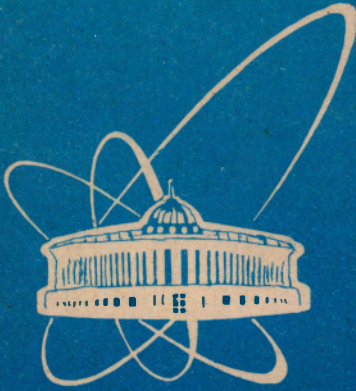


97-143



СООБЩЕНИЯ
ОБЪЕДИНЕННОГО
ИНСТИТУТА
ЯДЕРНЫХ
ИССЛЕДОВАНИЙ

Дубна

P9-97-143

В.А.Бельковец, В.Н.Замрий, А.Б.Роганов, А.П.Сиротин

СИСТЕМА ТЕРМОСТАБИЛИЗАЦИИ ЛУЭ
С ПРОГРАММИРУЕМЫМ КОНТРОЛЛЕРОМ

1997

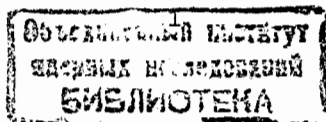
Проект нейтронного источника ИРЕН * с 200 МэВ линейным ускорителем электронов ЛУЭ-200 предусматривает создание полномасштабного стенда и испытания основных систем ускорительной секции /1/. Цель этих работ – получить градиент ускорения 35 МэВ/м с использованием мощного высокочастотного (2856 МГц) оборудования. Другие системы, например, пучковой диагностики, испытываются на действующем ускорителе ЛУЭ-40. Номинальные значения мощности пучка (~10 кВт) с градиентом ускорения ~35 МэВ/м в основном зависят от подводимой мощности и стабильности фазы СВЧ. Последняя поддерживается при помощи термостатирования ускорительных секций, подверженных мощному СВЧ-разогреву.

Разработка системы термостатирования для ЛУЭ-200 рассматривается поэтапно. На первом этапе выполнено термостатирование ускорительной секции ЛУЭ-40. На этом этапе работ сделана оценка качества термостабилизации и экспериментальная проверка ее динамических параметров. Цель этой работы – создание экспериментальной системы на ЛУЭ-40 для исследования процессов стабилизации температуры с точностью 0,05–0,1°C, а также оценка параметров пропорционального и интегрально-дифференциального (ПИД) регулирования и динамики процессов термостабилизации ЛУЭ.

Для стабилизации температуры воды, перекачиваемой через секцию ЛУЭ, рассматривались возможности применения ПИД-регулятора на основе разработанных модулей (КАМАК, VME) программируемого контроллера /2, 3/.

Необходимые прецизионные измерения выполнены с использованием завершенной системы (рис. 1). Ее основой является контроллер-программатор (тип 902P, “Eurotherm Controls”), а также тиристорный блок (425A, “Eurotherm Automation”) и программа поддержки их работы с компьютером IBM PC.

* Работа поддержана планом развития установок ОИЯИ, тема 06-4-0993-94/99.



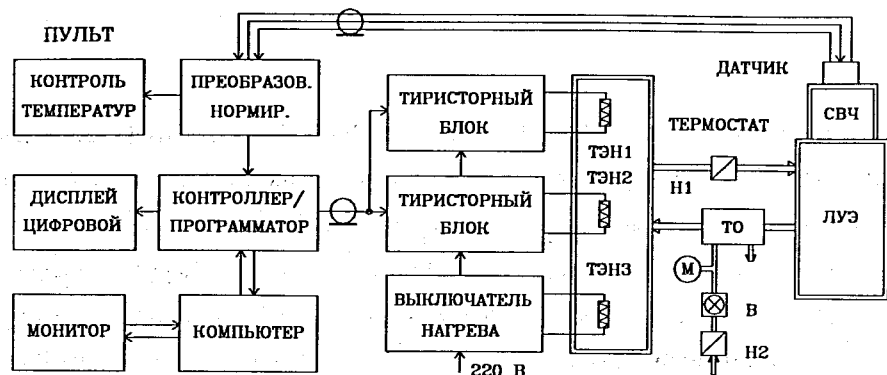


Рис. 1. Схема термостабилизации ускорительной секции ЛУЭ

На линейный вход контроллера подан сигнал (0÷10 В) нормирующего преобразователя (ПТ-ТС-68), подаваемый также на контрольно-измерительные приборы пульта. Удаленный на ~300 м датчик сигнала (платиновый термопреобразователь сопротивления ТСП, Гр. 21) установлен на стенке диафрагмированного СВЧ-волновода ЛУЭ. Управляемый сигналом контроллера (0÷10 В) тиристорный блок 425А обеспечивает выходной ток 0÷25 А (при мощности $P=0\div5,5$ кВА). Нагрузкой блока является термоэлектрический нагреватель (ТЭН), мощность которого 3,5 кВА. Нагреватели ТЭН, питаемые от сети 220 В, подогревают в двух баках термостата (их емкость 2,4 м³) дистиллированную воду, перекачиваемую насосом (Н1). Последнюю на выходе из секции ЛУЭ охлаждают в теплообменнике (ТО) проточной водой, которая при помощи насоса (Н2) подается из артезианской скважины (с температурой ~7°C). Давление проточной воды (и ее расход), контролируемое по показанию манометра (М), устанавливают (до 2,0÷2,5 кг/см²) с помощью вентиля (В).

Схема термостабилизации СВЧ-секции была испытана сначала с одним управляемым и двумя постоянно включенными нагревателями ТЭН. Для установившейся температуры при заданных ее значениях T в диапазоне 39÷41°C (и соответственно подобранной величине давления воды) получена ожидаемая

статическая точность стабилизации $0,05\div0,1^\circ\text{C}$. В режиме нагрева без включения мощности СВЧ для достижения заданного уровня температуры T требуется время ее полного установления (τ) более 20÷120 минут. Большая длительность τ , зависящая от диапазона и скорости изменения температуры, связана с возможной величиной динамической и статической составляющих погрешности регулирования (ΔT и τ) и их более оптимальное соотношение, а также соответствующие им параметры задания для ПИД-регулятора. В частности, для его пропорциональной и интегральной составляющих были заданы диапазоны малых изменений температуры (до $\pm 0,4^\circ\text{C}$) и больших времен (~10–60 мин).

В ходе многосуточных испытаний системы был замечен медленный рост или спад уровня T , превышающий ошибку ΔT , даже когда регулируемый ТЭН соответственно выключен или включен. Следовательно, диапазон мощности $P=(0\div3,5)$ кВА не достаточен для надежного обеспечения продолжительного автоматического регулирования при возможной нестабильности систем охлаждения и СВЧ-нагрева секции ЛУЭ.

В дальнейшем с целью уменьшить влияние таких случайных факторов в системе стабилизации увеличена регулируемая мощность P (подключением двух нагревателей ТЭН к выходу одного или двух управляемых блоков 425А). При продолжительной регистрации параметров регулирования стало возможным определить вклад тех факторов нарушения баланса мощностей нагрева и охлаждения, которые могли бы повлиять на точность и время установления τ .

При последующих измерениях система охлаждения была настроена так, чтобы при выключенной мощности СВЧ и включенных нагревателях ТЭН температура $T=40^\circ\text{C}$ поддерживалась регулированием мощности P на уровне ~50% от максимальной величины 7 кВА. При таких условиях расширенный диапазон регулирования позволяет сохранить требуемое качество стабилизации при наблюдаемых повышениях мощности СВЧ в режимах “тренировки” секции и при нестабильности охлаждения.

Многосуточные циклы измерения стабильности системы термостатирования секции проводились при штатных режимах работы систем ЛУЭ-40. Для выбранных параметров ПИД-регулирования накапливались данные многочасовых измерений величин T и P . Эти данные вводятся в компьютер РС по линии связи RS232c из контроллера 902P. Контроллер в автономном режиме стабилизирует величину температуры по программируемому и введенному заданию, а также выводит измеряемые величины на цифровой дисплей. Для корректировки параметров задания на мониторе РС представлены их таблицы, а для контроля стабилизации температуры – графики текущих изменений. Накопленные файлы данных для дальнейшего анализа представлены с использованием программы "GRAPHER" в виде функций температуры (T , °C) и мощности нагрева (P , %) от времени (t , минуты). Некоторые графики, показывающие характерные особенности системы термостабилизации ЛУЭ, приведены ниже и рассмотрены более подробно.

На рис. 2 показаны процессы установления температуры на заданном

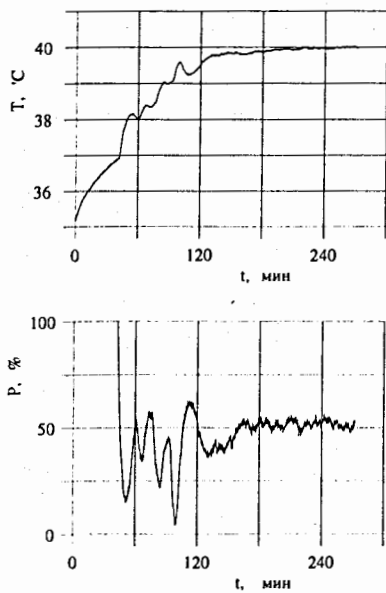


Рис. 2

уровне $T=40^{\circ}\text{C}$ и мощности $P\approx 3,5$ кВА (для ПИД-регулятора также заданы диапазон пропорционального регулирования 1% от уровня T и постоянная времени интегрирования 2000 секунд). Участки температуры $(35-37)^{\circ}\text{C}$, $(37-39,5)^{\circ}\text{C}$ и выше соответствуют режиму нагрева при отключенном ЛУЭ (в течение ~ 50 минут), затем включенным режимам "тренировки" и дальнейшей работы секции. После начала включения ЛУЭ через 90, 150 и 190 минут погрешность температуры ΔT составляла, соответственно, $0,4^{\circ}\text{C}$, $0,1^{\circ}\text{C}$ и $0,05^{\circ}\text{C}$.

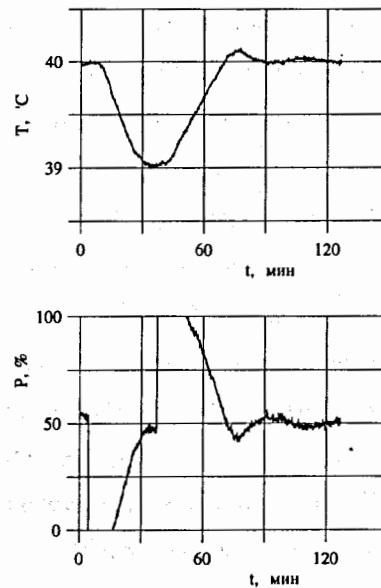


Рис. 3.

На рис. 3 показаны процессы установления температуры и мощности при смене задания $T=40^{\circ}\text{C}$ на $T=39^{\circ}\text{C}$ и через ~ 35 минут снова на $T=40^{\circ}\text{C}$. Время полного установления $\tau \sim 30$ минут достаточно для вхождения температуры в диапазон погрешностей до $\pm 0,1^{\circ}\text{C}$. В этих пределах находится и динамическая погрешность установления температуры. Точность стабилизации может сохраняться при смене задания T в расширенном диапазоне $35-45^{\circ}\text{C}$ (без регулировки систем охлаждения).

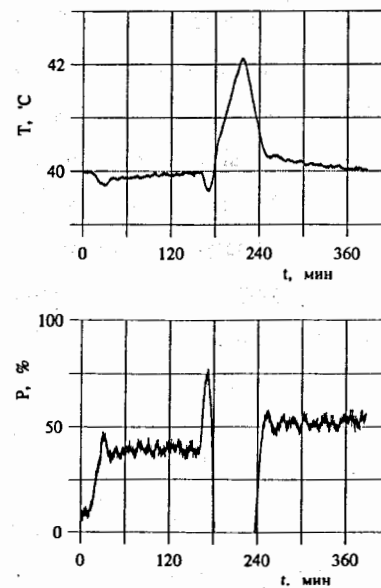


Рис. 4

Приведенные графики (рис. 4) также показывают влияние изменений в системах охлаждения и нагрева. Установленное ранее давление воды $0,35$ кг/см² увеличено до $1,0$ кг/см². Величина $T=40^{\circ}\text{C}$ после начавшегося спада снова восстановилась (с погрешностью $\Delta T \leq 0,1^{\circ}\text{C}$) за ~ 100 минут, а мощность P – возросла от уровня 8–10% до 37–40%. Прирост мощности нагрева (с 4,1 до 6,3 кВА) связан с ростом отвода мощности системой охлаждения при увеличении расхода проточной воды (ее температура до и после теплообменника ТО оставалась на уровне 9°C и $26,5-27^{\circ}\text{C}$).

На последующих участках графика (рис. 4) иллюстрируется устойчивость системы, когда отключается третий ТЭН (наблюдается рост мощности P до 70% и спад температуры до $39,7^{\circ}\text{C}$ за первые 10 минут), затем полностью снимается давление воды (спад P до 0% и рост температуры до $40,4^{\circ}\text{C}$ за первые 10 минут) и снова устанавливается на уровне $0,5 \text{ кг/см}^2$. После роста температуры до $42,2^{\circ}\text{C}$ восстанавливается уровень $T=40^{\circ}\text{C}$ при мощности $3,5\text{--}3,9 \text{ кВА}$. Отмечено снижение мощности $\sim 0,5 \text{ кВА}$ при уменьшении давления на $0,1 \text{ кг/см}^2$.

Регулируемый нагрев (и соответствующий отвод тепла системой охлаждения) можно ограничить в диапазоне $P \sim (0\div 4) \text{ кВА}$ для номинальных (штатных) режимов работы ЛУЭ. Нагрев от СВЧ-мощности и естественное охлаждение в установившемся равновесном состоянии термостата эквивалентны вводу и отводу мощности $\sim 2 \text{ кВА}$. При этом условии можно ограничиться регулированием мощности двух нагревателей ТЭН при одном или двух усилителях 425А ($P \leq 5,5\div 7,0 \text{ кВА}$). Управляемое включение и выключение третьего нагревателя ТЭН расширяет диапазон мощностей нагрева (и охлаждения) до $\sim (0\div 10) \text{ кВА}$. Увеличенный запас мощности в системе обеспечивает сокращение времени установления температуры и компенсацию возможного двукратного увеличения СВЧ-мощности во время "тренировки" секций. На это время третий нагреватель ТЭН может быть отключен, например, релейным сигналом контроллера 902Р с его выхода, предусмотренного для программируемой сигнализации. При этом для ПИД-регулирования остается диапазон мощности не более 55–70% от максимальной величины 10 кВА .

Обоснованные критерии выбора мощности нагрева и охлаждения.

1. Мощность, отводимая системой принудительного охлаждения, должна превышать мощность СВЧ-нагрева (в режиме "тренировки" $\sim 4 \text{ кВА}$) с учетом потери мощности ($\sim 2 \text{ кВА}$) из-за естественного охлаждения на уровне заданной температуры 40°C . Например, для ЛУЭ-40 мощность, отводимая системой принудительного охлаждения, составляет $\sim 3,7 \text{ кВА}$ при установленном давлении проточной воды $0,5 \text{ кг/см}^2$.

2. Мощность, подводимая нагревательными элементами, должна превышать сумму мощности, отводимой системой принудительного охлаждения ($\geq 2 \text{ кВА}$), и мощности, теряемой из-за естественного охлаждения ($\sim 2 \text{ кВА}$) на уровне заданной температуры ($T=40\pm 0,1^{\circ}\text{C}$). Мощность, подводимая нагревательными элементами системы термостабилизации, при тех же условиях охлаждения может достигать $5,5\text{--}7,0 \text{ кВА}$.

3. Получаемый в системе запас до $\sim 50\text{--}100\%$ подводимой (и отводимой) мощности приводит к расширению диапазона и улучшению качества ПИД-регулирования. Например, уменьшается время установления температуры термостата ($\tau \approx 30$ минут) и ее погрешность ΔT (до $0,05\text{--}0,1^{\circ}\text{C}$) при смене заданного уровня T на $\pm 1^{\circ}\text{C}$.

С учетом полученных данных и выводов обосновывается выбор схемы с программируемым контроллером для термостабилизации ускорительной секции ЛУЭ-200. Для прецизионного ПИД-регулятора определен диапазон мощности, обеспечиваемый двумя или тремя однотипными тиристорными блоками при номинальной мощности нагрева до 15 кВА . Схема термостабилизации, параметры регулятора и экспериментальные данные полезны для использования на полномасштабном стенде ЛУЭ. Исследования обоснованы их важностью для систем термостабилизации установки ИРЕН.

ЛИТЕРАТУРА

1. V. Antropov, et al. Proceedings of the XVIII International Linear Accelerator Conference, Vol. 2. Geneva, CERN, 1996, p. 505.
2. Островной А.И. и др. Сообщение ОИЯИ, P13-94-76. Дубна, 1994.
3. Замрий В.Н. и др. Сообщение ОИЯИ, P13-89-508. Дубна, 1989.

Рукопись поступила в издательский отдел
21 апреля 1997 года.

Система термостабилизации ЛУЭ с программируемым контроллером

Для экспериментального исследования систем термостабилизации СВЧ-секции линейного ускорителя электронов применены программируемый контроллер, управляемые тиристорные блоки и программы поддержки их работы с компьютером. Рассмотрены процессы установления температур термостата с регулируемой мощностью нагрева (до 7 — 10 кВА) при включении режимов «тренировки» и работы СВЧ-ускорительной секции ЛУЭ-40. Показана динамика системы регулирования при изменениях СВЧ-мощности и охлаждения термостата. Программирование процессов регулирования позволило уменьшить время установления и погрешность стабилизации температуры до 0,05 °С.

Работа выполнена в Лаборатории нейтронной физики им.И.М.Франка ОИЯИ.

Сообщение Объединенного института ядерных исследований. Дубна, 1997

Перевод авторов

The LUE Thermostat System with a Programmed Controller

The linear electron accelerator thermostat systems have been experimentally investigated using a programmed controller, controlled thyristor units, and necessary computer software. The processes for settling the thermostat temperature with controlled heating power (up to 7 – 10 kVA) that is used in the «training» and operating modes of the radio-frequency accelerator section of LUE-40 were observed. The control-system dynamics with varying RF power and thermostat cooling is also shown. The program controlling process made it possible to decrease the settling time and temperature stability error to 0.05 °C.

The investigation has been performed at the Frank Laboratory of Neutron Physics, JINR.

Communication of the Joint Institute for Nuclear Research. Dubna, 1997