

§4 Заключительный этап: командная часть

В командной части заключительного этапа командам-участникам было предложено освоить принципы управления ядерным реактором, физические процессы в котором моделировались в специализированном программном комплексе-тренажере.

Командам предоставлялось развернутое описание теоретических основ физических процессов, моделируемых программой. Используя полученные ранее знания в области физики частиц, каждой команде было необходимо решить 7 практических задач, общей суммой в 200 баллов.

Краткое описание физических основ рабочей модели.

Общий вид программы:



Упрощенная математическая модель нейтронно-физических процессов в ядерном реакторе. Предметом моделирования является динамика нейтронного поля в активной зоне ядерного реактора.

Состояние нейтронного поля характеризуют эффективным коэффициентом размножения $k_{эф}$, определяющим отношение числа нейтронов n -го поколения к числу нейтронов $(n-1)$ -го поколения в реакторе конечного размера без внешнего источника нейтронов.

Аналогичной характеристикой служит реактивность ρ реактора:

$$\rho = \frac{k_{эф} - 1}{k_{эф}}$$

При $k_{эф} > 1$ ($\rho > 0$) – реактор надкритичен, разгоняется (мощность растет), при $k_{эф} = 1$ ($\rho = 0$) реактор в критическом состоянии, мощность стационарна (не меняется), при $k_{эф} < 1$ ($\rho < 0$) реактор в подкритическом состоянии, мощность снижается.

При пуске реактора для создания начального поля нейтронов в активную зону помещают источник нейтронов, создающий плотность нейтронов S .

Рассматривают различные аспекты нестационарных процессов в реакторе:

-кинетика реактора - поведение реактора на малых уровнях мощности при внешних возмущениях реактивности;

-динамика реактора - нестационарное поведение реактора на энергетических уровнях мощности при внешних возмущениях реактивности и учёте изменения

физических свойств активной зоны, влияющих на размножающие свойства реактора (учет обратных связей по реактивности);

Подкритический реактор на малых уровнях мощности (Условия: $\rho < 0$, $n \ll N_0$, где N_0 – номинальный проектный уровень мощности)

Отметим важную особенность переходного процесса в подкритическом реакторе: чем меньше абсолютное значение реактивности ρ , то есть чем ближе реактор к критическому состоянию, тем больше время установления асимптотического стационарного состояния. Если увеличение реактивности производится последовательно равными малыми порциями, то, тем ближе реактор к критическому состоянию.

Линейный рост плотности нейтронов при наличии внешнего источника является признаком выхода в критическое состояние. При отключении источника плотность нейтронов установится на уровне, соответствующем уровню концентрации эмиттеров к моменту отключения. На рис. 1 и 2 приведена зависимость плотности нейтронов от времени при ступенчатом увеличении реактивности вплоть до критического состояния.

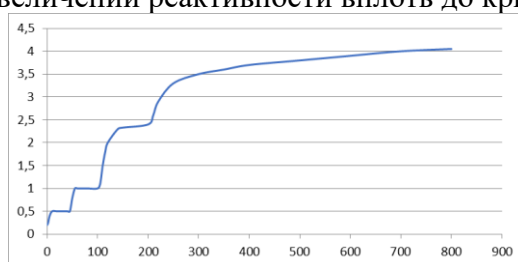


Рис.1 Изменение плотности нейтронов от времени при ступенчатом увеличении реактивности в соответствии с Рис.2 в подкритическом реакторе.

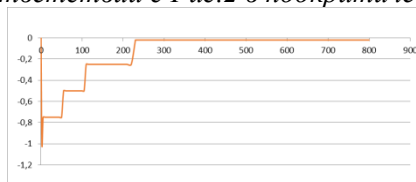


Рис.2 График внесения реактивности в подкритический реактор.

Изменение мощности при внесении реактивности в критический реактор

Важно понимать, что при $\rho=0$ реактор может находиться на любом уровне мощности!

В зависимости от величины вносимой в критический реактор реактивности имеем следующие случаи:

При ($0 < \rho < \beta$) – реактор надкритичен, разгоняется (мощность растет), зона управления

При ($\rho > \beta$) – реактор критичен по мгновенным нейтронам. Разгон неуправляем.

При ($\rho = 0$) - реактор в критическом состоянии, мощность стационарна (не меняется),

При ($\rho < 0$) - реактор в подкритическом состоянии, мощность снижается, зона управления.

На практике и, соответственно, в моделях реактивность часто измеряют в долях β , а мощность – в долях от номинального проектного уровня.

Кинетика реактора «нулевой» мощности. Реактором нулевой мощности называют реактор с мощностью, не превышающей единицы процентов от номинальной. В этом диапазоне еще не сказываются влияющие на реактивность изменения физических

свойств активной зоны, вызванные разогревом ее компонентов. Считаем также, что внешний источник нейтронов отсутствует.

Можно получить характеристическое уравнение, связывающее периоды с введенной реактивностью:

$$\rho = \frac{\Lambda}{T} + \frac{\beta}{1 + \lambda T}$$

Уравнение носит название уравнения “обратных часов”. Приближенное решение дает значения корней T_1 и T_2 :

$$T_1 = \frac{\beta - \rho}{\rho \lambda}, \quad T_2 = -\frac{\Lambda}{\beta - \rho}$$

Асимптотический период T_1 соразмерен времени жизни эмиттеров запаздывающих нейтронов $\tau = \frac{1}{\lambda}$, в то время как переходный период T_2 соразмерен времени генерации, или времени жизни мгновенных нейтронов φ .

Графики, иллюстрирующие зависимость плотности нейтронов от времени при положительном и отрицательном скачке реактивности приведены на Рис.3 и Рис.4.

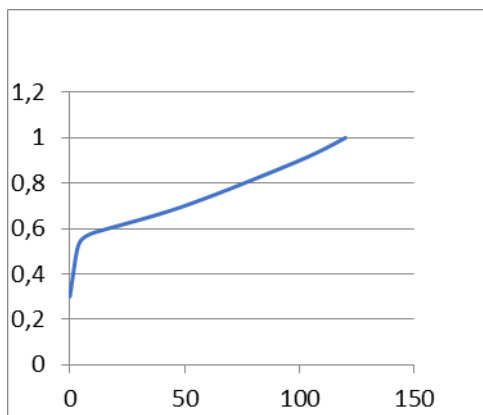


Рис. 3. Изменение мощности при положительном скачке реактивности

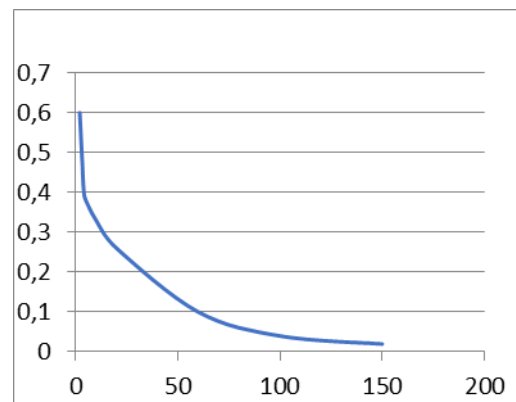


Рис. 4. Изменение мощности при отрицательном скачке реактивности

Динамика реактора в энергетическом диапазоне мощности. Энергетический режим (мощность превышает проценты от номинальной N_0 , принимаемой за «1» или 100%) характерен тем, что изменения мощности и других параметров активной зоны (температура и давление теплоносителя и т.д.) ведут к изменению физических свойств активной зоны, влияющих на размножающие свойства реактора, что, в свою очередь, ведет к изменению реактивности.

В модели учтены эффекты изменения реактивности, вызванные изменением мощности, а, следовательно, и температуры, топливных элементов. Данный эффект будем называть мощностным. В упрощенном виде можно считать, что в статике

$$\Delta \rho_M = K_M \Delta n$$

где: $\Delta \rho_M$ – изменение реактивности, вызванное изменением мощности Δn , K_M мощностной коэффициент реактивности.

Наличие отрицательного коэффициента реактивности, в частности K_M , оказывает стабилизирующее влияние на динамику изменения мощности. Оценить K_M можно экспериментально, определив разницу мощностей после перехода с одного

стационарного уровня мощности на другой после введения внешнего ступенчатого изменения реактивности $\Delta\rho$, которое после установления нового уровня мощности будет скомпенсирована равным $\Delta\rho_M$:

$$|K_M| = \Delta\rho/\Delta n$$

Наличие отрицательного мощностного коэффициента реактивности приводит к тому, что внесение положительной реактивности приводит не к бесконечному разгону реактора, а к динамическому переходу на некоторый больший уровень мощности. Таким образом, реактор становится устойчивым, и даже саморегулируемым.

Наличие обратных связей по реактивности не влияет на начальную фазу переходных процессов при введении внешней положительной или отрицательной реактивности. Их влияние скажется во времена, определяемые постоянными времени этих эффектов. Графики, иллюстрирующие зависимость плотности нейтронов от времени при положительном скачке реактивности при наличии отрицательного мощностного эффекта реактивности с различными значениями K_M и зависимости изменения мощности при разных начальных уровнях n_0 приведены на Рис.5 и Рис.6

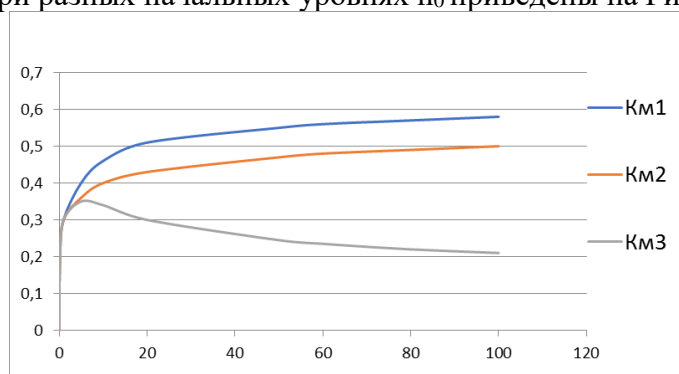


Рис.5. Зависимость плотности нейтронов от времени при положительном скачке реактивности при наличии отрицательного мощностного эффекта реактивности с различными значениями K_M , $|K_{M1}| < |K_{M2}| < |K_{M3}|$

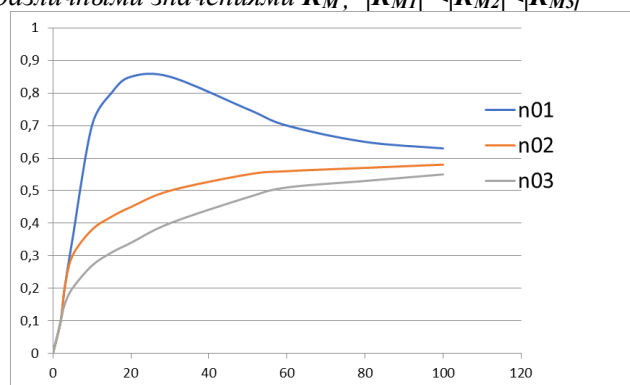


Рис.6. Зависимость плотности нейтронов от времени при положительном скачке реактивности при различных начальных уровнях мощности и одинаковым отрицательным мощностным коэффициентом K_M ,

Управление нейтронной мощностью ядерного реактора

Основной способ регулирования нейтронной мощностью реактора – за счет регулирования количества поглощаемых нейтронов. С этой целью в активную зону реактора необходимо размещать/ извлекать материалы, содержащие элементы с большим сечением захвата нейтронов (бор, кадмий). Регулирование осуществляется за счет погружения/извлечения в активную зону специальных стержней, содержащих поглощающие нейтроны материалы.

По своему назначению поглощающие стержни разделяются на регулирующие, компенсирующие и аварийные. Компенсирующие стержни (стержни КР) используют для компенсации избыточной реактивности активной зоны в начале кампании, компенсации температурных эффектов реактивности, а также для достижения нулевой реактивности при требуемом расположении стержней регулирования. Регулирующие стержни (стержни РР) используются для регулирования мощности в ручном или автоматическом режимах. Стержни аварийной защиты (стержни АЗ) используются для быстрого заглушения (остановки) реактора при возникновении аварийных ситуаций.

В данной модели представлены 3 «обобщенных стержня», представляющих параллельно работающие стержни соответствующих групп (РР, КР или АЗ). Эффективность (вес) РС определяется величиной реактивности, которую стержень вносит при полном его погружении в активную зону при перемещении от верхнего до нижнего концевого выключателя. Эффективность стержня может быть определена экспериментально путем измерения установившегося периода изменения мощности после сброса стержня в активную зону.

$$\rho_{РС}^0 = \frac{\beta}{1 + \lambda T_1}, \quad T_1 = \frac{t_2 - t_1}{\ln n_2 - \ln n_1},$$

где n_1 и n_2 – значения мощности в моменты t_1 и t_2 соответственно.

Аварийная защита реактора

Защита по уровню мощности фиксирует превышение мощностью предупредительных и аварийных уставок. При превышении данной уставки вырабатывается сигнал аварийной защиты, вызывающий падение всех стержней в активной зоне с максимальной скоростью.

Защита по периоду разгона фиксирует опасное уменьшение периода разгона, что говорит о недопустимо большой реактивности реактора. При этом вырабатывается сигнал аварийной защиты, вызывающий падение всех стержней в активной зоне с максимальной скоростью.

4.1 Определение веса групп стержней РР, КР и АЗ методом сброса из критического состояния

Задание:

Определить веса стержней РР, КР, АЗ методом сброса из критического стационарного состояния.

Начальное состояние:

Состояние мощности - стационарное

Уровень мощности $n_0 = 10^{-2} N_0$

Реактивность $\rho_0 = 0$

Положение стержней варьируется в 9-ти различных вариантах от 50% погружения до взведенного состояния

Аварийная защита отключена.

Сценарий выполнения:

Убедиться в стационарности состояния.

Сбросить (погрузить) выбранную группу стержней (РР, КР или АЗ) до нижнего положения.

Зафиксировать значения несколько значений n_i в моменты времени t_i

Рассчитать несколько значений периода T и весов стержней групп РР, КР и АЗ по формуле, приведенной в описании модели, и найти средние значения для каждой из групп стержней.

Максимальное время работы над задачей – 3 часа.

Критерии оценки:

15 баллов - Соответствие определенных значений весов стержней реальным значениям, принятым в модели, в 5 и более вариантах

10 баллов - Соответствие определенных значений весов стержней реальным значениям, принятым в модели, в 3 или 4 вариантах

5 баллов - Соответствие определенных значений весов стержней реальным значениям, принятым в модели, в 1 или 2 вариантах

0 баллов – Отсутствие соответствия определенных значений весов стержней реальным значениям, принятым в модели, во всех вариантах

4.2 Перекомпенсация стержней регулирования

Задание:

Определить, при каком уровне погружения стержня АЗ, произойдет перекомпенсация выведенных стержней РР и КР.

Начальное состояние:

Состояние мощности - стационарное

Уровень мощности $n_0 = 10^{-2} N_0$

Реактивность $\rho_0 = 0$

Положение стержней РР и КР – погружены на 20%

Положение стержня АЗ – полностью извлечен

Аварийная защита отключена.

Сценарий выполнения:

Убедиться в стационарности состояния.

Методом сброса определить веса стержней АЗ, РР и КР.

Рассчитать уровень погружения стержня АЗ, при котором происходит перекомпенсация стержней РР и КР при их полном подъеме.

Критерии оценки:

На модельном варианте после полного выведения стержней РР и КР определяется положение стержня АЗ, соответствующее начальному уровню реактивности.

35 баллов присуждается команде, чье решение оказывается наиболее близким к полученному уровню.

Далее с шагом в 5 баллов, согласно очередности удаления расчетного решения к полученному уровню, присуждаются более низкие баллы остальным командам.

В случае наличия одинакового решения в двух команд обоим присуждается равные баллы, последующей по очередности удаления команде присуждается более низкий балл с шагом в 5.

4.3 Определение мощностного коэффициента реактивности реактора

Задание:

Определить мощностной коэффициент реактивности реактора методом измерения изменений стационарных уровней мощности после введения возмущения по реактивности.

Начальное состояние:

Состояние мощности – стационарное в энергетическом диапазоне (30% - 50% от номинального по заданию инструктора)

Уровень мощности p_0 : 30% - 50% от номинального p_0 . Задается инструктором.

Реактивность $\rho_0 = 0$

Стержни КР – на верхних концевых выключателях (полностью извлечены)

Стержни РР – в среднем положении

Стержни АЗ – полностью извлечены

Защиты по периоду и мощности включены.

Заданный инструктором в модели вариант значения мощностного коэффициента реактивности K_M

Сценарий выполнения:

Убедиться в стационарности исходного состояния реактора на заданном энергетическом уровне.

Перемещением (извлечением) стержня РР примерно на (0,05 – 0,2) от полного хода в активной зоне задать возмущение реактивности.

По выполненному перемещению стержней определить внесенную реактивность.

Выждать установления нового стационарного уровня мощности.

Определить новое стационарное значение уровня мощности и соответствующее изменение уровня мощности.

Определить по формуле, приведенной в описании модели, значение K_M

Во время эксперимента контролировать тренды изменения мощности и реактивности реактора. Убедиться, что в процессе переходного процесса перехода на новый уровень мощности реактивность возвращается к нулевому значению, то есть реактор стремится к критическому состоянию

Критерии оценки:

25 баллов - Соответствие определенного значения коэффициента реактивности реальным значениям, принятым в модели, с точностью до двух значащих цифр и более

20 баллов - Соответствие определенного значения коэффициента реактивности реальным значениям, принятым в модели, с точностью до одной значащей цифры и более

0 баллов – Несоответствие определенного значения коэффициента реактивности реальным значениям, принятым в модели.

4.4 Выход на заданный уровень мощности одним скачком

Задание:

По известным весам стержней и мощностному коэффициенту реактивности определить изменение положение группы стержней, при котором будет достигнут заданный уровень мощности

Начальное состояние:

Состояние мощности - стационарное
Уровень мощности p_0 = задается инструктором
Реактивность $\rho_0 = 0$
Положение стержней РР и КР – полностью опущены
Положение стержня АЗ – полностью извлечены
Аварийная защита включена.
Конечный уровень мощности задается инструктором

Сценарий выполнения:

Убедиться в стационарности состояния.
По известным весам стержней и мощностному коэффициенту реактивности рассчитать изменение положение группы стержней, приводящее к увеличению уровня мощности до заданного путем единичного изменения положения (скачком).

Критерии оценки:

На модельном варианте задается изменение положения стержня, рассчитанное каждой командой. Проводится ожидание установления нового уровня мощности.
25 баллов присуждается команде, чье решение оказывается наиболее близким к заданному уровню.
Далее с шагом в 5 баллов, согласно очередности удаления расчетного решения от полученного уровня, присуждаются более низкие баллы остальным командам.
В случае наличия одинакового решения в двух команд обоим присуждается равные баллы, последующей по очередности удаления команде присуждается более низкий балл с шагом в 5.

4.5 Определение предельного значения реактивности (потеря управления реактором)

Задание:

Определение предельного значения реактивности, при которой реактор становится неуправляем (разгон на мгновенных нейтронах)

Начальное состояние:

Состояние мощности - стационарное
Уровень мощности p_0 = задается инструктором
Реактивность $\rho_0 = 0$
Все стержни полностью опущены
Аварийная защита отключена.

Сценарий выполнения:

Убедиться в стационарности состояния.

Итерационно определить значение внесенной реактивности, при которой происходит экспоненциальный рост мощности без достижения стационарного состояния.
Рассчитать, при каких положениях стержней регулирования может быть достигнута максимальный контролируемый уровень мощности реактора
Максимальное время выполнения задания – 2 часа.

Критерии оценки:

На модельном варианте задается изменение положения стержня, рассчитанное каждой командой. Проводится ожидание установления нового уровня мощности.
40 баллов присуждается команде, чье решение оказывается наибольшим.
Далее с шагом в 5 баллов, согласно очередности удаления расчетного решения от максимального, присуждаются более низкие баллы остальным командам.
В случае наличия одинакового решения в двух команд обоим присуждается равные баллы, последующей по очередности удаления команде присуждается более низкий балл с шагом в 5.

4.6 Определение критического положения стержня методом обратных множителей

Задание:

Определение критического положения стержня методом обратных множителей

Начальное состояние:

Состояние мощности - стационарное
Уровень мощности n_0 = задается инструктором
Реактивность ρ_0 отрицательна, задается инструктором
Отрицательная реактивность компенсируется источником нейтронов
Все стержни полностью опущены
Аварийная защита включена.
Таблица значений реактивности и соответствующий график скрыты.

Сценарий выполнения:

Убедиться в стационарности состояния.
Изменить положение стержня РР на 0.05-0.1 от высоты
Зафиксировать значение установившейся мощности
Повторить извлечение и фиксацию мощности 5-7 раз.
Построить график зависимости $(n_0)^{-1}$ от положения стержня. Путем линейной экстраполяции определить пересечение с нулем функции $(n_0)^{-1}$. Данное положение считать критическим.

Критерии оценки:

На модельном варианте без источника нейтронов выполняется поиск критического положения стержня.
40 баллов присуждается команде, чье расчетное решение оказывается наиболее близким к найденному.
Далее с шагом в 5 баллов, согласно очередности удаления расчетного решения от найденного, присуждаются более низкие баллы остальным командам.
В случае наличия одинакового решения в двух команд обоим присуждается равные баллы, последующей по очередности удаления команде присуждается более низкий балл с шагом в 5.

4.7 Маневрирование мощностью

Задание:

Максимально быстрым способом провести маневрирование мощностью

Начальное состояние:

Состояние мощности - стационарное

Уровень мощности p_0 - 100% от номинального p_0

Реактивность $\rho_0 = 0$

Все стержни полностью опущены

Аварийная защита включена.

Сценарий выполнения:

Убедиться в стационарности состояния.

Провести ожидание в 60 сек на начальном уровне мощности.

Спустить уровень мощности до 80% от номинального уровня.

Провести ожидание в 60 сек на текущем уровне мощности.

Поднять уровень мощности до 100% от номинального уровня.

Провести ожидание в 60 сек на текущем уровне мощности.

Избегать вовремя маневрирование срабатывание аварийной защиты по периоду увеличения мощности. Использовать метод ступенчатого увеличения.

Критерии оценки:

20 баллов присуждается команде, которая продемонстрировала выполнения сценария задачи за наиболее короткий срок.

Далее с шагом в 5 баллов, согласно очередности удаления по времени от наилучшего решения, присуждаются более низкие баллы остальным командам.

В случае наличия одинакового решения в двух команд обоим присуждается равные баллы, последующей по очередности удаления команде присуждается более низкий балл с шагом в 5.