

Р9-2013-10

В. Н. Замрий, А. П. Сумбаев

ПРЕЦИЗИОННАЯ ТЕРМОСТАБИЛИЗАЦИЯ
СЕКЦИИ УСКОРИТЕЛЯ ЛУЭ-200

Замрий В. Н., Сумбаев А. П.

P9-2013-10

Прецизионная термостабилизация секции ускорителя ЛУЭ-200

Разработана двухконтурная система термостатирования ускоряющей секции линейного ускорителя электронов с бегущей волной 10-см диапазона. С целью обеспечения требуемого теплоотвода и возможности перенастройки секции при изменении режимов ускорения регулируются температура в системе термостата и проток охлаждающей воды во внешнем контуре. Для достижения требуемой точности (0,1 %) и времени стабилизации температуры термостата, имеющего протяженные водные магистрали, применен метод пропорционально-интегрально-дифференциального (ПИД) управления. Программное управление дает возможность адаптировать систему для нескольких режимов работы, таких как быстрый контролируемый разогрев, управляемое установление температуры и термостабилизация, изменение заданной температуры термостата. Это позволяет уменьшить погрешности и время входа в режим термостатирования, а также снизить энергопотребление термостата.

Работа выполнена в Лаборатории физики высоких энергий им. В. И. Векслера и А. М. Балдина ОИЯИ.

Сообщение Объединенного института ядерных исследований. Дубна, 2013

Zamriy V. N., Sumbaev A. P.

P9-2013-10

Precision Thermostabilization for LUE-200 Accelerator Section

A two-loop thermostating system for the accelerating section of the S-band electron linac has been developed. To provide the required heatsink path and an opportunity of re-changing the section while altering the acceleration mode, the temperature in the system of the thermostat and the cooling water channel in the external contour are regulated. To achieve the required precision (0.1%) and stabilization time of the temperature of the thermostat having extended waterways, the method of proportional-integral-derivative (PID) control has been applied. The programmed control allows one to adapt the system for several operating modes: the fast warming-up, operated settling of temperature and thermostabilization, change of the preset temperature of the thermostat. It provides the reduction of errors and setting time of the thermostating regime, and also minimization of power consumption of the thermostat.

The investigation has been performed at the Veksler and Baldin Laboratory of High Energy Physics, JINR.

Communication of the Joint Institute for Nuclear Research. Dubna, 2013

ВВЕДЕНИЕ

Для линейного ускорителя электронов ЛУЭ-200 — драйвера импульсного источника нейтронов ИРЕН [1] тепловые потери P_{RF} , связанные с СВЧ-разогревом стенок ускоряющей структуры, составляют около 30 % проектной мощности, поступающей от клистрона, и могут (в зависимости от частоты повторения циклов ускорения) достигать $P_{RF} = 10\text{--}12$ кВт. Изменение температурного режима ускоряющей структуры, вызывающее смещение ее резонансной частоты ($\sim 0,05$ МГц/°С), приводит к снижению средней энергии частиц, к увеличению энергетического разброса пучка электронов и, в итоге, к снижению выхода нейтронов источника ИРЕН.

Влияние флуктуации температуры на свойства пучка электронов ускорителя и, в конечном итоге, на выход нейтронов иллюстрируют графики, полученные при настройке секции. Наблюдаемые флуктуации интенсивности нейтронного пучка (рис. 1) коррелируют по времени с отклонениями температуры $\pm 0,3$ °С, имеющими период повторения порядка 10 мин (рис. 2).

Регулирование мощности нагрева и компенсирующего охлаждения, как показывают критерии их выбора [2], должно быть обеспечено от 0 до P_{RF} , т. е. в диапазоне $\sim 0\text{--}10$ кВт. Имеющиеся нестабильности температуры и протока воды системы охлаждения, а также температуры внешней среды приводят к необходимости расширить этот диапазон на 50–100 %. Это необходимо и для обеспечения нужного качества прецизионного управления,

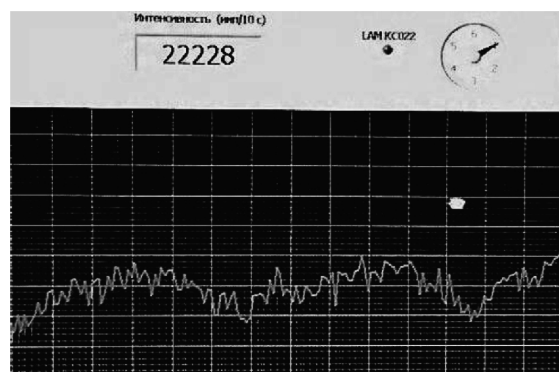


Рис. 1. Флуктуации интенсивности нейтронов (имеющие период повторения ~ 10 мин)

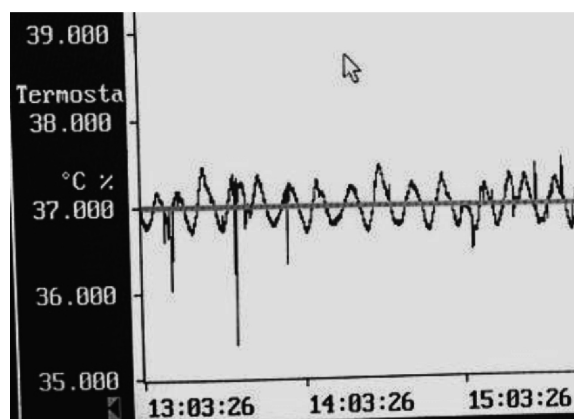


Рис. 2. Флуктуации температуры секции

определяемого соотношением погрешностей и времени установления рабочей температуры.

Требуемые точности ($\sim 0,1\%$) и время разогрева секции, а также большие протяженности (~ 70 м) и объем (~ 1 м³) водных магистралей термостата определили условия применения методов пропорционально-интегрально-дифференциального (ПИД) регулирования мощности электронагревателей, установленных в контуре управления.

Построенный прототип программируемой системы термостабилизации ускорительной секции был испытан ранее в штатных режимах ускорителя ЛУЭ-40 [2]. Модифицированный комплекс, в котором применены более точный контроллер и алгоритмы ПИД-регулирования [3], а также мощные тиристорные блоки и электронагреватели с трехфазным питанием, был адаптирован для экспериментально-наладочных работ на СВЧ-стенде ИРЕН. В создаваемой системе термостабилизации секции (СТС) стабильность СВЧ-параметров ускоряющей структуры поддерживается при помощи двухконтурной схемы управления [4]. Новая система СТС может обеспечить отбор излишнего тепловыделения секции, ускоренное установление рабочей температуры и ее стабилизацию на заданном уровне уставки ($32-42$ °С) с требуемой точностью ($\pm 0,1$ °С), а также программируемое снижение энергопотребления термостата.

СИСТЕМА ТЕРМОСТАБИЛИЗАЦИИ СЕКЦИИ ЛУЭ-200

Схема управления СТС ЛУЭ-200. Структурная схема управления термостабилизированным охлаждением секции показана на рис. 3. Магистраль термостата, в которой дистиллированная вода из термостата прокачивается

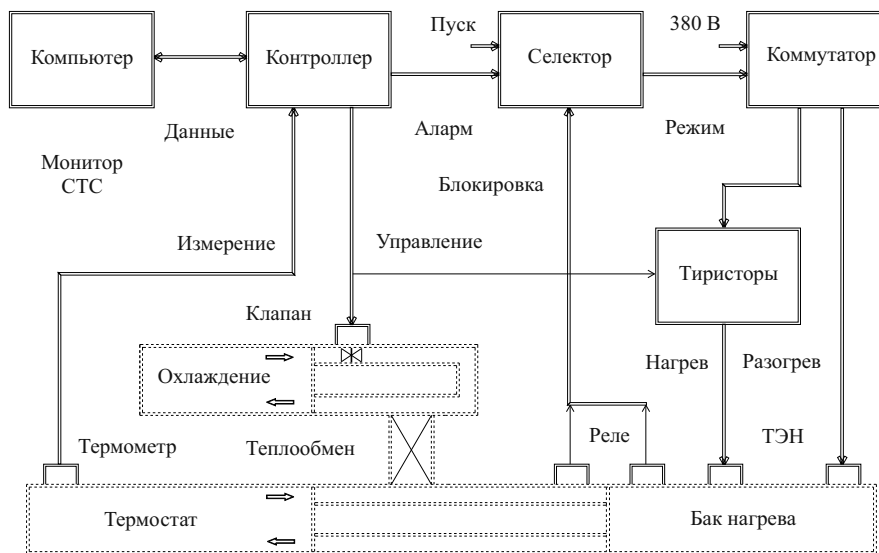


Рис. 3. Структурная схема управления СТС

через теплообменник и затем через бак нагрева, имеет прецизионный термометр (встроенный на выходе термостата), мощные теплоэлектрические нагреватели бака (ТЭН) и группу реле блокировки. Внешняя магистраль, в которой вода из системы охлаждения ускорителя прокачивается через теплообменник термостата, имеет встроенный управляющий клапан с электроприводом. Оборудование магистралей включает также обычно используемые стандартные вентили, насосы, манометры и др.

ПИД-контроллер (906S Eurotherm Controls) подключен к платиновому термометру сопротивления (PRT 100), а также к управляемым тиристорам и электроприводу клапана. Сигналы контроллера (аларм), поступающие при превышении заданных значений (порогов) температуры, подаются в блок селектора для выбора режима СТС.

Блок селектора режима предназначен для диагностики аларм-сигналов контроллера и сигналов реле блокировки. Этот блок обеспечивает включение (пуск), контроль и переключение режимов термостата, а также блокировку включения или защитное отключение мощного коммутатора СТС.

Блок коммутатора предназначен для управляемого переключения и автоматической защиты трехфазного электропитания ($3 \times 380 \text{ В}$) группы тиристорных блоков и нагревателей ТЭН. Мощные твердотельные реле коммутируют цепи питания группы тириستоров нагрева и группы ТЭН разогрева или блокируют их включение.

Каждый из трех тиристорных блоков (425A Eurotherm), управляемых сигналом контроллера (0–10 В), обеспечивает регулирование мощности (~ 0 –100 %, до 5,5 кВ · А), а электропривод клапана (VBA-90 Clogius Controls) — изменение протока или давления воды (от 100 % до 0 %).

Основные процессы и режимы управления СТС. В системе термостабилизации секции ЛУЭ-200 применено ПИД-регулирование процессов как нагрева дистиллированной воды (подаваемой в термостат), так и охлаждения теплообменника (с целью охлаждения дистиллята, поступающего из термостата). Регулирование мощности нагрева и протока охлаждающей воды дополнено подключением предварительного разогрева (который предназначен для того, чтобы сократить период установления рабочей температуры). Оперативный контроль и диагностика температурных условий для основных процессов (ускоренный рост, установление и поддержание температуры либо их блокировка) определяют выбор режимов разогрева, нагрева и термостабилизации либо автоматической защиты СТС (табл. 1).

Таблица 1. Основные режимы, процессы и температурные условия

Режим	Процесс	Условие температуры
Контролируемый разогрев	Ускоренный рост температуры	Ниже порога 1
Регулируемый нагрев	Установление температуры	Ниже порога 2
Термостабилизация	Поддержание температуры	На уровне уставки
Выбор режима разогрева	Диагностика, переключение 1	Порог 1, гистерезис 1
Выбор режима нагрева	Диагностика, переключение 2	Порог 2, гистерезис 2
Автоматическая защита	Диагностика, блокировка	Сигнализация

Условием выбора режима является заданная температурная уставка, порог и гистерезис переключения или состояние сигнализации. Отключение разогрева (или нагрева) происходит, когда температура превышает значение порога 1 (или порога 2). Повторное включение этих режимов возможно, когда температура становится ниже порога на величину его гистерезиса. Программирование этих условий позволяет ускорить разогрев и предупредить излишний нагрев секции. Автоматическая защита термостата включается при диагностике сигнализации реле блокировки (перегрев или уровень воды в баке, отсутствие протока воды и др.).

Последовательности операций управления СТС. Температура воды на выходе термостата измеряется контроллером с точностью $\sim 0,1$ % (при частоте повторения выборки 10 с^{-1}). Из-за протяженности измерительных линий (до 70 м) и большой интенсивности помех выполняются программные и аппаратные меры повышения помехозащищенности СТС. Контроллер определяет изменение температуры (ошибку относительно уровня уставки) и назначает необходимое ПИД-регулирование. Программное управление позволяет адаптировать последовательности операций для выполнения контроли-

руемого разогрева, управляемого установления и поддержания температуры или их отключения. При включении разогрева (в его начале) все электронагреватели включаются полностью, а клапан охлаждения закрывается, поэтому происходит наиболее быстрый рост температуры. В ходе установления и последующего поддержания уровня температуры плавно снижается мощность регулируемого нагрева и приоткрывается клапан охлаждения теплообменника, обеспечивающего теплоотвод. Время и погрешности установления температуры, зависящие от инерционности нагрева и охлаждения термостата и его магистралей, могут быть минимизированы при помощи настройки ряда параметров ПИД-регулирования (диапазон пропорционального управления, время интегрирования или дифференцирования и др.). В ходе долговременной термостабилизации поддерживается уровень установившейся температуры (т. е. достигнутый баланс мощностей нагрева и компенсирующего охлаждения). Изменения уровня мощности СВЧ-разогрева секции компенсируются плавно с необходимой точностью, а перенастройка и установление температуры выполняются ускоренно согласно настройке операций управления СТС.

Процессы установления и прецизионной стабилизации температуры термостата ЛУЭ-200 иллюстрируются графиком данных, регистрируемых контроллером (рис. 4). Регулирование мощности (в диапазоне 36–100 %) и температуры нагрева (27–38 °С) при заданном значении уставки (37 °С) и времени установления (~ 3 ч) приводит в итоге к снижению основной ошибки термостабилизации до величин менее 0,1 °С.

Компьютер с адаптированной программой управления IPSPG, дополняющей возможности контроллера при настройках конфигурации и параметров системы, выполняет накопление регистрируемых данных и непрерывный мониторинг СТС (рис. 5). Регулирование температуры (Process Variable) на уровне уставки (Working Setpoint) показано в основных режимах СТС. После

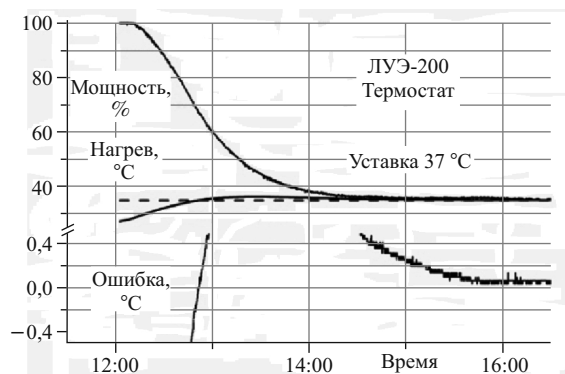


Рис. 4. Процессы термостабилизации

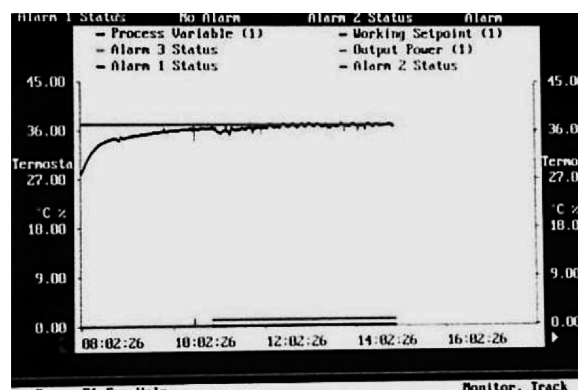


Рис. 5. Монитор СТС ЛУЭ-200

изменения аларм-сигнала (Alarm 2 Status) наблюдается отключение контролируемого разогрева, завершение управляемого установления температуры и затем долговременное поддержание уровня температуры секции.

Параметры системы термостабилизации первой секции ЛУЭ-200. Основные параметры, их значения и заданные условия обобщены в табл. 2).

Вариации значений времени и погрешности установления температуры зависят от вариации режимов термостата СВЧ-секции и изменения условий охлаждения, а также настройки параметров термостатирования. ПИД-регулирование нагрева и охлаждения позволяет минимизировать погрешность термостабилизации, время и погрешности установления температуры и, как показывает таблица, многократно улучшить качество регулирования.

Таблица 2. Основные параметры СТС ЛУЭ-200

Параметр	Значение	Заданное условие
Температура термостата	37 °С	Рабочая уставка (32–42 °С)
Порог контролируемого разогрева	36,6 °С	Ниже уставки
Время установления температуры	~ 0,5–3,5 ч	Погрешность установления
Погрешность установления	~ 0,1–1 °С	Время установления
Погрешность стабилизации	0,1 °С	Время интегрирования
Порог регулируемого нагрева	40 °С	Выше уставки
Мощность регулируемого нагрева	~ 0–9 кВ · А	3 нагревателя (0–100 %)
Мощность контролируемого разогрева	~ 6–15 кВ · А	5 нагревателей (67–167 %)
Регулируемое охлаждение	0–100 %	Проток воды, давление до 3 кгс/см ²

ЗАКЛЮЧЕНИЕ

Созданная прецизионная система СТС на основе ПИД-контроллера позволяет снизить погрешности установления и стабилизации температуры до значений 0,1 %. Применение регулируемого нагрева и контролируемого разогрева позволило увеличить диапазон мощности СТС и, в итоге, уменьшить влияние системных и внешних факторов нестабильности. Полученный запас мощности позволяет повысить качество регулирования и сократить период разогрева термостата в 1,5–2 раза. Применение двух контуров ПИД-регулирования (как нагрева, так и охлаждения) снижает более чем вдвое время и погрешности установления температуры, а также и энергопотребление термостата (прежде всего, благодаря программируемому уменьшению теплоотвода при разогреве и установлении температуры термостата при входе в штатный режим работы СВЧ-секции).

Система термостатирования секции используется в штатных режимах работы ускорителя как при кратковременных наладочных циклах, так и при продолжительных периодах работы ЛУЭ-200 с целью обеспечения проводимых нейтронно-физических экспериментов. Дальнейшее развитие системы прецизионной термостабилизации для первой и затем второй секций ускорителя ЛУЭ-200 связано с поэтапным наращиванием мощности пучка и повышением частоты повторения циклов ускорителя. При сопровождающем их росте мощности СВЧ-разогрева секции требуется расширенный диапазон ПИД-регулирования и адаптация программы прецизионной термостабилизации.

ЛИТЕРАТУРА

1. Белозеров А. В. и др. Физический пуск установки ИРЕН // Письма в ЭЧАЯ. 2010. Т. 7, № 7(163). С. 903–932.
2. Бельковец В. А. и др. Система термостабилизации секции ускорителя // XVII International Symposium on Nuclear Electronics (Varna, 1997). Дубна: ОИЯИ, 1998. С. 233–236.
3. Zamrii V. N. Data Acquisition Electronics with Timing for Control of the IREN Test Facility // Nuclear Electronics & Computing. Proc. of XVIII International Symposium, Varna, 2001. Dubna: JINR, 2002. P. 235–241.
4. Zamriy V. N., Sumbaev A. P. Precision Thermostatic Control for LUE-200 Accelerator Section // Proc. of XXIII Russian Particle Accelerator Conference, Saint-Petersburg, 24–28 September, 2012; <http://accelconf.web.cern.ch/AccelConf/rupac2012/papers/weppd040.pdf>. P. 929–931.

Получено 31 января 2013 г.

Редактор *М. И. Зарубина*

Подписано в печать 21.02.2013.

Формат 60 × 90/16. Бумага офсетная. Печать офсетная.

Усл. печ. л. 0,62. Уч.-изд. л. 0,78. Тираж 215 экз. Заказ № 57920.

Издательский отдел Объединенного института ядерных исследований
141980, г. Дубна, Московская обл., ул. Жолио-Кюри, 6.

E-mail: publish@jinr.ru

www.jinr.ru/publish/