

## ИМПУЛЬСНЫЙ РЕЖИМ НА РЕАКТОРЕ БАРС-5М С НОВЫМ МЕХАНИЗМОМ УПРАВЛЕНИЯ РЕАКТИВНОСТЬЮ

А. В. Луценко, Ю. В. Осеев, В. В. Сукневич, В. И. Черашев, М. Ю. Эверт

ФГУП «РФЯЦ-ВНИИТФ им. академика Е. И. Забабахина», г. Снежинск Челябинской обл.

Статья поступила в редакцию 17.05.2022, после доработки – 23.06.2022, принята к публикации – 20.09.2022

Приведены результаты генерирования импульсов делений в связанной системе реактора БАРС-5М с новым механизмом управления реактивностью в режиме «С мощности». Отмечены недостатки механизма управления реактивностью, в частности: нестабильность синхронизации движения двух независимых регуляторов реактивности в активных зонах реактора и, как следствие, ненадежность прогнозирования параметров импульса. Рассмотрены пути его усовершенствования.

**Ключевые слова:** импульсный реактор, активная зона, реактивность.

**Pulse mode on the BARS-5M reactor with a new mechanism of reactivity control. A. V. Lutsenko, Yu. V. Oseev, V. V. Suknevich, V. I. Cherashev, M. Yu. Evert** (*FSUE «RFNC-VNIITF», 456770, Snezhinsk, Chelyabinsk region, Vasilyev street, 13*). Results of fission pulses generation are given for a coupled system of the BARS-5M reactor with a new mechanism of reactivity control in the «on power» mode. Shortcomings of the mechanism of reactivity control are noted, in particular: instability of movement synchronization of two independent reactivity regulators in reactor cores and, as a result, unreliability of forecasting pulse parameters. There are considered the ways of this mechanism improvement.

**Key words:** pulse reactor, active zone, reactivity.

DOI 10.53403/02054671\_2022\_3\_95

### Введение

В статье представлен первый опыт работы по генерированию импульсов делений в режиме «С мощности» на реакторе БАРС-5М после модернизации его СУЗ. Цели проведения модернизации:

- замена старой СУЗ [1] с фиксированным монтажом (релейные схемы) на СУЗ, построенную на программируемых логических контроллерах (ПЛК) Simens S7-400;
- удаление неиспользуемого оборудования, схем, узлов, ранее применяемых на БАРС-3, на БАРС-5 в режиме генерирования импульсов делений «Ожидание»;
- введение в конструкцию реактора вновь разработанного механизма управле-

ния реактивностью (МУР) с электромагнитным приводом вместо ранее используемого пружинного;

– внедрение автоматизированных средств сбора, обработки, визуализации и хранения данных о состоянии реактора.

Логика построения СУЗ осталась прежняя, то есть функции, выполняемые старыми релейными схемами, передали практически без изменения с помощью достаточно наглядного языка программирования LAD (Ladder Diagram – язык релейно-контактных символов) на выполнение ПЛК.

Ранее используемый на двухзонном реакторе БАРС-5 механизм управления реактивностью представлял собой две

нейтронные ловушки – регуляторы реактивности (РР), размещенные в каналах АЗ и соединенные единой траверсой. Присоединение к траверсе дополнительно регулятора связи (РС) обеспечивало скорость ввода реактивности до  $300 \beta_{эф}/с$ .

При работе с двумя РР расстояние между центрами каналов АЗ можно было менять в пределах от 0,3 до 0,9 м. Дальнейшее увеличение расстояния вынуждало работать только с одним РР, так как удлинение траверсы связано с увеличением ее веса и потерей механической скорости при выстреле механизмом. Поэтому механизм обеспечивал работу в режимах с навесками на траверсе как с РР+РР, РР+РР+РС, так и с РР, РР+РС, РС, соответственно, с одним или даже двумя свободными центральными каналами АЗ, имеющими максимальный флюенс нейтронов.

Однако главным достоинством старого МУР была синхронность в движении регуляторов и возможность использования РС. В системе измерения скорости МУР использовался растровый датчик в виде оптической решетки (модулятора света с шагом 1 мм), которая при движении перекрывала передачу света от лампы накаливания к фотоприемнику.

Порядок работы реактора при генерации импульса был и в настоящее время в целом остался следующим [2]:

- вывод реактора на стартовый период разгона (начальное состояние системы в импульсном режиме работы);
- ступенчатый поочередный ввод РР и ИС (перекомпенсация) с набором и стабилизацией мощности;
- выстрел ИС, затем выстрел РР.

Поскольку «вес» ИС значительно меньше «веса» РР, а скорость РР зависела от глубины погружения, веса ИС не хватало для компенсации веса, вводимого в АЗ РР, поэтому зачастую приходилось выходить на мощность до 100 Вт и только за несколько секунд до конца временной программы заканчивать опускание РР (в сто-

рону ВУ) до требуемого положения (работа на падающей мощности).

## 1. Новый МУР

МУР реактора БАРС-5М представлен на рис. 1. Каждый РР (в своей АЗ) управляется отдельно своим МУР1 и МУР2, синхронизированы только команды на выстрел. Измерение скорости РР производится с помощью датчика потенциометрического

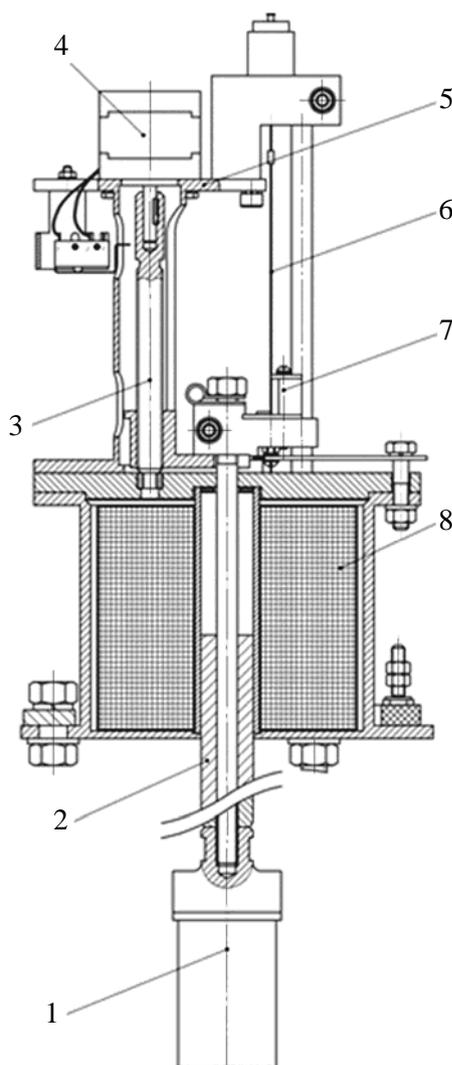


Рис. 1. МУР реактора БАРС-5М: 1 – РР (нейтронная ловушка); 2 – якорь; 3, 4 – шаговый двигатель с ходовым винтом; 5 – стойка; 6, 7 – потенциометрический преобразователь (нихромовая проволока 6 и контакт ползункового типа 7); 8 – соленоид электромагнита

типа, а моменты прихода РР на упор при «выстреле» фиксируются пьезодатчиками. Для приведения РР в движение при выстреле к соленоиду подключается заряженная до определенного напряжения батарея конденсаторов.

К достоинствам нового механизма можно отнести:

- отсутствие ограничений на расстояние между центрами АЗ;
- зависимость скорости РР в основном только от напряжения на конденсаторах (зависимость от глубины погружения в АЗ на большом участке погружения слабая).

Недостатки нового варианта реализации такого МУР:

- отсутствие возможности использования РС, что уменьшает максимальную скорость ввода реактивности до  $220 \beta_{эф}/с$ ;
- достигаемая скорость регулятора реактивности (РР) при выстреле не позволяет реализовать все возможности по энерговыделению;
- большое время зарядки батареи конденсаторов (до 2 мин);
- медленная скорость механического (с помощью шагового двигателя) перемещения РР (примерное время перемещения с НУ до ВУ составляет 90 с);
- конструктивная необходимость производства выстрела РР с положения максимального погружения (с ВУ);
- недостаточная точность установки и поддержания величин напряжений на батареях конденсаторов;
- недостаточная синхронизация в движениях обоих РР при выстреле (особенно при малых скоростях);
- существенный отскок РР при выстреле;
- недостаточная для фиксации момента прихода РР в крайнее верхнее положение чувствительность потенциометрической схемы измерения скорости МУР;
- большая погрешность в определении скорости МУР (5%).

## 2. Порядок работы и результаты

Новая СУЗ обеспечивает оперативный вывод информации о временах выдачи команд при генерировании импульсов делений, а также срабатывания схем сброса, что позволило достаточно быстро произвести настройку задержек  $\Delta t$  на срабатывание импульсной защиты: сброса от НУ ИС, ВУ ИС и сброс РР, выставить последовательность срабатывания схем сброса, синхронизировать их в обеих АЗ.

Подбором величин  $\Delta t$  на сброс от НУ и ВУ ИС удалось значительно сократить длительность «хвоста» импульса (рис. 2). Предполагалось производить выстрел РР из положения его крайнего погружения в АЗ (ВУ) в режиме падающей мощности. Предварительно были проведены:

- определение положения РР, до которого его введение может быть скомпенсировано с помощью ИС. Оно составило примерно 30 мм от НУ, ИС при этом вблизи ВУ;
- измерение времени перемещения МУР из положения 30 мм до положения ВУ. Оно составило примерно 60 с;
- измерение времени спада мощности в АЗ с уровня 96 Вт (100 Вт – порог сброса по токовым каналам в данном режиме работы) до уровня  $\sim 2$  Вт (запрет по  $S_{внутр}$  на генерацию импульса в режиме «С мощности»), на фоне перемещения РР до ВУ с положения 30 мм от НУ, оно составило примерно 100 с.

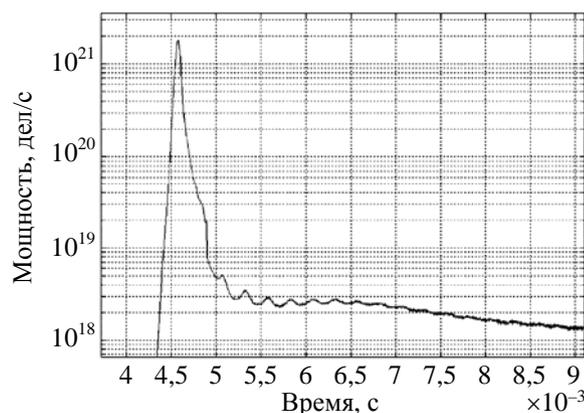


Рис. 2. Импульс деления № 809

В импульсном режиме работы реактора в СУЗ предусмотрена временная программа «20 мин» с последующим переключением в программу «200 с», в которых производятся компенсация, проверки команд сброса, подачи предварительного давления на выстрел ИС, проверки условий на выстрел РР, выдача вспомогательных команд и генерация импульса делений.

Зарядка батарей конденсаторов, вывод реактора на мощность производились в программе «20 мин». Далее осуществлялись конкурирующие по времени три процесса:

- прохождение программы «200 с» (автоматические проверки схем сброса, выдача команд на подготовку к выстрелу ИС);
- движение РР к положению ВУ с переводом реактора в подкритическое состояние;
- падение мощности реактора.

Правильный выбор момента включения команды на перемещение МУР до ВУ позволял произвести выстрел МУР по окончании работы программы «200 с» до срабатывания запрета по  $S_{\text{внутр}}$ .

В режиме «С мощности» основные параметры реализованных импульсов делений могут быть представлены как функ-

ции от  $a$ ,  $\beta_{\text{эф}}/с$  – скорости ввода избыточной реактивности. Рассчитывались величины введенной (планируемой) избыточной реактивности и «запаса» по реактивности как сумма произведений эффективности каждого РР в системе на его скорость и на время, прошедшее с момента достижения пиковой мощности в импульсе до прихода РР на НУ.

Импульсы производились как в одной АЗ реактора, так и в связанной системе двух АЗ с «голым» реактором и в системе реактор–образец, в качестве образца был отражатель со «вкладом» в реактивность  $\sim 1,56 \beta_{\text{эф}}$ .

Попытка генерации первого импульса в связанной системе двух АЗ с небольшим энерговыделением была неудачной вследствие негативного влияния несинхронности МУР1 и МУР2, величина которой составила  $\Delta t = 4$  мс. Увеличение несинхронности в движениях РР при малых скоростях – характерная особенность нового МУР.

На рис. 3 приведен график движения РР1 и РР2, полученный с помощью потенциометрического датчика во время выстрела при несинхронности прихода на НУ примерно 1,5 мс.

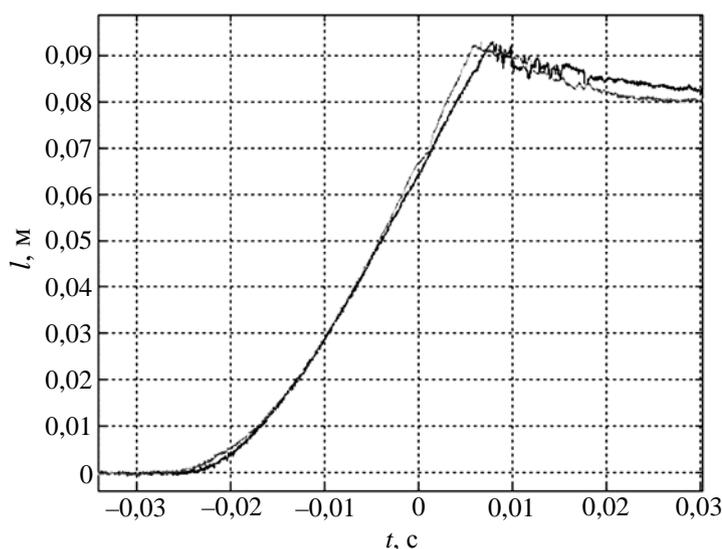


Рис. 3. График движения РР1 и РР2 при выстреле МУР

Последствия несинхронности движения РР1 и РР2 можно рассматривать как уменьшение скорости, с которой в конце «выстрела» в систему вводится некоторая часть избыточной реактивности вследствие того, что один РР уже столкнулся с НУ и начал отскок от него, другой РР еще в течение некоторого времени продолжает движение вверх на НУ.

Для обеспечения дальнейшего выполнения программы физического пуска были приняты решения:

– импульсы с небольшим энерговыделением в системе генерировать с помощью одного РР (в этом случае в режиме падающей мощности достаточно выводить реактор на мощность ~10 Вт);

– при работе с двумя МУР работать с «запасом» по избыточной реактивности

с расчетом на то, что именно этот «запас» введется с меньшей скоростью вследствие возможной несинхронности МУР1 и МУР2.

Причины несинхронности в работе МУР1 и МУР2 могут заключаться в различиях изготовления их электрических или механических частей. В некотором диапазоне  $\Delta t$  потери в энерговыделениях в АЗ1 и АЗ2 могут быть решены увеличением «запаса» по избыточной реактивности.

Параметры импульсов в однозонном режиме приведены в табл. 1. Параметры реализованных импульсов в системе двух АЗ без образца и с образцом (расстояние между центрами АЗ 0,337 м) представлены в табл. 2 и 3. При сравнении результатов, приведенных в табл. 2 и 3, можно отметить увеличение времени жизни мгновенных нейтронов в системе реактор–образец.

Таблица 1

*Параметры реализованных импульсов в одной АЗ*

$Y, 10^{17}$ дел	$t_{1/2}$ , мкс	$\Delta\rho_{\text{введенная}}, 10^{-2} \cdot \beta_{\text{эф}}$	Запас $\Delta\rho, 10^{-2} \cdot \beta_{\text{эф}}$	$v$ , м/с	$a, \beta_{\text{эф}}/\text{с}$
0,89	74	11,7	4,92	2,63	89
2,01	46,9	15,4	4,6	5,8	197

*Примечание.*  $v$  – механическая скорость РР,  $a$  – скорость ввода реактивности.

Таблица 2

*Параметры реализованных импульсов в системе двух АЗ без образца (между центрами АЗ 0,33 м)*

Работа	$Y_1, 10^{17}$ дел	$Y_2, 10^{17}$ дел	$t_{1/2}$ , мкс	$\Delta\rho_{\text{введенная}}, 10^{-2} \cdot \beta_{\text{эф}}$	Оценка запаса $\Delta\rho, 10^{-2} \cdot \beta_{\text{эф}}$	$v_1/v_2$ , м/с	$a, \beta_{\text{эф}}/\text{с}$	Несинхронность РР1 и РР2, $\Delta t$ , мс
РР2	0,64	0,64	–	5,6	без запаса	0/5,16	88	
РР2	0,535	0,535	98	4,9	без запаса	0/4,8	82	
РР1+РР2	1,47	1,45	59	13,6	4,1	4,4/4,6	153	0,07
РР1+РР2	1,68	1,68	51	14,7	3,7	5,4/5,6	187	0,02
РР1, 1,5 м между центрами, АЗ	0,75	0,83	83,6	11,4	5,4	5,6/0	95	

*Параметры реализованных импульсов в системе двух АЗ с образцом (между центрами АЗ 0,33 м)*

Работа	$Y_1, 10^{17}$ дел	$Y_2, 10^{17}$ дел	$t_{1/2}$ , мкс	$\Delta\rho_{\text{введенная}},$ $10^{-2} \cdot \beta_{\text{эф}}$	Оценка запаса $10^{-2} \cdot \beta_{\text{эф}}$	$v_1/v_2$ , м/с	$a,$ $\beta_{\text{эф}}/с$	Несинхронность PP1 и PP2, $\Delta t$ , мс
PP2	0,8	0,81	93,7	6,7	без запаса	0/4,16	71	–
PP1+PP2	1,53	1,55	67,6	12,7	2,7	3,4/3,6	119	0,26
PP1+PP2	2,5	2,5	51	18,2	4,8	5,8/5,74	197	0,08
PP2	0,09	0,09	~500	3,0	без запаса	0/4,13	70	–
PP1+PP2	1,03	1,08	84	16,8	> 9,48	3,7/4,2	134	2,0
PP1+PP2	1,73	1,77	61	17,1	6,2	3,9/4,1	136	0,36

### Заключение

1. В ходе работ по физическому пуску БАРС-5М с модернизированной системой управления и защиты были достигнуты проектные параметры работы реактора в стационарном и импульсном режимах работы.

2. Изменений нейтронно-физических характеристик реактора после модернизации СУЗ не выявлено.

3. В процессе ввода в эксплуатацию реактора БАРС-5М был выявлен ряд недостатков существующего МУР. В процессе физического пуска БАРС-5М сотрудниками РФЯЦ-ВНИИТФ был выработан ряд предложений по изменению его конструкции:

- уменьшить ход РР для повышения стабильности и улучшения синхронности;

- изменить конструкцию и (или) принцип работы амортизатора РР, например, с использованием тарельчатых пружин и инерционной массы;

- увеличить точность поддержания напряжения конденсаторного накопителя энергии;

- изменить конструкцию шагового привода РР, возможно, вообще отказаться от него и использовать силу, развиваемую соленоидом;

- подобрать или разработать систему измерения скорости РР на основе готовых, промышленно используемых решений;

- увеличить полезную энергию магнита и, соответственно, скорость РР за счет увеличения диаметра якоря (при уменьшении длины), увеличения добротности и увеличения собственной частоты контура, образованного силовой цепью.

### Список литературы

1. Луценко А. В., Касьянов С. Ю., Осеев Ю. В., Андреев С. А., Эверт М. Ю. Модернизация системы управления и защиты импульсного реактора БАРС-5 // Труды межотраслевой научной конференции. Импульсные реакторы: история создания и перспективы использования. – Саров, РФЯЦ-ВНИИЭФ. 2015, т. II, с. 78–83.

2. Леваков Б. Г., Лукин А. В., Магда Э. П., Погребов И. С., Снопков А. А., Терехин В. А. Импульсные ядерные реакторы РФЯЦ-ВНИИТФ / Под ред. А. В. Лукина. – Снежинск: Изд-во РФЯЦ-ВНИИТФ, 2002, 608 с.

Контактная информация –  
Луценко Александр Владимирович,  
начальник группы,  
РФЯЦ-ВНИИТФ,  
e-mail: dep5@vniitf.ru

Вопросы атомной науки и техники. Сер. Физика ядерных реакторов, 2022, вып. 4, с. 95–100.