

АЛГОРИТМ РАБОТЫ АВТОМАТИЧЕСКОГО РЕГУЛЯТОРА МОЩНОСТИ СТАТИЧЕСКОГО РЕАКТОРА ИКАР-М

*Майков Михаил Сергеевич (otd4@expd.vniief.ru), Дюдяев Александр Михайлович,
Кузнецников Алексей Николаевич, Майорников Виктор Сергеевич,
Пикулев Алексей Александрович, Пискорский Игорь Михайлович,
Распопов Николай Владимирович, Фролова Светлана Владимировна,
Цветков Виктор Михайлович*

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

В докладе представлен алгоритм работы автоматического регулятора мощности статического реактора ИКАР-М, создаваемого на базе стенда для критических сборок (СКС) ИКАР-С. В работе описаны кинетическая модель реактора на основе одноточечной модели кинетики и логика формирования управляющего сигнала, приводящего в движение регулирующие стержни. Представлены варианты схем выбора стержней регулирования, участвующих в автоматическом поддержании мощности.

Ключевые слова: алгоритм, автоматический регулятор мощности, кинетическая модель реактора, одноточечное приближение, стенд для критических сборок, реактор, управляющий сигнал, стержень регулирования реактивности, активная зона.

ALGORITHM OF AUTOMATIC POWER REGULATOR OPERATION FOR STATIC REACTOR IKAR-M

*Maykov Mikhail Sergeevich (otd4@expd.vniief.ru), Dyudyaev Aleksandr Mikhailovich,
Kuznechenkov Alexey Nikolaevich, Majornikov Viktor Sergeevich,
Pikulev Alexey Aleksandrovich, Piskorskiy Igor Mikhailovich,
Raspopov Nikolay Vladimirovich, Frolova Svetlana Vladimirovna,
Tsvetkov Viktor Mikhailovich*

FSUE «RFNC-VNIIEF», Sarov Nizhny Novgorod region

In the paper there is presented the automatic power regulator operation algorithm for static reactor IKAR-M created on the base of a test bench for critical assemblies (SKS) IKAR-S. The reactor kinetic model on the base of a single-point model of kinetics is described in the paper as well as the logic of forming control signal actuating control rods. There are presented versions of choosing control rods participating in automatic power sustain.

Key words: algorithm, automatic power regulator, kinetic reactor model, single-point approximation, test bench for critical assemblies, reactor, control signal, reactivity regulating rod, core.

Введение

В настоящее время одним из основных направлений использования исследовательских ядерных реакторов является проведение испытаний радиоэлектронной аппаратуры на стойкость к гамма-нейтронному излучению.

Наиболее важной задачей при проведении испытаний – обеспечение требуемых параметров облучения. Как правило, такими параметрами являются флюенс нейтронов и экспозиционная или поглощенная доза гамма излучения на объекте испытаний. Зачастую, чтобы обеспечить требуемые параметры

облучения, необходимо реализовать работу реактора в многосменном режиме.

При управлении реактором в «ручном режиме» отклонение от заданного уровня мощности может достигать 5 %, что в большинстве случаев является недопустимым. Как показывает практика, достигнуть более высокой точности поддержания мощности реактора при длительном ручном управлении (несколько часов и более) практически невозможно, что связано с накопленной усталостью или невнимательностью оператора.

Для исключения ошибок персонала и обеспечения высокой степени поддержания уровня мощности, в особенности при длительной работе установки, целесообразно использовать систему автоматического управления, которая позволит поддерживать уровень мощности установки в соответствии с заранее заданной программой без участия человека.

На данный момент единственной ядерной установкой во ВНИИЭФ, на которой имеется автоматическая система управления мощностью, является реактор ВИР-2М [1].

В данной работе представлены результаты разработки алгоритма работы автоматического регулятора мощности (АРМ) и построения кинетической модели (в рамках модели односточечной кинетики) реактора ИКАР-М, создаваемого на базе СКС ИКАР-С. Алгоритм работы АРМ ИКАР-М разработан на базе алгоритма работы АРМ реактора ВИР-2М [1].

Кинетическая модель реактора

Использованная в данной работе кинетическая модель ядерного реактора основана на односточечной модели кинетики, в которой не учитывается пространственное и энергетическое распределение нейтронов. Основные соотношения для расчета мощности ядерного реактора в рамках односточечной модели кинетики представлены в [2].

Обратный период разгона ядерного реактора рассчитывался по методу наименьших квадратов с помощью следующих соотношений (для $n \geq 2$):

$$\Delta t_i = t_i - t_1, \quad (1)$$

$$\Delta N_i = \ln(N_i) - \ln(N_1), \quad (2)$$

$$Aw_n = \frac{n \sum_{i=1}^n (\Delta t_i \Delta N_i) - \sum_{i=1}^n \Delta t_i \sum_{i=1}^n \Delta N_i}{n \sum_{i=1}^n \Delta t_i^2 - \left(\sum_{i=1}^n \Delta t_i \right)^2}, \quad (3)$$

где Aw – обратный период изменения мощности, c^{-1} , n – количество измерений; N_i – значение мощности i -го измерения, Вт; N_1 – значение мощности первого измерения, Вт t_i – координата по оси времени i -го

измерения, с; t_1 – координата по оси времени первого измерения, с.

Период разгона ядерного реактора T определялся методом скользящего среднего для массива n измерений Aw :

$$T = \frac{n}{\left(\frac{\sum_{i=1}^n Aw_i}{n} \right)}. \quad (4)$$

Для реактора ИКАР-М реактивность зависит от трех составляющих – запаса реактивности системы, положения органов регулирования реактивности и отрицательного температурного эффекта реактивности:

$$\rho_j = \sum_{i=1}^6 \rho_{PPij} + \rho_{ЗР} - k \Delta T_{Zj}, \quad (5)$$

где ρ_j – реактивность системы в j -й момент времени, $\beta_{эф}$; ρ_{PPij} – реактивность, внесенная i -м стержнем регулирования реактивности (СРР) на j -й момент времени (на реакторе ИКАР-М всего имеется шесть СРР), $\beta_{эф}$; $\rho_{ЗР}$ – запас реактивности системы в начальный момент времени, $\beta_{эф}$; k – коэффициент температурной обратной связи по активной зоне ($-0,0178 \beta_{эф}/K$) [3], $\beta_{эф}/K$; ΔT_{Zj} – прирост температуры активной зоны, К.

В рамках модели кинетики ядерного реактора, использованной в настоящей работе, эффект интерференции СРР не учитывался.

В рамках физического пуска СКС ИКАР-С 2016 г. были проведены измерения влияния положения каждого из шести СРР на реактивность системы [3]. Были получены интегральные характеристики каждого СРР. На рис. 1 и 2 представлены интегральные характеристики «легкого» (СРР-1.1) и «тяжелого» (СРР-1.3) стержней. На рис. 3 представлено схематическое расположение СРР в СКС ИКАР-С (в реакторе ИКАР-М расположение стержней будет аналогичным).

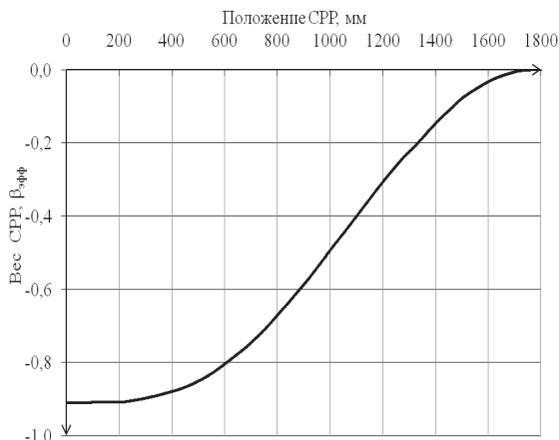


Рис. 1. Интегральная характеристика СРР-1.1

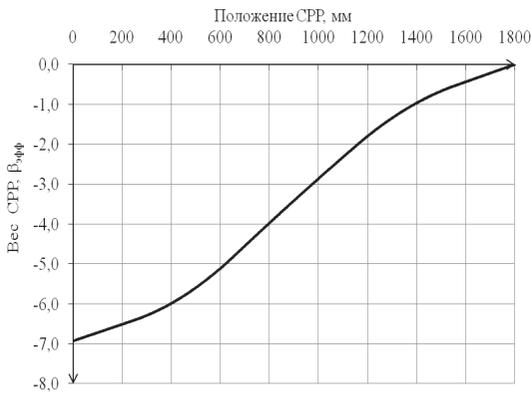


Рис. 2. Интегральная характеристика CPP-1.3

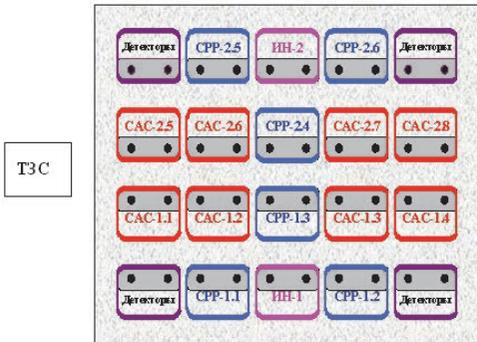


Рис. 3. Расположение CPP в активной зоне СКС ИКАР-С (ИЯУ ИКАР-М)

Интегральные характеристики CPP были аппроксимированы полиномами 6 степени. Реактивность, вносимая каждым стержнем, определяется как:

$$\rho_{PPij} = k_{6i}x_{ij}^6 + k_{5i}x_{ij}^5 + k_{4i}x_{ij}^4 + k_{3i}x_{ij}^3 + k_{2i}x_{ij}^2 + k_{1i}x_{ij} + k_{0i}, \quad (6)$$

где x_j – координата положения i -го стержня в j -й момент времени, мм; k_{0i} – вес i -го стержня, $\beta_{эф}$.

Расчет температуры активной зоны

В расчетах температуры активной зоны (АЗ) использовалось два предположения:

– тепло равномерно распределяется по всей активной зоне, вследствие чего температура считается одинаковой во всех точках АЗ;

– тепло распределяется только в АЗ (топливные секции и конвертор), исключая графитовую решетку и внешний отражатель.

Температура активной зоны определялась выражением:

$$T_z(t) = T_{внш} + e^{-\chi t} \int_0^t \frac{W_1(t')}{C_z} e^{\chi t'} dt' + \Delta T_z(0) e^{-\chi t}, \quad (7)$$

где $T_{внш}$ – температура внешней среды, предполагается постоянной; χ – коэффициент теплоотдачи, расчетное значение $1,8 \cdot 10^{-5} \text{ c}^{-1}$ [3]; $W_1(t)$ – тепловая мощность реактора; C_z – теплоемкость активной зоны, расчетное значение $8,4 \cdot 10^6 \text{ Дж/К}$ [3]; $\Delta T_z(0)$ – разница между начальной температурой активной зоны и температурой внешней среды в момент времени $t = 0$.

Алгоритм работы автоматического регулятора мощности

Реализация алгоритмов работы автоматического регулятора мощности проводилась в программной среде LabView с использованием приведенной выше кинетической модели работы реактора ИКАР-М.

Алгоритм АРМ предполагает формирование двух промежуточных управляющих сигналов: управляющего сигнала по обратному периоду и управляющего сигнала по мощности (рис. 4, 5). При формировании управляющего сигнала по мощности также учитывается величина обратного периода разгона.

На рис. 4, 5 использованы следующие обозначения:

- 1) управляющий сигнал «1» – сигнал на перемещение CPP вверх на элементарный шаг;
- 2) управляющий сигнал «-1» – сигнал на перемещение CPP вниз на элементарный шаг;
- 3) управляющий сигнал «0» – сигнал, не требующий перемещения CPP.

На основе данных сигналов формируется комплексный сигнал. Комплексный сигнал рассчитывается как сумма двух компонент: управляющего сигнала по мощности и управляющего сигнала по обратному периоду.

Комплексный сигнал может принимать значения «-2», «-1», «0», «1», «2». Рабочий сигнал «-1», «0» или «1» формируется на основе условий для комплексного сигнала, представленного на рис. 6.

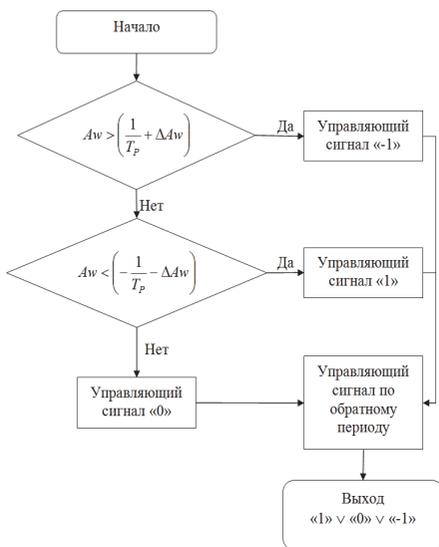


Рис. 4. Диаграмма формирования управляющего сигнала по обратному периоду

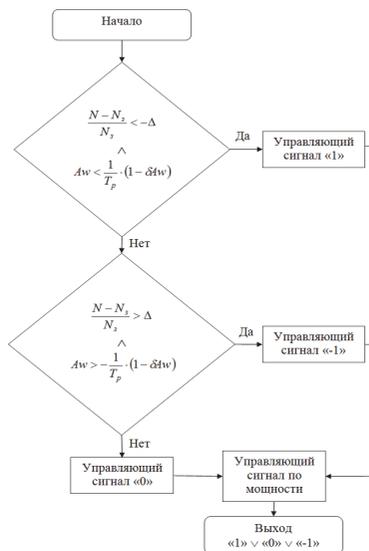


Рис. 5. Диаграмма формирования управляющего сигнала по мощности

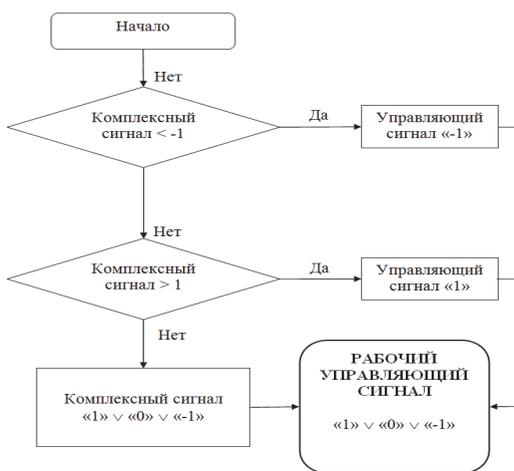


Рис. 6. Диаграмма выбора окончательного управляющего сигнала

Группы СРР и схемы управления

При предварительном рассмотрении было проанализировано 10 различных схем управления шестью СРР (см. табл.). Далее из рассмотрения были исключены те схемы управления СРР, в которых допускалось одновременное движение более одного СРР в сторону увеличения реактивности (вверх). При движении в сторону уменьшения реактивности (вниз) такого ограничения не накладывалось.

В качестве базовых были выделены следующие группы СРР и схемы управления:

- 2 «тяжелых» СРР (СРР-1.3, СРР-2.4), схема «2 тяжелых по очереди»;
- 4 «легких» СРР (СРР-1.1, СРР-1.2, СРР-2.5, СРР-2.6), схема «4 легких по очереди»;
- 6 СРР (все СРР), схема «6 по очереди»;
- 6 СРР / 4 «легких» СРР – вывод установки в состояние, близкое к критическому на запаздывающих нейтронах, осуществляется всеми шестью СРР, затем четырьмя «легкими» СРР – управление мощностью, схема «6 критика, 4 управление».

Схема управления	Перерегулирование, %	Колебания мощности, %	
Схемы управления базовые			
«6 по очереди»	2,5	«легкий»	0,2
		«тяжелый»	1,25
«4 легких по очереди»	5	0,2	
«2 тяжелых по очереди»	1,25	1,25	
«6 критика, 4 управление»	8	0,2	
Схемы управления дополнительные			
«4 легких группой»	1,25	1,25	
«2 легких группой»	2,50	0,70	
«СРР-1.1»	7,5	0,2	
«6 группой»	–	Управление невозможно	
«4 легких вверх, 2 тяжелых вниз»	–	Управление невозможно	
«2 тяжелых вверх, 4 легких вниз»	–	Управление невозможно	

Примечание: фраза «Управление невозможно» обозначает неспособность АРМ поддерживать заданный уровень мощности.

Отработка АРМ в LabView

На рис. 7–9 представлены расчетные графики вывода реактора ИКАР-М на мощность 8 кВт с периодом разгона 60 с, а также график изменения управляющего сигнала для наиболее перспективных схем управлений.

Перерегулирование рассчитывалось следующим образом:

$$П = \frac{N_3 - N_{\max}}{N_3} 100 \%$$

где N_3 – заданная мощность; N_{\max} – максимальная мощность при переходе от режима удержания периода к условию удержанию мощности.

Из рис. 7 видно, что при использовании схемы «4 легких вместе», перерегулирование практически отсутствует, колебания мощности от заданного значения составляют примерно 1,25 %. При использовании схемы «6 группой» регулирование невозможно. При использовании только СРР-1.1 и СРР-1.2 коле-

бания мощности снижаются примерно в 2 раза по сравнению со схемой «4 легких группой». Если при поддержании мощности использовать только один «легкий» СРР (схема «СРР-1.1»), то колебания мощности незначительны и лежат в заданном диапазоне (0,002 от заданной).

При использовании схемы «4 легких по очереди» перерегулирование составляет ~ 5 %, что является допустимой величиной. Колебания мощности находятся в заданном диапазоне.

При использовании схемы «6 критика, 4 управление» перерегулирование составило около 8 %. При этом колебания мощности лежат в заданном диапазоне. Отметим, что использование данной схемы позволяет обеспечить наименьшую неравномерность распределения нейтронного поля по объему активной зоны (АЗ), поскольку центральные «тяжелые» стержни (СРР-1.3 и СРР-2.4) находятся ниже, чем «легкие» стержни, «задавливая» нейтронный поток в центре АЗ.

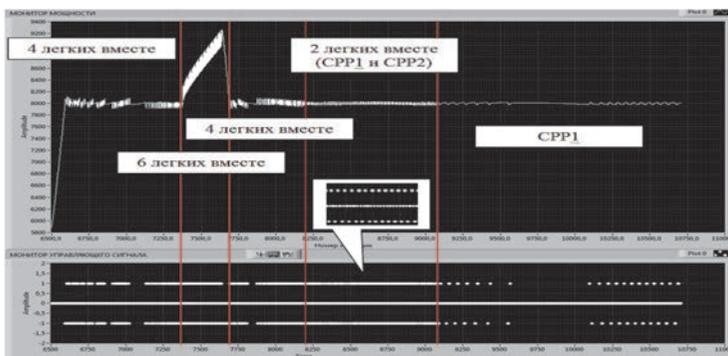


Рис. 7. Схема «Выбор СРР оператором»

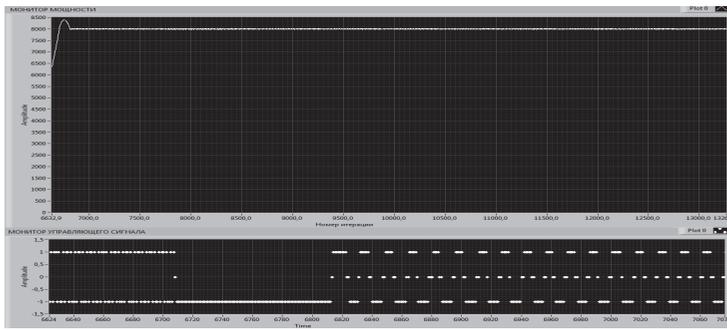


Рис. 8. График мощности и управляющего сигнала, схема «4 легких по очереди»

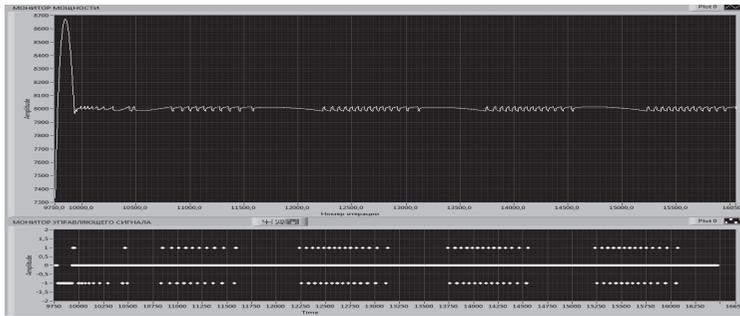


Рис. 9. График мощности и управляющего сигнала, схема «6 критика, 4 управление»

Оптимизированная схема управления СРР для АРМ реактора ИКАР-М

Анализ табл. показывает, что наиболее оптимальный вариант управления СРР можно составить из комбинации схем управления. Данный вариант заключается в объединении алгоритмов схем «4 легких по очереди» (лучший результат по колебаниям мощности – 0,2 %) и «4 легких группой» (лучший вариант по перерегулированию – 1,25 %).

На основе группы 4 «легких» СРР можно реализовать несколько вариантов схем «Выбор СРР оператором», при этом выбор СРР, задействованных в процессе регулирования, осуществляется вручную в любой нужной оператору комбинации. На рис. 10 представлен результат управления реактором при использовании схемы «Выбор СРР оператором».

Из рис. 10 видно, что перерегулирование составляет ~ 6 %, а колебания мощности находятся в заданном диапазоне.

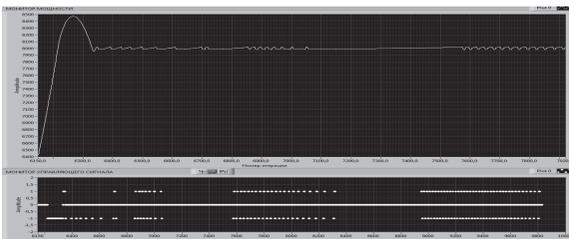


Рис. 10. Результат управления реактором при использовании схемы «Выбор СРР оператором»

Комбинированная схема №1

Проведенные исследования показали, что наиболее сложным для регулирования является переход от режима «Поддержание периода» к режиму «Поддержание мощности». Это связано с тем, что в момент перехода система управления должна плавно уменьшить реактивность (соответствующую установленному периоду разгона) до нуля, при этом обеспечив выход реактора на заданный уровень мощности.

Для обеспечения данного перехода предложена «Комбинированная схема № 1», которая реализована следующим образом. В режиме «Поддержание периода» используется схема «Выбор РО оператором». В момент перехода на стационарный уровень мощности (режим «Поддержание мощности») только для движения СРР вниз, включается схема «4 легких группой» (из числа задействованных СРР), а затем снова включается схема «Выбор СРР оператором». Использование предложенной схемы позволяет ограничить перерегулирование на уровне ~ 1,5 % и при этом колебания мощности на стационарном уровне не превысят 0,2 %. Кроме того, уровни поднятия СРР будут приблизительно одинаковыми, что обеспечит отсутствие перекосов поля делений по АЗ.

Результаты расчетов представлены на рис. 11.

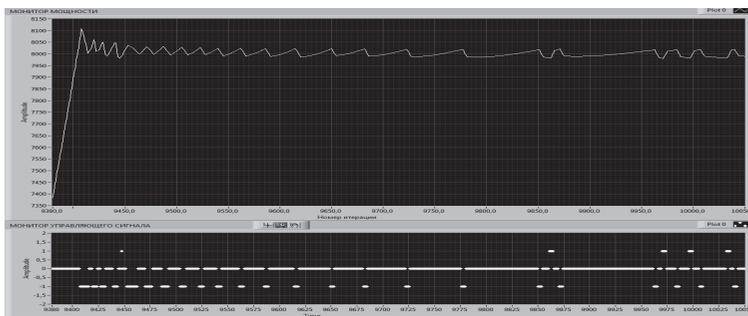


Рис. 11. Результаты управления реактором при использовании «Комбинированной схемы управления №1», выход на мощность 8 кВт с периодом разгона 60 с

Верификация работы АРМ в пассивном режиме на СКС ИКАР-С

Цель проводимой верификации – подтверждение правильности работы базового алгоритма (рис. 3–5) путем online сравнения действий оператора и команд, выдаваемых АРМ при работе действующей установки СКС ИКАР-С. При проведении данных работ никаких операций и действий, связанных с внесением изменений СУЗ СКС ИКАР-С не производилось, а управление установкой осуществлялось оператором в соответствии с руководством по эксплуатации. Текущие параметры реактора (период разгона и мощность), необходимые для осуществления расчетов АРМ, принимались от независимой, работающей автономно в режиме наладки системы контроля физических параметров (СКФП).

Управление СКС ИКАР-С осуществлялось оператором перемещением СРР-1.1. Действия оператора производились в соответствии со световой индикацией, которая выводилась на экран компьютера (см. рис. 12):

- при выдаче зеленого сигнала «UP» оператор осуществлял перемещение СРР-1.1 на единичный шаг вверх;
- при выдаче зеленого сигнала «DOWN» оператор осуществлял перемещение СРР-1.1 на единичный шаг вниз;

– при отсутствии сигналов оператор не производил управляющих действий.

На рис. 13 представлен график мощности и реактивности СКС ИКАР-С, принимаемый от СКФП, а также управляющий сигнал, сформированный логикой АРМ, представленной на рис. 4–6. Поддерживание мощности осуществлялось для трех значений заданной мощности:

- 920 Вт – в течение 1000 с (промежуток времени от 2880 до 3880 с);
- 917 Вт – в течение 600 с (промежуток времени от 3880 до 4480 с);
- 919 Вт – в течение 1600 с (промежуток времени от 4480 до 6080 с).

Во всех случаях мощность поддерживалась в пределах $\pm 0,5\%$ от заданного уровня; заданный период разгона $T_p = 50$ с; относительное сопряженное отклонение от обратного заданного периода разгона $\delta A_w = 0,005$. Из рис. 13 видно, что выход мощности за пределы допустимого диапазона наблюдался только при переходе от режима «Поддержание периода» к режиму «Поддержание мощности» (в промежутке времени от 2880 до 2980 с). Далее мощность СКС ИКАР-С находилась в допустимых пределах, что свидетельствует о работоспособности алгоритма АРМ.

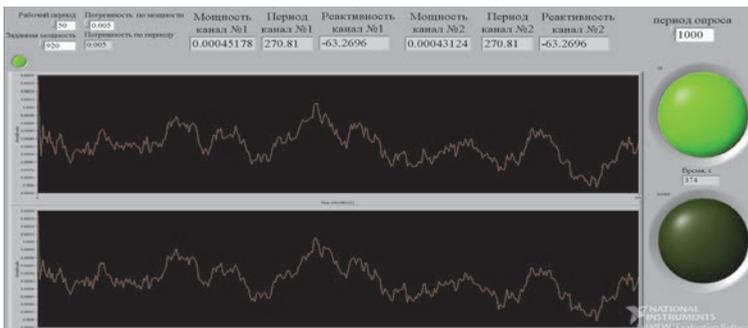


Рис. 12. Внешний вид программы индикации, принимающей параметры (мощность, период, реактивность) от СКФП

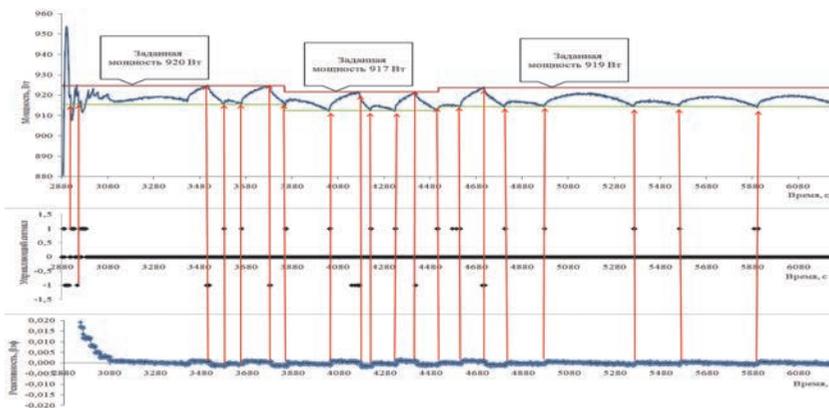


Рис. 13. Верификация алгоритма АРМ на СКС ИКАР-С:

- 1 – верхняя граница отклонения от заданной мощности (0,5 % от заданной);
- 2 – нижняя граница отклонения от заданной мощности (0,5 % от заданной)

Заключение

В докладе представлен алгоритм работы автоматического регулятора мощности ИЯУ ИКАР-М и проведен анализ его функционирования.

Дано описание базового алгоритма формирования рабочего управляющего сигнала, а также проведен выбор оптимальной схемы управления. Построена кинетическая модель реактора ИКАР-М, основанная на одноточечной модели кинетики ядерного реактора, с учетом конструкционных особенностей установки и экспериментальных данных, полученных на физическом пуске СКС ИКАР-С.

На основе построенной кинетической модели в среде LabView проведен анализ 10 схем управления. В результате анализа данных схем предложена комбинированная схема управления, которая наилучшим образом позволяет осуществить переход от режима «Поддержание периода» к режиму «Поддержание мощности». Достоинством комбинированной схемы является обеспечение минимальной величины колебаний стационарной мощности (менее 0,5 %) и незначительного перерегулирования (1,5 %).

Верификация комбинированной схемы управления в пассивном режиме на СКС ИКАР-С показало ее работоспособность.

Список литературы

1. Глухов Л. Ю., Котков С. П., Кубасов А. А. Отработка на реакторе ВИР-2М режима автоматического поддержания мощности / Межотраслевая конференция. Импульсные реакторы: история создания и перспективы использования // Труды конференции. Саров: ФГУП «РФЯЦ-ВНИИЭФ», 2016. Т. 2. С. 41.
2. Кипин Дж. Р. Физические основы кинетики ядерных реакторов. М.: Атомиздат, 1967.
3. Влох Г. В., Кузнеченков А. Н., Фролова С. В. Основные результаты физического пуска критического стэнда ИКАР-С с уран-графитовым топливом / Межотраслевая конференция. Импульсные реакторы: история создания и перспективы использования // Труды конференции. Саров: ФГУП «РФЯЦ-ВНИИЭФ», 2016. Т. 2. С. 155–161.