and implemented. Their application software operates in real time and makes it possible to control the heating of the experimental section in an optimal way, as well as to control the output currents of thyristor aggregates more accurately and efficiently. The experiments results of the implemented software after the experiments at various capacities and different operating modes of the boiling stand have been analyzed.

**Keywords:** program, algorithm, control, thyristor, unit, stand, heater

DOI: 10.1134/S2304487X21040027

## REFERENCES

1. Abramovich M.I., Babaylov V.M., Liber V.E. *Diody i tiristory v preobrazovatelnykh ustanovkakh* [Diodes and thyristors in converter installations]. Moscow, Energoatomizdat Publ., 1973. 432 p.
2. Lebedev V.O., Vlasov V.A., Obnosov A.V., Tolokon-skiy A.O. Razrabotka sistemy technologicheskogo programmirovaniya na osnove sistemno-orientirovannogo podhoda dlya raspredelennykh ASU TP na base PTK UMIKON i opyt eyo vnedreniya na ob'yektakh atomnoy promyshlennosti [Development of a technological programming system based on a system-oriented approach for distributed process control systems based on UMIKON software and hardware complex and experience of its implementation at nuclear facilities], *Yadernye izmeritelno-informatsionnye technologii*. 2009, no. 2. P. 67–77. (in Russian)
3. Zamyatin V.Ya. *Moshchnye poluprovodnikovye pribory* [High-powered semiconductor devices]. Tiristory: Spravochnik. Moscow, Radio i svyaz Publ., 1984. 576 p.
4. Akishin S.V. Masshtabiruemyy generator toka dlya ispytaniya silovykh tiristorov [Scalable current generator for power thyristors testing], *Poisk (Volgograd)*, 2019, no 1 (10). P. 295–306. (in Russian)
5. Kovalev F.I., Mostkova G.P. *Poluprovodnikovye vypryamiteli* [Semiconductor rectifiers], Energiya Publ., 1967. 478 p.
6. Kapustin S.A., Tihomirova I.A. [Development of physical models of thyristors and circuits using thyristors for educational research]. *Materialy mezhdunarodnoy nauch.-tekhn. konf. "Sostoyanie i perspektivy razvitiya elektro- i teplotekhnologii" (XVIII Benardosovskie chteniya)*. [Mat. of the int. scientific and techn. conf. "State and prospects for the development of electrical and heat technology" (XVIII Benardosovskie chteniya)], 2015. P. 242–246. (in Russian)
7. Lebedev V.O. Ob optimalnoy structure kompleksa teh-nicheskikh sredstv ASUTP [The complex of technical means of the process control system's optimal structure], *Avtomatizatsiya v promyshlennosti*. 2013, no. 7. P. 64–67. (in Russian)
8. Lebedev V.O. *Rukovodstvo polzovatelya MWBridge MLB* [MWBridge MLB user guide]. 2020, 246 p. (in Russian)
9. Paluh B.V., Vetrov A.N., Egereva I.A., Kozlova Yu.G. The information system of evolution control of multi-stage processes of production and technical systems in fuzzy dynamic environments. *Open semantic technologies for the intelligent systems design*, 2017, no. 7. P. 301–304.
10. Kolodnikov I.A., Lebedev V.O. K voprosu ob arhitec-ture sovremennykh ASUTP [On the question of the modern process control systems architecture], *Avtomatizatsiya v promyshlennosti*. 2018, no. 8. P. 9–12. (in Russian)
11. Nasiri A., Omid M., Taheri-Garavand A. An automatic sorting system for unwashed eggs using deep learning. *Journal of Food Engineering*, 2020. vol. 283, 110036.
12. Patel A.R., Ramaiya K.K., Bhatia C.V., Shah H.N., Bhavsar S.N. Artificial Intelligence: Prospect in Mechanical Engineering Field -a review. *Lecture Notes on Data Engineering and Communications Technologies*, 2021. vol. 52. P. 267–282.
13. Volodin V.S., Tolokonsky A.O. Implementation of the diversity principle of software and hardware complexes of process control systems for nuclear facilities in educational process // *Izvestiya Vysshikh Uchebnykh Zavedeniy. Yadernaya Energetika*, 2018. vol. 2018, no. 1, Q4 pp. 154–164.
14. Balakin B.V., Delov M.I., Kutsenko K.V., Lavrukhin A.A., Laouar S., Litvintsova Y.E., Marchenko A.S., Maslov Y.A. Analyzing temperature fluctuations to predict boiling regime, *Thermal Science and Engineering Progress*, 2017. vol. 4. P. 219–222.