

РАЗРАБОТКА МАКЕТА СИСТЕМЫ УПРАВЛЕНИЯ РЕАКТИВНОСТЬЮ РЕАКТОРА ВИР-2М ДЛЯ РЕАЛИЗАЦИИ КВАЗИИМПУЛЬСНОГО РЕЖИМА РАБОТЫ

Д. А. Юнин, С. П. Котков, А. А. Кубасов, П. В. Таракаенко, А. Д. Авдеев

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

Работа посвящена разработке макета системы управления реактивностью реактора ВИР-2М для реализации импульса делений на запаздывающих нейтронах (квазиимпульса) с характерной длительностью импульса $\sim 0,1\text{--}10$ с и реализацией полного запаса реактивности.

Введение

В настоящее время в РФЯЦ-ВНИИЭФ эксплуатируется импульсный аperiodический реактор на растворном топливе ВИР-2М [1]. Исследовательская ядерная установка (ИЯУ) ВИР-2М предназначена для получения одиночных импульсов делений на мгновенных нейтронах (длительность импульса не более 10 мс) и для работы на постоянной (статической) мощности. Однако для некоторых экспериментов требуются импульсы делений с длительностью 0,1–10 с, которые возможно сгенерировать в импульсе делений на запаздывающих нейтронах (квазиимпульсе).

Ранее на ИЯУ ВИР-2М проводились исследования по генерации квазиимпульсов [2]. Были решены следующие задачи:

- отработана возможность ввода положительной реактивности со скоростями $\sim 0,2\text{--}4,0 \beta_{\text{эф}}/\text{с}$ ($\beta_{\text{эф}}$ – эффективная доля запаздывающих нейтронов, $\beta_{\text{эф}} = 0,008$), что соответствует скоростям извлечения импульсных поглощающих стержней 0,01–1 м/с;
- обеспечена регистрация формы импульсов в диапазоне контролируемых параметров;
- разработан алгоритм перевода реактора из подкритического состояния в надкритическое на запаздывающих нейтронах.

Штатная система управления реактивностью позволяет создать либо одиночный импульс на запаздывающих нейтронах (рис. 1), либо серию импульсов на запаздывающих нейтронах (рис. 2).

Сгенерированные импульсы не удовлетворяют требованиям, предъявляемым к экспериментам по длительности импульса и энерговыделению, и в данной работе для реализации квазиимпульсов различной формы, длительности, энерговыделения были проведены следующие этапы:

- создана упрощенная модель кинетики ВИР-2М;
- рассчитано положение ИС для реализации квазиимпульсов;
- создан макет пневмопривода ИС с новым быстроедействующим пневмоклапаном и новым регистратором положения стержня;

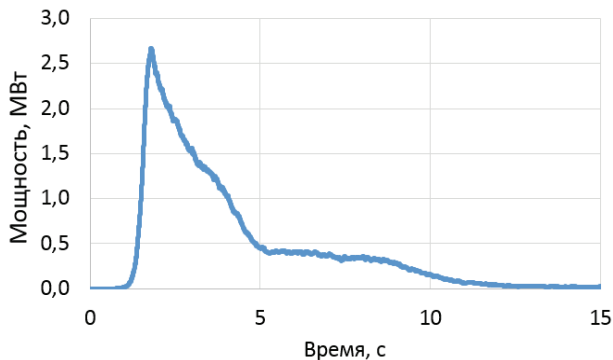


Рис. 1. Форма импульса на запаздывающих нейтронах с энерговыделением ~ 7 МДж при извлечении одной группы импульсных стержней (ИС)

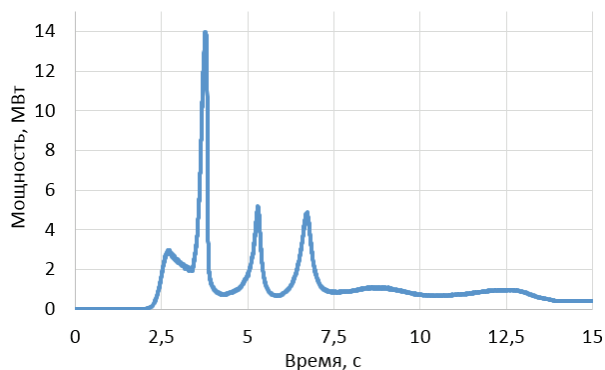


Рис. 2. Серия импульсов на запаздывающих нейтронах с энерговыделением $\sim 20,1$ МДж при извлечении двух групп ИС

- экспериментально исследованы зависимости движения ИС от параметров управления макета пневмопривода (от начального давления в ресивере, диаметра дроссельной шайбы, сигнала управления клапаном);

- создана расчетная модель макета пневмопривода на основе передаточной функции, связывающая положение ИС с параметрами управления макетом. Передаточная функция получена из анализа экспериментальных данных;

- по расчетной модели макета были определены и экспериментально отработаны на макете пневмопривода алгоритмы управления пневмосистемой для реализации квазиимпульсного режима работы на ВИР-2М.

Модель кинетики ВИР-2М с учетом инерции топливного раствора

Для достижения цели работы была создана модифицированная одноточечная модель кинетики реактора (1-3), а именно, добавлен член $\tau_{\text{запаздывания}}$ учитывающий инерцию обратной связи по мощности при расширении топливного раствора.

$$\frac{dP(t)}{dt} = \frac{\rho(t) - \beta_{\text{эфф}}}{\Lambda} P(t) + \sum_{i=1}^6 \lambda_i C_i(t) + Q(t), \quad (1)$$

$$\frac{dC_i(t)}{dt} = \frac{\beta_{\text{эфф}i}}{\Lambda} P(t) - \lambda_i C_i(t) \quad i = 1, 2, \dots, 6. \quad (2)$$

где: $P(t)$ – мощность системы; $\rho(t)$ – реактивность системы; $\beta_{\text{эфф}}$ – эффективная доля запаздывающих нейтронов; Λ – время генерации мгновенных нейтронов; λ_i – постоянная распада предшественников запаздывающих нейтронов i -ой группы; $C_i(t)$ – концентрация ядер предшественников запаздывающих нейтронов i -ой группы; $\beta_{\text{эфф}i}$ – эффективная доля запаздывающих нейтронов i -ой группы; $Q(t)$ – мощность внешнего источника.

$$\rho(t) = \rho(t)_{\text{введенное}} - A_0 \int_0^t P(\tau - \tau_{\text{запаздывания}}) d\tau, \quad (3)$$

где: $\rho(t)_{\text{введенное}}$ – реактивность, которую необходимо сообщить системе с помощью ИС; A_0 – коэффициент гашения реактивности $[\beta_{\text{эфф}} / \text{МДж}]$; $\tau_{\text{запаздывания}}$ – время запаздывания обратной связи по мощности.

Положим, что запаздывание обратной связи по мощности происходит из-за того, что расширение топливного раствора не происходит, пока волна расширения от «центра делений» в активной зоне не достигнет свободной верхней границы топливного раствора (рис. 3).

Тогда время запаздывания $\tau_{\text{запаздывания}}$ оценим по формуле 3:

$$\tau_{\text{запаздывания}} = \frac{H}{c}, \quad (3)$$

где: H – расстояние от центра делений до верхней границы топливного раствора; c – скорость звука в топливном растворе.

На рис. 4 представлено сравнение результатов расчета по формулам (1-4) с экспериментальными данными и с моделью Фукса–Хансена [3] для импульса с энерговыделением 10 МДж.

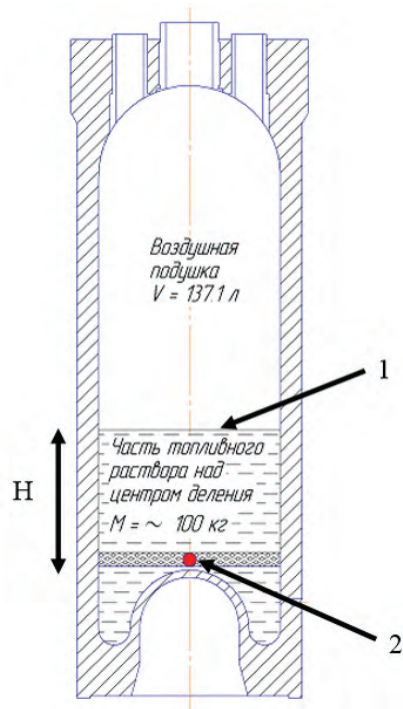


Рис. 3. Разрез активной зоны ИЯУ ВИР-2М: 1 – верхняя граница топливного раствора, 2 – «центр делений»

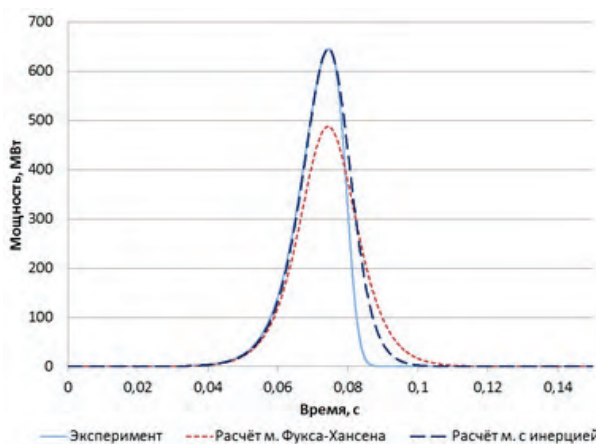


Рис. 4. Сравнение расчетных и экспериментальных данных для импульса с энерговыделением ~ 10 МДж

Созданная модель показывает хорошую сходимость с экспериментальными данными, однако заметны расхождения в «хвосте» импульса, что объясняется отсутствием в модели учета радиолитического кипения топливного раствора.

На рис. 5 представлено сравнение результатов расчета с экспериментальными данными для импульса на запаздывающих нейтронах.

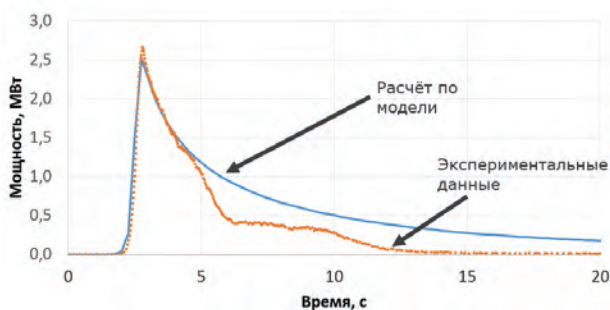


Рис. 5. Сравнение расчетных и экспериментальных данных для импульса на запаздывающих нейтронах с энерговыделением ~ 7 МДж

В квазиимпульсе наблюдается различие в расчетных и экспериментальных данных в хвосте импульса так же из-за отсутствия учета в модели других механизмов гашения реактивности.

Однако учитывая характерное время ~ 5 с, с которого начинаются существенные различия в расчетных и экспериментальных данных в квазиимпульсе, в расчетах будем пользоваться данной моделью кинетики с учетом инерции топливного раствора.

Были предложены варианты квазиимпульсов различной длительности и формы и с помощью модели, описанной выше, была вычислена реактивность, которую необходимо сообщить системе (введенная реактивность) с помощью извлечения ИС (рис. 6–8).

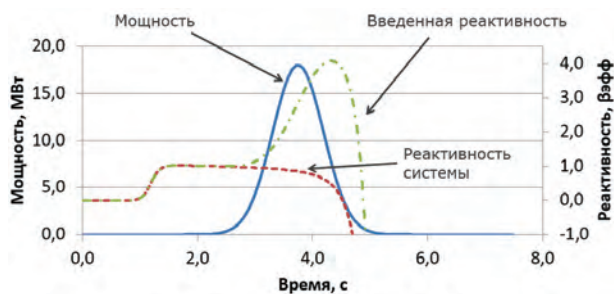


Рис. 6. Расчет реактивности для квазиимпульса колоколообразной формы для заданной длительности и мощности

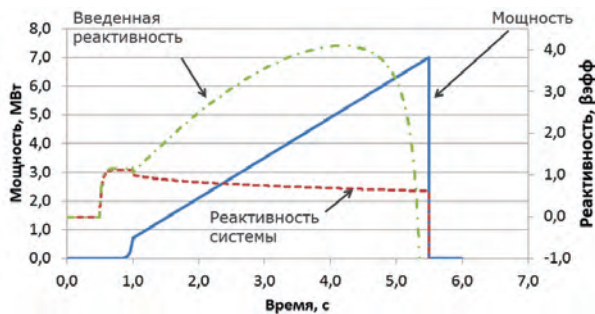


Рис. 7. Пример расчета реактивности для квазиимпульса треугольной формы с возрастающей мощностью

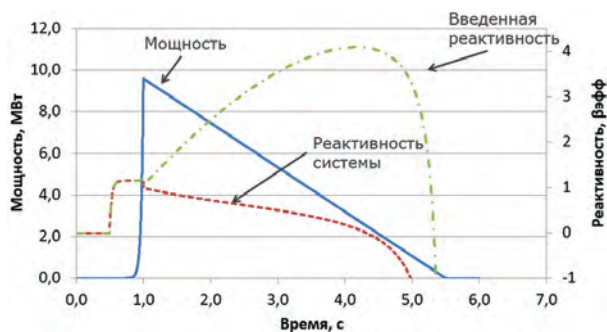


Рис. 8. Пример расчета реактивности для квазиимпульса треугольной формы с убывающей мощностью

Расчет положения органов управления реактивностью

Для предложенных квазиимпульсов реактивность, вносимая ИС, пересчитывалась в высоту извлечения ИС по экспериментальной зависимости (5), определенной на стадии физического пуска ВИР-2М:

$$\frac{\rho_{\text{стержня}}(t)}{\rho_{\text{max}}} = 1,024 \cdot \left(1 - e^{-0,0064h(t)}\right)^{1,2}, \quad (5)$$

где: $\rho_{\text{стержня}}(t)$ – физический вес стержня ИС (в единицах $\beta_{\text{эфф}}$); $h(t)$ – высота извлечения стержня ИС (в мм); $\rho_{\text{max}} = 4,6 \cdot \beta_{\text{эфф}}$.

На рис. 9 представлен пример, как должно изменяться положения ИС для обеспечения квазиимпульса колоколообразной формы. Характерные скорости движения стержня порядка ~ 0,1–2 м/с.

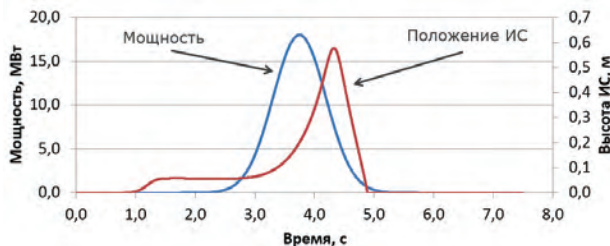


Рис. 9. Расчетная высота импульсного стержня для генерации квазиимпульса колоколообразной формы

Макет пневмопривода ВИР-2М

Генерация импульса делений на ИЯУ ВИР-2М происходит при извлечении из активной зоны ИС, которые связаны с поршнем пневмопривода системы. На рис. 10 представлен внешний вид пневмоприводов.

Экспериментальные данные, полученные на макете пневмопривода

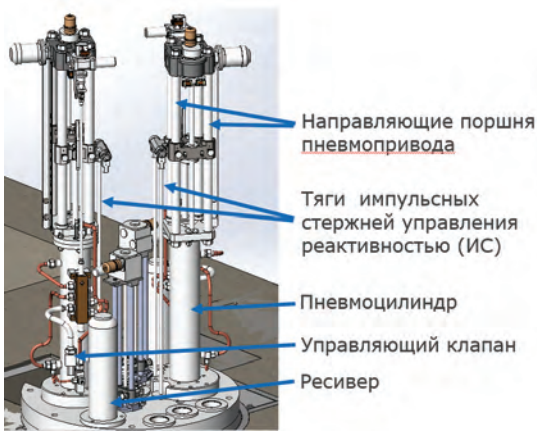


Рис. 10. Внешний вид пневмоприводов ИЯУ ВИР-2М

Пневмопривод состоит из ресивера, в котором создается начальное давление воздуха, управляющего клапана, регулирующего подачу воздуха из ресивера в подпоршневое пространство пневмоцилиндра, и стержней управления реактивностью, которые соединены с поршнем пневмопривода. Управляющий клапан обладает быстродействием $\sim 0,5$ с.

Анализ расчетного положения стержней привел к выводу, что существующий пневмопривод не подходит для реализации нового режима работы, т.к. не обеспечивает управляемость положением стержней на требуемых временах и скоростях

Предложена модернизация пневмопривода и создан макет пневмопривода на основе демонтированного пневмопривода, аналогичного установленному на ИЯУ ВИР-2М.

Однако, в отличие от штатного пневмопривода макет подвергнется конструкционным доработкам. Макет состоит из:

- пневмопривода системы управления реактивностью, аналогичного установленным на ИЯУ ВИР-2М;
- основного ресивера объемом 5 л, питающего пневмопривод;
- управляющего клапана КБ-20-70 с пневматическим управлением и быстродействием ~ 20 мс;
- дроссельной шайбы, которая устанавливалась сразу за управляющим клапаном. Она представляет собой шайбу с отверстием определенного диаметра. Дроссельная шайба необходима для ограничения скорости подачи воздуха в подпоршневое пространство привода;
- регистратора положения ИС, представляющего собой оптический сенсор и обеспечивающий погрешность измерения положения не более 1 мм;
- вспомогательной пневмосистемы, обеспечивающей управление клапаном и состоящей из вспомогательного ресивера и электропневмоклапана MHE2-MS1H-5/2-QS-4-K с быстродействием ~ 5 мс;
- Модульной платформы NI-PXI, для которой в среде разработки LabVIEW написано программное обеспечение для задания сигнала управления клапаном и регистрации данных о положении ИС с оптического сенсора.

На данном макете было получено большое количество экспериментальных данных о движении стержня в зависимости от начального давления в ресивере, диаметра дроссельной шайбы и сигнала управления клапаном. Эти данные необходимы для создания модели системы и выбора оптимального режима работы. Пример полученных данных показан на рис. 11. В данном случае сигнал управления Q последовательно открывал и закрывал клапан (в скобках указано время в миллисекундах открытого состояния клапана / закрытого состояния клапана).

Также была оценена повторяемость движения ИС по трем пускам при фиксированных параметрах управления макетом. При этом среднеквадратичное отклонение по всей высоте движения ИС не превысило 0,6 мм.

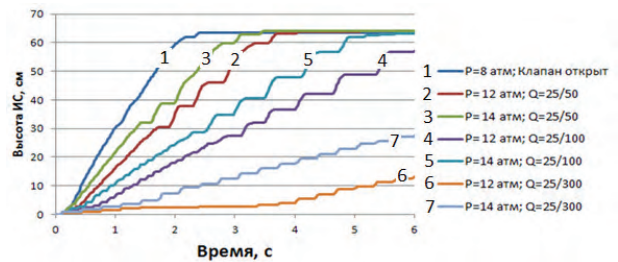


Рис. 11. Зависимость высоты ИС от параметров управления макетом (установлена дроссельная шайба с отверстием диаметром $\varnothing = 2,7$ мм): 1–7 – различные параметры управления макетом; P – начальное давление в ресивере (атм); Q – скважность сигнала управления клапаном (мс/мс)

Расчетная модель пневмопривода

Была создана модель пневмопривода на основе передаточной функции (6), рассчитанной по полученным экспериментальным зависимостям высоты ИС от параметров управления макетом пневмопривода:

$$Y(s) = \frac{343,8 + 3280,9s}{1 + 0,00923s + 67,8s^2} U(s), \quad (6)$$

где: $Y(s)$ – преобразование Лапласа для выходного сигнала системы (положения ИС); $U(s)$ – преобразование Лапласа для входного сигнала системы (сигнал управления клапаном, диаметр дроссельной шайбы, начальное давление в ресивере пневмопривода); s – комплексная переменная $s = \sigma + i\omega$.

Расчет положения ИС по модели пневмопривода сравнивался с экспериментальными данными. Пример сравнения расчета и эксперимента представлен на осциллограмме (рис. 12). Сплошные линии – экспериментальные данные, пунктирные – расчет по модели. Модель позволяет качественно предсказывать положение ИС при заданном давлении в ресивере, диаметре дроссельной шайбы и сигнала управления электропневмо импульсных стержней клапана.

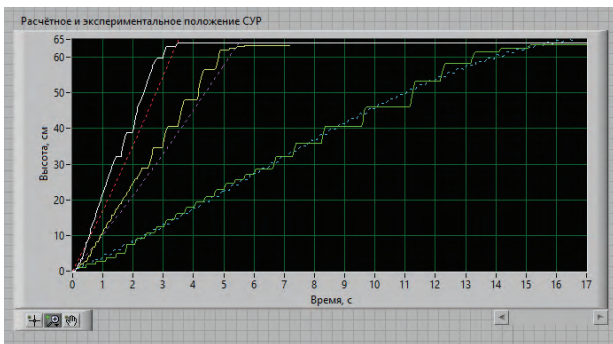


Рис. 12. Сравнение расчета по модели пневмопривода (пунктирные линии) и экспериментальных данных (сплошные линии) для пусков макета при различных скважностях сигнала управления клапаном

Расчет сигнала управления электропневмоклапаном

Модель пневмопривода использовалась для расчета сигнала управления клапаном. В модель задавалось расчетное желаемое положение стержня, расчет давал необходимый сигнал управления клапаном. Затем расчетный сигнал подавался на макет пневмопривода, и получалось экспериментальное положение стержня на макете. На рис. 13 приведен пример расчета и эксперимента для квазиимпульса возрастающей мощности.

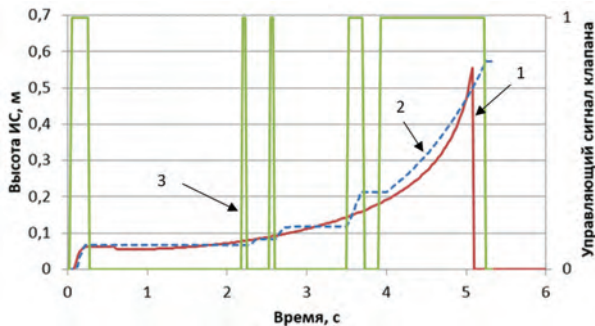


Рис. 13. Сравнение расчета и экспериментальных данных высоты ИС для квазиимпульса возрастающей формы: 1 – расчетное положение ИС для квазиимпульса, 2 – отработанное положение ИС на макете, 3 – сигнал управления клапаном

Таким образом на макете были отработаны алгоритмы управления пневмосистемой для реализации квазиимпульсов различной формы, длительности, энерговыведения.

Заключение

В ходе работы:

- 1) адаптирована для расчетов упрощенная модель кинетики ИЯУ ВИР-2М.
- 2) рассчитано положение стержней управления реактивностью для реализации квазиимпульсов.
- 3) создан макет пневмопривода с новым быстродействующим пневмоклапаном и новым регистратором положения стержня.
- 4) экспериментально исследованы зависимости движения стержня от параметров управления макетом.
- 5) создана математическая модель макета пневмопривода на основе передаточной функции.
- 6) по модели макета были рассчитаны и экспериментально отработаны алгоритмы управления пневмосистемой для реализации квазиимпульсного режима работы на ИЯУ ВИР-2М.

Литература

1. Воинов А. М., Колесов В. Ф., Матвеев А. С. и др. Водный импульсный реактор ВИР-2М и его предшественники. // ВАНТ. Сер. Физика ядерных реакторов. 1990. Вып. 3. С. 3–15.
2. Глухов Л. Ю., Котков С. П., Кубасов А. А., и др. Расширение облучательных возможностей ИЯР ВИР-2М при работе в импульсном режиме // Труды межотраслевой научной конференции «Импульсные реакторы: история создания и перспективы использования». 2015. Т. 2. С. 35–40.
3. Белл Д., Глесстон С. Теория ядерных реакторов. М.: Атомиздат, 1974.