**ЛАБОРАТОРНАЯ РАБОТА № 5**

**МАТЕМАТИЧЕСКОЕ МОДЕЛИРОВАНИЕ НЕЛИНЕЙНОЙ САР ЯДЕРНОГО РЕАКТОРА**

# ВВЕДЕНИЕ

Типовая система автоматического регулирования ядерного реактора – управляемая система очень большой размерности. Детальное исследование динамических свойств такой САР с применением методов численного моделирования – сложная научно-техническая задача, так как в реакторной установке (РУ) присутствуют технические устройства, для описания динамических процессов в которых используется информация из большинства фундаментальных и прикладных наук.

До начала 90-х годов *прошлого* столетия для исследования нестационарных процессов в сложных управляемых технических системах разрабатывались специализированные динамические программы (применительно к конкретной установке). Использование таких программ для исследования нестационарных процессов в случае, например, значительной модернизации этой же установки требовало серьезной переработки расчетной программы на уровне исходных кодов (математические модели, алгоритмы и т.п.), что реально способны были выполнить только программисты, создавшие эту программу.

Значительный прогресс, достигнутый в последнее десятилетие в аппаратных и программных возможностях современной вычислительной техники, создал необходимую базу для разработки принципиально новых средств интеллектуального САПР, например, объектно-ориентированных программных сред для исследования нестационарных процессов в сложных динамических системах.

В настоящее время в РФ создан ряд современных программных комплексов (ПК) для исследования нестационарных процессов в реакторных установках.

Так, например, программно-инструментальные комплексы АИС95 и “ЭНИКОКАД” предназначены для моделирования процессов нейтронной кинетики, теплогидравлики и автоматического управления применительно к задачам разработки полномасштабных тренажеров энергоблоков АЭС с реакторами типа РБМК. Программный комплекс ТЕРМИТ-Д предназначен для проектного обоснования безопасности ядерных паропроизводящих установок (ЯППУ) транспортных ЯЭУ.

Несмотря на высокий научный уровень вышеуказанных программных средств, необходимо отметить их два серьезных недостатка:

- во-первых, каждое из них может быть рекомендовано для использования в проектных разработках новых реакторных установок только аналогичного типа;

- во-вторых, ни одно из этих ПС не пригодно для использования в учебном процессе высшей школы по причине отсутствия соответствующего методического наполнения.

К программным средствам интеллектуального САПР относится и SimInTech, одним из главных достоинств которого является ***инвариантность*** к предметной области исследуемого объекта или физического явления. Это позволяет выполнить в среде SimInTech численное исследование рабочих процессов практически в любых сложных технических системах: в электромеханических, в тепловых, в пневмо- и гидродинамических, в робототехнических, в ряде других комбинированных динамические систем, в том числе и в реакторных системах.

Для описания динамики нейтронно-физических и теплогидравлических процессов в ядерных реакторах в среде SimInTech используются ***более простые***, но ***более “быстрые”*** математические модели, чем в вышеупомянутых отраслевых программных средствах. Также, модульность и наличие интеграции со многими специализированными расчетными кодами позволяет использовать SimInTech и как интегрирующую платформу при создании сложных комплексных моделей динамики (тренажёры операторов АЭС, операторов ГЭУ подвижных объектов, виртуальные энергоблоки…).

Программно-технические возможности среды SimInTech качественно превосходят возможности отечественных отраслевых программных средств в задачах разработки математических моделей систем автоматического и логического управления, систем защит и блокировок применительно к проектному обоснованию АСУ ТП для энергоблоков АЭС с реакторами типа ВВЭР, РБМК, быстрых реакторов различного типа и других.

Не менее важным достоинством среды SimInTech является широта области применимости: от простейших динамических задач учебного назначения до реальных отраслевых разработок, в том числе и в экспортном исполнении.

Наличие в среде SimInTech подробного учебно-методического сопровождения позволяет использовать его в учебном процессе Высшей школы по многим инженерным специальностям, включая и выбранную Вами.

В предыдущих лабораторных работах Вы освоили некоторые из методов работы в среде SimInTech. В настоящей лабораторной работе Вы освоите еще ряд новых методов работы, а также выполните *самостоятельное* численное исследование динамических характеристик упрощенной математической модели нелинейной САР ядерного реактора с регулятором релейного типа.

Перейдем к выполнению заданий настоящей лабораторной работы.

# ЦЕЛЬ РАБОТЫ

* Знакомство с описанием математических моделей нейтронно-кинетических процессов в специализированной библиотеке ***Кинетика нейтронов***, включая:
  + сравнительный анализ частотных и переходных характеристик кинетики ядерного реактора с использованием одногруппового и “классического” (6-группового) описания ядер-предшественников запаздывающих нейтронов;
  + сравнение переходных характеристик кинетики ядерного реактора без учета и с учетом остаточного энерговыделения;
* Самостоятельное исследование нестационарных процессов в нелинейной САР ядерного реактора (САР ЯР) с релейным регулятором, включая:
  + формирование математической модели САР ЯР с релейным регулятором;
  + моделирование переходных процессов при варьировании параметров САР ЯР.

# 1 МАТЕМАТИЧЕСКИЕ МОДЕЛИ НЕЙТРОННОЙ КИНЕТИКИ

## 1.1 Описание блоков специализированной библиотеки Кинетики нейтронов

Специализированная библиотека ***Кинетика*** среды SimInTech содержит **три** типовых блока, два из которых описывают нейтронно-кинетические процессы в ядерном реакторе в точечном односкоростном приближении, а третий – описывает динамику остаточного энерговыделения с учетом предыстории работы (или простоя?) реактора (кампании).

Первые два блока позволяют описывать кинетику ядер-предшественников запаздывающих нейтронов от одно- группового, до n-группового приближений. Математические модели этих блоков получены на основании известных уравнений кинетики “точечного” ядерного реактора в односкоростном приближении (т.е. процесс деления ядер осуществляется нейтронами *одной* энергетической группы – либо только тепловыми, либо только быстрыми):

|  |  |
| --- | --- |
|  | (1.1) |

где:

*N(t)* – мощность реактора;

*ρ(t)* – реактивность;

*βэфф* – эффективная доля запаздывающих нейтронов;

*l* – время жизни мгновенных нейтронов;

*Cᵢ(t)* – концентрация ядер-предшественников запаздывающих нейтронов *i*-й группы;

*λᵢ* – постоянная распада ядер-предшественников *i*-й группы;

*βᵢ* – доля запаздывающих нейтронов *i*-й группы;

*S(t)* – интенсивность внешнего источника нейтронов.

**Первый типовой блок** (*Классическая модель*) соответствует *постоянной* (во времени) интенсивности *внешнего* источника нейтронов. Входом является изменение реактивности

*,*

а выходом – либо безразмерное отклонение мощности

, либо нормированная мощность .

После преобразований исходная система уравнений принимает вид:

|  |  |
| --- | --- |
|  | (1.2) |

где:

– нормированное отклонение концентрации ядер-предшественников запаздывающих нейтронов *i*-той группы;

– абсолютная (по модулю) подкритичность ядерного реактора;

– относительное изменение реактивности, в долях ;

– относительная доля запаздывающих нейтронов *i*-той группы.

При *t* = 0 реактор находится в стационаре, поэтому

.

На рис. 1.1 представлена копия диалогового окна этого блока. По умолчанию и *λᵢ* соответствуют данным для “чистого” топлива 235U, хотя Пользователь может их скорректировать, например, если в процессе работы реактора нуклидный состав топлива изменился. Структура диалогового окна этого блока позволяет задать и другое число групп ядер-предшественников запаздывающих нейтронов и, соответственно, и λ*ᵢ*. Например, если необходимо учесть вклад фотонейтронов, то, число групп может быть увеличено, например, до 8, и наоборот, можно задать и одногрупповую модель.

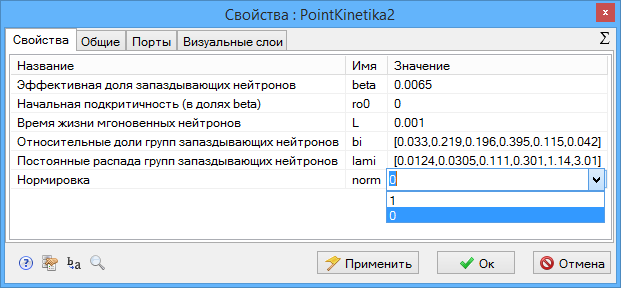


Рисунок 1.1 – Свойства блока *Точечная Кинетика*

Значение времени жизни мгновенных нейтронов (по умолчанию) соответствует приблизительно времени жизни в ядерном реакторе типа РБМК.

Значения в последней диалоговой строке (*Нормировка*) соответствуют следующим видам выходного сигнала блока: **1** – нормированная мощность

а **0** – безразмерное отклонение мощности

**Второй типовой блок** соответствует *Модели мгновенного скачка*. Входом является изменение реактивности , а выходом – либо нормированная мощность

либо безразмерное отклонение мощности

Уравнения кинетики нейтронов после преобразований исходной системы уравнений принимает вид:

Уравнения кинетики нейтронов после преобразований исходной системы уравнений принимают вид:

|  |  |
| --- | --- |
|  | (1. 3) |

где

а остальные обозначения совпадают с системой для блока с “классической” моделью кинетики нейтронов. Очевидно, что если при нейтронная мощность постоянна, то начальные условия для равны 1.0.

На рис. 1.2 представлена экранная копия диалогового окна этого блока, где умолчанию и *λᵢ* соответствуют данным для “чистого” топлива 235U, а значения свойства *Нормировка* имеют тот же смысл, что и в диалоговом окне блока с “классической” моделью кинетики нейтронов.

**Примечание:** Переход к *абсолютной* нейтронной мощности ядерного реактора необходимо проводить по соотношению:

|  |  |
| --- | --- |
|  | (1.4) |

где N(0) – стационарное значение мощности при t = 0.

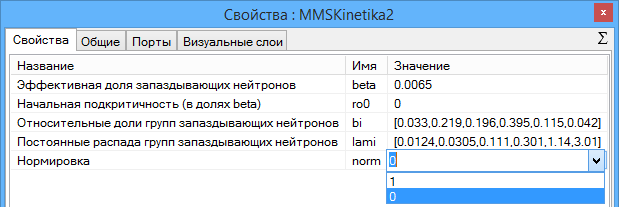


Рисунок 1.2 – Свойства блока Точечная Кинетика (Модель мгновенного скачка)

**Третий типовой блок** (*Остаточное энерговыделение*) в библиотеке ***Кинетика*** *нейтронов* позволяет учесть дополнительный вклад остаточного тепловыделения продуктов деления в тепловую мощность ядерного реактора, что особо актуально при *резких снижениях* нейтронной мощности. Входной сигнал в блок – относительная нейтронная мощность (нормированная на номинальную нейтронную мощность), а выходной сигнал из блока – относительная тепловая мощность реактора (нормированная на номинальную нейтронную мощность), определяемая выражением:

|  |  |
| --- | --- |
|  | (1.5) |

где и – нормированные на номинальную нейтронную мощность тепловая мощность реактора и мощность остаточного тепловыделения, соответственно.

Предыстория работы реактора задается в виде суперпозиции “ступенек” нормированной нейтронной мощности. На рис. 1.3 представлена экранная копия диалогового окна этого блока.

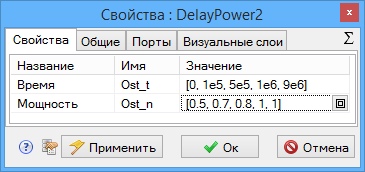


Рисунок 1.3 – Свойства блока Остаточное энерговыделение (по ANSI)

Данные в диалоговом окне на рис. 1.3 описывают следующую предысторию работы ядерного реактора: на момент моделирования реактор имеет кампанию 9·106 с, причем: при 0 с ≤ t ≤ 105 c относительная нейтронная мощность реактора (нормированная на номинальную нейтронную мощность) равнялась 0.5;

при 1105 c < *t* ≤ 5 10 5 c ;  
при 5 10 5 c < *t* ≤ 1 10 6 c ;   
при 110 6 c < *t* ≤ 910 6 c .

## 1.2 Сравнение «классической» и одногрупповой моделей кинетики нейтронов

В прошлом семестре при выполнении лабораторных работ и домашнего задания по курсу УТС Вы использовали *простейшую* математическую модель нейтронно-кинетических процессов в ядерном реакторе, а именно: “точечную” модель с одной *эффективной* группой запаздывающих нейтронов.

Если рассматриваются “длительные” переходные процессы, то значение *эффективной* постоянной распада λ ядер-предшественников запаздывающих нейтронов в одногрупповой модели рекомендуется получать осреднением “времен жизни” групп запаздывающих нейтронов по соотношению:

|  |  |
| --- | --- |
|  | (1.6) |

которое дает значение λ = 0.0767 с-1 (заметим, что в некоторых учебных пособиях приводится значение λ = 0.072 с-1).

Если рассматриваются “короткие” переходные процессы (например, начальный этап развития переходного процесса при значительном скачке реактивности), то значение эффективной постоянной распада λ ядер-предшественников запаздывающих нейтронов в одногрупповой модели можно получить из соотношения:

|  |  |
| --- | --- |
|  | (1.7) |

которое дает значение λ = 0.405 с-1.

Выполним сравнение частотных и переходных характеристик для одногрупповой (для обоих вариантов   
расчета λ ) и для “классической” моделей кинетики нейтронов. Сформируйте структурную схему, внешний вид которой должен быть близок рис. 1.4.

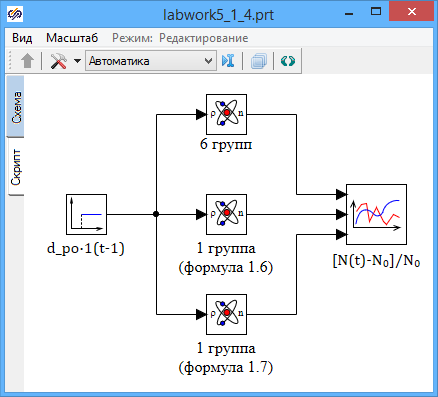


Рисунок 1.4 – Структурная схема проекта

**Внимание:** Набранные структурные схемы, математические выкладки и результаты расчетов необходимо представлять преподавателю для “согласования”.

Откройте вкладку ***Скрипт*** проекта и заполните его таким же образом, как это выполнено на рис. 1.5.

Величина скачка реактивности **d\_po** задается параметром **k** (в долях *βэфф*).

Глобальные константы **Lam** и **Lam\_1** – эффективные постоянные распада, вычисленные по соотношениям (1.6) и (1.7), соответственно.

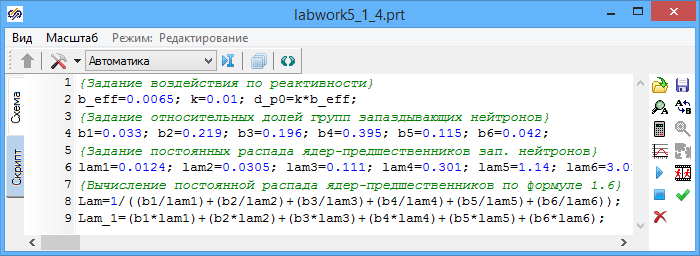


Рисунок 1.5 – Вкладка Скрипт проекта

Переместите в окне редактора ***Скрипта***курсор на кнопки ***Рассчитать все*** и ***Просмотр всех переменных*** и выполните щелчок левой клавишей «мыши» соотвественно: появится таблица с расчетными данными. Используя “прокрутку” таблицы, убедитесь, что рассчитанные значения эффективных постоянных распада ядер-предшественников для “коротких” и “длительных” переходных процессов совпадают с приведенными выше значениями.

Выйдите из вкладки ***Скрипт*** и задайте свойства блоков структурной схемы. В блоке, описывающем 6-ти групповую модель кинетики нейтронов, оставьте значения свойств, заданные по умолчанию. В блоках, описывающих одногрупповую модель кинетики нейтронов, в диалоговой строке **Постоянные распада групп…** введите **Lam** и **Lam\_1**, соответственно. Что вводить в других диалоговых строках этих блоков – необходимо определить самостоятельно.

Выполним сначала моделирование “длительного” переходного процесса при скачке реактивности 0.01·*βэфф*. Установите в диалоговом окне ***Параметры расчета*** следующие параметры интегрирования: Время интегрирования – 1000; Минимальный шаг интегрирования – 1е-10; Максимальный шаг интегрирования – 0.1; Шаг синхронизации задачи – 0.1. Значения других диалоговых строк – по умолчанию.

Выполните расчет переходного процесса. Приведите вид линий и параметры осей координат на графике к виду, близкому рис. 1.6.

На рис. 1.6 синей линией двойной толщины показан график переходного процесса для “классической” модели кинетики нейтронов, сплошной одинарной красной линией – для одногрупповой модели с эффективной постоянной распада Lam, рассчитанной по соотношению (1.6), а пунктирной розвой линией – для одногрупповой модели с эффективной постоянной распада Lam\_1, рассчитанной по соотношению (1.7).

Результаты рис. 1.6 показывают, что с эффективной постоянной распада Lam одногрупповая модель кинетики лишь приблизительно соответствует “классической” модели кинетики, а с эффективной постоянной распада Lam\_1 – различие огромно (при t = 1000 c приблизительно в 40 раз).

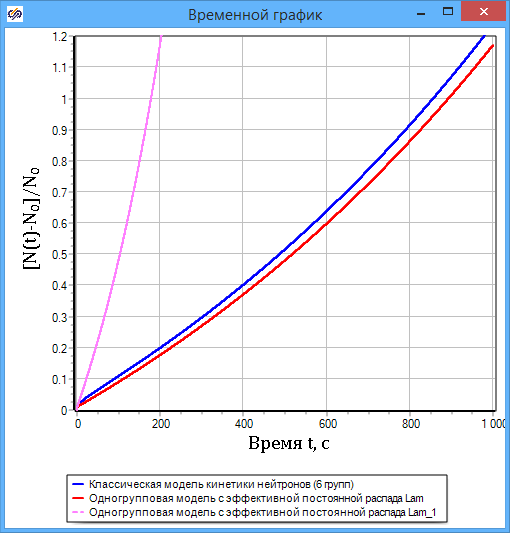


Рисунок 1.6 – Безразмерное отклонение мощности для классической и одногрупповой моделей кинетики нейтронов при скачке реактивности 0.01·βэфф

Выполним моделирование “короткого” переходного процесса при скачке реактивности **0.1·***βэфф*. Установите в диалоговом окне **Параметры расчета** следующие параметры интегрирования: *Время интегрирования* – **3**; *Минимальный шаг интегрирования* – **1е-10**; *Максимальный шаг интегрирования* – **0.001**; *Шаг синхронизации задачи* – **0.001**. Параметры других диалоговых строк – по умолчанию.

Выполните расчет переходного процесса. Приведите вид линий и параметры осей координат на графике к виду, близкому рис. 1.7.

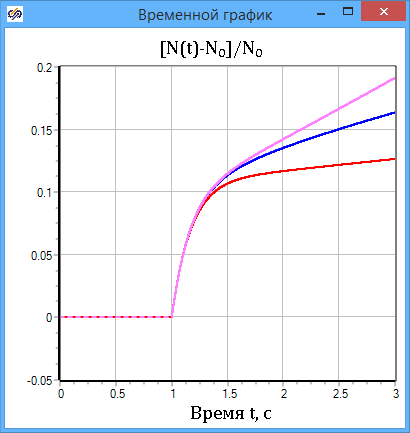


Рисунок 1.7 – Безразмерное отклонение мощности для классической и одногрупповой моделей кинетики нейтронов при скачке реактивности 0.1·βэфф

Продолжая сравнение, выполним расчет частотных характеристик для “классической” и одногрупповой моделей кинетики нейтронов (для обоих вариантов вычисления λ).

Выполните щелчок по кнопке ***Инициализация***и затем по кнопке ***Стоп***: расчет будет прерван, так и не начавшись; произойдет инициализация структурной схемы при нулевом сигнале на входе блоков, описывающих кинетику нейтронов.

Переместите курсор на закладку ***Исследования*** и *однократным* щелчком *левой* клавиши "мыши" инициализируйте одноименный каталог в Общетехнической библиотеке типовых блоков. Перенесите в Схемное Окно блок ***Построение частотных характеристик*** и проведите к ним линии связи, как это показано на рис. 1.8.

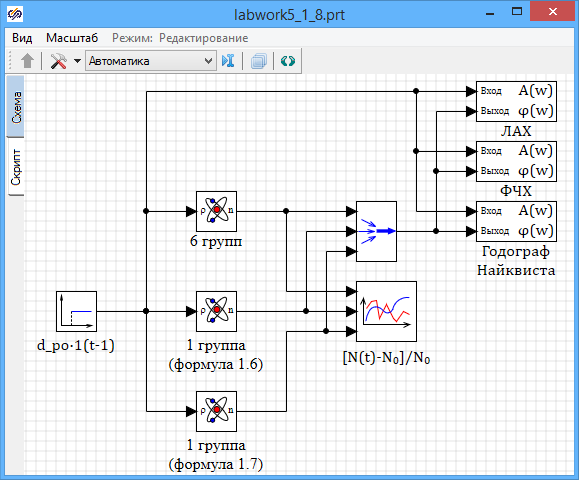


Рисунок 1.8 — Схемное окно проекта

Выполните оформление поясняющих подписей (щелчок *правой* клавишей "мыши" по блоку, далее пункт ***Свойства*** и далее ...) и структурная схема САР примет вид, подобный рис. 1.8.

Выделите блоки ЛАХ и ФЧХ мышкой и сделайте щелчок левой кнопкой мыши. Из выпавшей вкладки выберите пункт ***Свойства объекта****,* рис. 1.9*.*

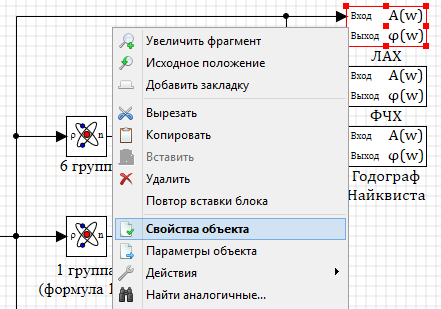


Рисунок 1.9 — Свойства объекта блока *Построение частотных характеристик*

В открывшемся меню выберите пункт ***Свойства объекта***, щелкнув по ней *левой* клавишей "мыши". Откроется диалоговое окно ***Свойства***блока ***Построение частотных характеристик***. Введите значения такие же, как на рис. 1.10.

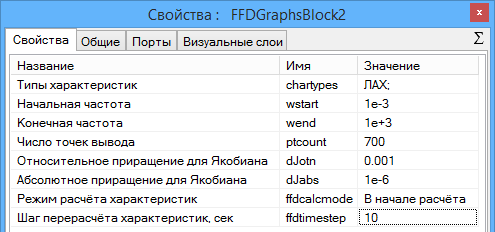


Рисунок 1.10 — Свойства блока *Построение частотных характеристик* для ЛАХ

Заполнив по инструкции свойства блока ***Построение частотных характеристик***, Вы задали следующее: рассчитать (ЛАХ) и (ФЧХ) разомкнутой САР, если:

* Начальная частота – 0.001 Гц;
* Конечная частота – 1000 Гц;
* Число точек вывода – 600 (равномерно в логарифмическом масштабе);
* Относительное приращение для Якобиана – 0.001 (установлено по умолчанию);
* Абсолютное приращение для Якобиана – 10-6 (установлено по умолчанию)

Аналогично рисунку 1.10 задайте свойства блока и для ФЧХ.

Далее, нажав кнопку ***Инициализация***, выполните расчет годографов ЛАХ и ФЧХ для “классической” и обоих вариантов одногрупповой модели кинетики нейтронов. Скорректируйте параметры линий годографов и осей координат, придав графику вид, близкий рис. 1.11 и 1.12.

|  |  |
| --- | --- |
|  |  |
| Рисунок 1.11 — графики ЛАХ | Рисунок 1.12 — графики ФЧХ |

Данные рис. 1.11- 1.12 подтверждают ранее отмеченное совпадение частотных свойств для всех 3-х вариантов математической модели кинетики нейтронов при высоких частотах и, наоборот, заметное количественное расхождение в ЛАХ и ФЧХ при низких частотах.

Выделите блок ***Годограф Найквиста*** мышкой и сделайте щелчок левой кнопкой мыши. В открывшемся меню выберите пункт ***Свойства объекта***, щелкнув по ней *левой* клавишей "мыши" (*аналогично как указано на* рис. 1.2). Откроется диалоговое окно ***Свойства*** блока ***Построение частотных характеристик***. Введите значения такие же, как на рис. 1.10.

Далее выполните расчет годографов Найквиста для “классической” и обоих вариантов одногрупповой модели кинетики нейтронов. Скорректируйте параметры линий годографов и осей координат, придав графику вид, близкий рис. 1.13.

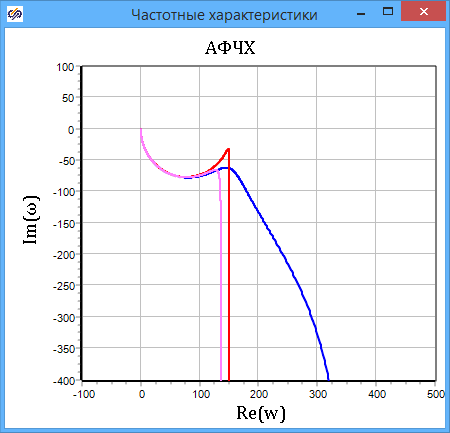


Рисунок 1.13 — Годограф Найквиста

На рис. 1.13 синей синей линией двойной толщины показан годограф для “классической” модели кинетики нейтронов, красной линией – для одногрупповой модели с *эффективной* постоянной распада **Lam**, рассчитанной по соотношению (1.6), а фиолетовой линией – для одногрупповой модели с *эффективной* постоянной распада **Lam\_1**, рассчитанной по соотношению (1.7). Анализ данных рис. 1.13 показывает, что в области высоких частот все 3 годографа почти совпадают, а в области низких частот – заметно количественное расхождение…

**Примечание**. Типы линий на рис. 1.11-1.12 соответствуют типу линий на рис. 1.13.

По результатам проведенного исследования необходимо сделать выводы:

**Вывод 1**. Одногрупповая модель кинетики нейтронов “голого” ядерного реактора (без регулятора или отрицательных эффектов реактивности) при любом способе вычисления *эффективной* постоянной распада не может обеспечить корректное *количественное* описание переходных процессов.

**Вывод 2**. По частотным свойствам из двух вариантов одногрупповой модели к “классической” модели кинетики нейтронов существенно ближе вариант с *эффективной* постоянной распада, рассчитанной по соотношению (1.6).

**Резюме**. Если моделируется динамика САР ЯР при *управляющем* воздействии, то предпочтительнее использовать вариант с *эффективной* постоянной распада, полученной по соотношению (1.6), а если моделируется динамика САР ЯР при значительном *возмущающем* воздействии по реактивности, то предпочтительнее использовать вариант с *эффективной* постоянной распада, рассчитанной по соотношению (1.7).

## 1.3 Роль остаточного энерговыделения в динамике ядерного реактора

Если ядерный реактор работает в окрестности номинального режима, то для расчета его мощности (нейтронной и тепловой) можно использовать только уравнения кинетики нейтронов (1.2), так как в этом случае значения относительной нейтронной мощности (нормированной на номинальную нейтронную мощность) и относительной тепловой мощности (нормированной на номинальную тепловую мощность) приблизительно равны:

|  |  |
| --- | --- |
| и | (1.8) |

Если нейтронная мощность реактора резко изменилась, то при расчете тепловой мощности обязательно нужно учитывать вклад остаточного энерговыделения.

Выполним количественную оценку справедливости вышеуказанного прямым моделированием следующей возможной аварийной ситуации: свободное падение одного из стержней аварийной защиты, имеющего физический вес, равный 1.0⋅βэфф.

На момент аварийной ситуации ядерный реактор имел кампанию 3000 часов, причем первые 1000 часов реактор работал на 10-ти процентном уровне мощности, затем 1000 часов – на 50-ти процентном уровне мощности и, наконец, последние 1000 часов – на номинальном уровне мощности.

Сформируйте структурную схему, вид которой должен быть близок рис. 1.14.

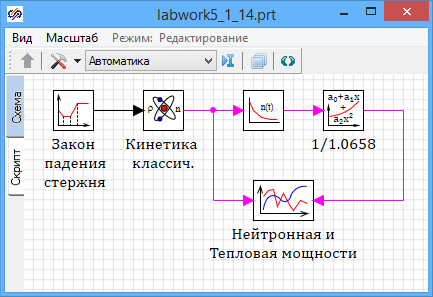


Рисунок 1.14 — Структурная схема

Закон падения стержня аварийной защиты: 10 с стержень находится в над активной зоной, затем за 1 с стержень падает в активную зону, при этом в реактор по линейному закону от времени вносится отрицательная реактивность (1.0⋅βэфф).

Типовой блок ***Параболическая функция*** на рис. 1.14 выполняет нормировку тепловой мощности реактора, а подпись блока **1/1.0658** “сообщает”, что на момент аварийной ситуации дополнительный вклад в тепловую мощность остаточного энерговыделения составляет 6.58 %. После установки параметров всех блоков в структурной схеме, проверьте величину вклада. Для этого нужно инициализировать структурную схему и затем использовать “горячую линию”.

Для описания нейтронной кинетики используется блок с “классической” моделью, причем в диалоговой строке *Нормировка* необходимо установить **1**, а значения остальных диалоговых строк – по умолчанию. На рис. 1.15 представлена копия диалогового окна блока *Остаточное энерговыделение*, которая не требует комментариев.

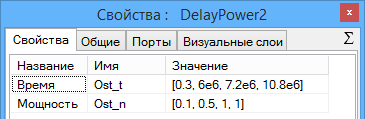


Рисунок 1.15 — Диалоговое окно блока Остаточное энерговыделение (по ANSI)

Установите в диалоговом окне **Параметры расчета** следующие параметры: *Время интегрирования* – **200**; *Минимальный шаг интегрирования*– **1е-12**; *Максимальный шаг интегрирования* – **0.1**; *Шаг синхронизации задачи* – **0.1**. Другие параметры – по умолчанию.

Выполните расчет, скорректируйте параметры линий и осей координат, придав графику вид, близкий рис. 1.16.

На рис. 1.16 сплошной красной линией двойной толщины представлено поведение относительной тепловой мощности, а синей – поведение относительной нейтронной мощности. Данные рис. 1.14 показывают, что примерно к 170 секунде относительная нейтронная мощность достигла уровня 1-го процента от номинала, в то время как относительная тепловая мощность – более 3 %.

|  |  |
| --- | --- |
|  |  |
| Рисунок 1.16 — Графики относительной тепловой и относительной нейтронной мощности | Рисунок 1.17 — Графики относительной тепловой и относительной нейтронной мощности |

Возвратите линейный масштаб по оси ординат и установите параметры осей координат такими, как это выполнено на рис. 1.17. Данные рис. 1.17 показывают, что при снижении нейтронной мощности до уровня примерно в 70 % от номинала графики относительной нейтронной и относительной тепловой мощностей практически совпадают, а при дальнейшем снижении мощности – расхождение заметно.

**Резюме:** При резком снижении нейтронной мощности ядерного реактора вклад остаточного энерговыделения в тепловую мощность необходимо учитывать.

# 2 СТРУКТУРНАЯ СХЕМА И МАТЕМАТИЧЕСКИЕ МОДЕЛИ ДИНАМИКИ ЭЛЕМЕНТОВ САР ЯДЕРНОГО РЕАКТОРА

## 2.1 Описание структурной схемы ядерного реактора

Лабораторная работа № 5 – первая часть Вашего задания, остальные части задания Вам предстоит выполнить в последующих лабораторных работах.

В рамках настоящей лабораторной работы рассмотрим упрощенную САР ядерного реактора (ЯР), структурная схема которой (экранная копия Главного Схемного Окна) представлена на рис. 2.1 и соответствует нелинейной САР релейного типа.

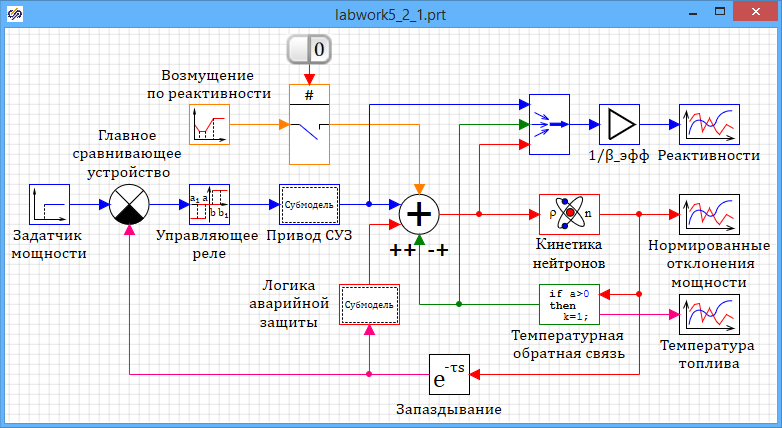


Рисунок 2.1 — Упрощенная САР ядерного реактора

Большинство блоков в структурной схеме, представленной на рис. 2.1, – типовые блоки из Общетехнической библиотеки. Блок *Кинетика нейтронов* – из *Специализированной* библиотеки ***Кинетика***, блоки *Привод СУЗ* и *Логика аварийной защиты* – субмодели 1-го уровня вложенности.

В отличие от лабораторных работ прошлого семестра и домашнего задания по курсу “Управление в технических системах”, где сигнал рассогласования подавался непосредственно на *Электродвигатель Привода СУЗ*, в данной САР ЯР сигнал рассогласования подается на *Управляющее реле* (типа релейное неоднозначное с зоной нечувствительности), которое при превышении уставок выдает сигнал управления на перемещение регулирующего стержня с постоянной скоростью вверх или вниз. Такое релейное управление существенно снижает износ исполнительного механизма СУЗ по сравнению со схемой непрерывного слежения за мощностью ЯР.

Блок *Температурная обратная связь* – оригинальный типовой динамический блок из библиотеки ***Динамические***(блок *“****Язык программирования****”*), позволяющий записать динамические уравнения и другие выражения с использованием встроенного в среде SimInTech Интерпретатора математических функций.

Реактивности регулирующего стержня, температурного эффекта и непосредственно ЯР, “сжимаются” посредством мультиплексора в векторный (3-х жильный) сигнал, затем векторно нормируются на эффективную долю запаздывающих нейтронов и отображаются на соответствующем ***Временном графике***.

В цепь Главной обратной связи включен блок ***Запаздывание*** (типовой блок ***Идеальное транспортное запаздывание***), который моделирует временную задержку, связанную с обработкой показаний детекторов нейтронного потока.

В рамках проведения лабораторных работ и домашнего задания в прошлом семестре *внешнее возмущающее* воздействие по реактивности было *только* ступенчатым (т.е. мгновенный скачок реактивности). В данной лабораторной работе ввод возмущений по реактивности – *линейный* (с разной скоростью) с *ограничением*, что реализуют соответствующие блок и ***Ключ*** *выкл./вкл.* в верхней части схемы на рис. 2.1.

***Главное сравнивающее устройство*** работает в режиме вычитания. Назначение остальных блоков на рис. 2.1 – очевидно и дополнительно “расшифровывается” пиктограммами и соответствующими подписями.

На рис. 2.2 представлено “содержание” субмодели ***Привод СУЗ***, где блок ***Перемещение регулирующего стержня***моделирует перемещение регулирующего стержня, блок ***Концевики*** (типовой блок ***Ключ интегратора*** из библиотеки ***Ключи***) моделирует достижение верхнего или нижнего концевых выключателей, а блок ***Характеристика регулирующего стержня*** “переводит” координату нижнего конца стержня в реактивность, которую стержень внес в реактор. *Входной порт* и *Выходной порт* обеспечивают обмен данными с другими блоками в системе (см. рис. 2.1).

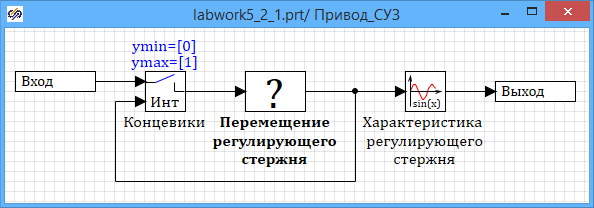


Рисунок 2.2 — Структурная схема субмодели *Привод СУЗ*

В настоящей лабораторной работе субмодель ***Логика аварийной защиты*** имеет только *Входной* и *Выходной порты* (соединенные между собой). Данная *Субмодель* “отключена” посредством задания в Главном Схемном Окне в блоке ***Сумматор***нулевого весового коэффициента по соответствующему входу (см. рис. 2.1). Набор структурной схемы *Логики аварийной защиты* будет выполнен в последней (№ 7) лабораторной работе, где данная ***Субмодель*** будет “отслеживать” нейтронную мощность, период разгона ядерного реактора и температуру теплоносителя на выходе из активной зоны с выдачей логического сигнала на сброс всех стержней аварийной защиты (режим АЗ-5) при превышении заданных уставок.

## 2.2 Описание математических моделей блоков САР реактора

В структурной схеме САР на рис. 2.1 математические модели всех типовых блоков соответствуют их описанию в справочной системе среды SimInTech (при *инициализированном* блоке вызов справки осуществляется нажатием клавиши **F1**).

Поскольку динамика САР будет анализироваться, в основном, в нормированных отклонениях, для описания нейтронной кинетики целесообразнее использовать “классическую” модель точечной кинетики с 6-ю группами запаздывающих нейтронов. Принято допущение, что при t≤ 0 реактор находится в стационарном состоянии, поэтому при t = 0 на выходе блока ***Точечная нейтронов*** .

Блок ***Главное сравнивающее устройство*** реализует обычное вычитание, а 2-й блок ***Сумматор*** – *алгебраическое сложение* входных сигналов.

Высота “ступеньки” в блоке ***Управляющее реле*** (релейное неоднозначное с зоной нечувствительности) равна **1.0**, а значения остальных свойств будут заданы преподавателем.

Динамика Температурной обратной связи описывается следующими уравнениями:

|  |  |
| --- | --- |
|  | (2.1) |

где N(t) – мощность реактора (абсолютная);

T(t) – температура топлива;

Tw – температура теплоносителя (в данной работе считается постоянной);

T0 – температура топлива в стационаре;

К – коэффициент, пропорциональный теплообмену между ядерным топливом и теплоносителем;

c, γ, V – удельная теплоемкость, плотность и объем топлива, соответственно;

Описание моделей других блоков в Главном Схемном Окне наглядно иллюстрируется пиктограммами и не требует дополнительных пояснений.

Блок ***Перемещение регулирующего стержня*** (см. рис. 2.2) описывается следующим динамическим уравнением:

|  |  |
| --- | --- |
|  | (2.2) |

где *x(t)* = *z(t) / HАЗ* – относительное положение нижнего конца регулирующего стержня

*(x*=0 – стержень полностью погружен в активную зону, *x* = 1 – стержень полностью выведен из активной зоны);

kпр, τпр – относительная скорость перемещения регулирующего стержня и постоянная времени, соответственно.

При *t* = 0 регулирующий стержень неподвижен и погружен в активную зону *наполовину*, т.е. *x (0)* = 0,5.

Блок *Характеристика регулирующего стержня* (см. рис. 2.2) описывается следующей *безинерционной* нелинейной зависимостью:

|  |  |
| --- | --- |
|  | (2.3) |

## 2.3 Задание параметров САР через механизм глобальных констант и переменных

Некоторые параметры математических моделей динамики блоков на рис. 2.1 – 2.2 (включая и ряд параметров блока *Температурная обратная связь*) необходимо задать во вкладке **Скрипт.**

Наибольший эффект от использования механизма *глобальных констант и переменных* будет в тех случаях, когда один и тот же параметр (константа) используются в качестве свойства (вводимого в диалоговом окне) во многих блоках структурной схемы. В этом случае при изменении величины этого свойства можно скорректировать его значение *только* во вкладке **Скрипт***,* а некорректировать его значение во всех блоках, где он используется.

На рис. 2.3 представлена копия вкладки **Скрипт** с введенными значениями и комментариями к ним. По аналогии с рис. 2.3 введите свои исходные данные (см. табл. 1 в разделе 3).

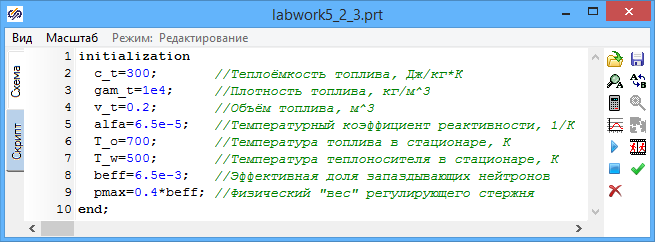


Рисунок 2.3 – Вкладка *Параметры* в субмодели для САР реактора

Откройте диалоговое окно блока ***Точечная кинетика*** и в 1-й диалоговой строке вместо числа **6.5е-3** введите **beff**. Закройте это диалоговое окно (кнопка **Да**). Откройте диалоговое окно блока с подписью *1/β\_эфф* (см. рис. 2.1) и введите в диалоговой строке вместо числа **1** выражение **1/beff**. Константу **pmax** Вам необходимо будет использовать при задании свойств блока *Характеристика регулирующего стержня*.

## 2.4 Формирование динамической модели блока *Температурная обратная связь* с использованием блока Язык програмирования

Учитывая, что невозможно сформировать абсолютно полную библиотеку типовых блоков, в среде SinInTech разработаны средства, которые позволяют Пользователю расширить состав *личной* библиотеки за счет создания *новых* типов блоков, например, посредством встроенного *Интерпретатора математических функций,* на базе которого функционирует и “***Язык программирования****”,* позволяющий прямо в процессе работы создавать экземпляры блоков со своими оригинальными математическими моделями.

Использование “***Язык программирования****” блока* в качестве функционального весьма *эффективно* в случае наличия в модели сложных функциональных преобразований, когда использование для этих целей *элементарных функциональных типовых блоков* приведет к неоправданному усложнению структурной схемы.  
 На рис. 2.4 представлена экранная копия окна **Языка программирования**, где в текстовом виде задана математическая модель динамики блока *Температурная обратная связь*.

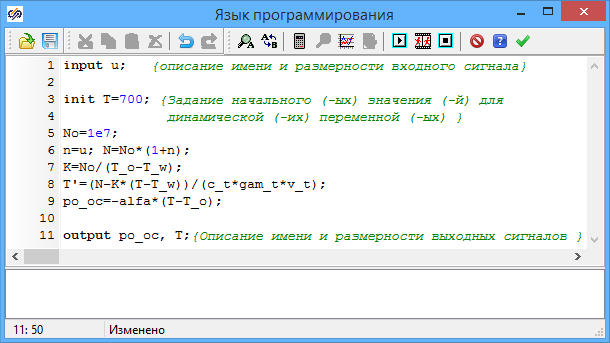


Рисунок 2.4– Динамическая модель блока *Температурная обратная связь* с использованием блока «Язык программирования»

Если блок *“****Язык программирования****”* имеет входы (входные порты), то первая *исполняемая* строка (не считая строку комментария) *обязательно* должна содержать оператор **input**, описывающий входные сигналы в данный блок, включая *имя* входа и его *размерность*.

В данном примере 1-я *исполняемая* строка (**input u;**) присваивает 1-му (и единственному) входу уникальное имя – **u**. Если бы, например, этот блок имел бы 2 входа, причем 1-ый вход – 3-х жильный (векторный), а 2-ой – 5-ти жильный, то 1-я исполняемая строка имела бы вид: **input u[3], g[5];** Для описания размерности входов используются *прямоугольные* скобки.

Если блок *“****Язык программирования****”* описывает динамику объекта моделирования в виде системы дифференциальных уравнений в форме Коши, то вторая *исполняемая* строка (не считая строку комментария) *обязательно* должна содержать оператор **init**, описывающий *начальные условия* для *динамических* переменных, ниже по тексту для которых будут записаны *обыкновенные дифференциальные уравнения в форме Коши.*

В данном примере 2-я *исполняемая* строка (**init T=700;**) задает *начальное значение* для единственной динамической переменной (температура топлива в стационаре).

В том случае, когда математическая модель динамики блока описывается *несколькими* дифференциальными уравнениями, например, 3-мя, то 2-я исполняемая строка будет иметь вид**: init x1=0,x2=1,x3=2**, где х1, х2, х3 – динамические переменные, для которых ниже по тексту будут записаны соответствующие дифференциальные уравнения (точнее система уравнений) в форме Коши.

Дифференциальное уравнение для температуры топлива (**Т**) записано в 6-й *исполняемой* строке, где символ апострофа обозначает производную по времени, а теплофизические свойства топлива и температура теплоносителя в стационаре передаются в *блок* ***Язык программирования***посредством механизма *глобальных констант и переменных*.

Предпоследняя *исполняемая* строка описывает эффект реактивности по температуре топлива (2-е соотношение в системе (2.1)).

Если блок ***Язык программирования***имеет выходы (выходные порты), то последняя *исполняемая* строка *обязательно* должна содержать оператор **output,** описывающий выходные сигналы из блока ***Язык программирования***, включая *имена* выходов и их *размерности*.

В этом примере последняя строка (**output po\_oc,T;**) описывает 2 выходных сигнала (**po\_oc** и **T**) *без указания* в прямоугольных скобках размерностей выходных сигналов.

Введя весь текст, закройте ***Язык программирования***: блок ***Язык программирования***в Главном Схемном окне будет иметь 1 вход и 2выхода. Используя процедуры изменения ориентации блока, сделайте его ориентацию “справа-налево”. Первый выходной порт (**ро\_ос**) будет *нижним* слева, а второй выходной порт (**Т**) – *верхним* слева.

Завершите оформление структурной схемы в Главном Схемном Окне, соединив *все* блоки линиями связи. Структурная схема САР должна принять вид, подобный рис. 2.1.

# 3 САМОСТОЯТЕЛЬНОЕ ИССЕДОВАНИЕ НЕЛИНЕЙНОЙ САР ЯДЕРНОГО РЕАКТОРА С РЕЛЕЙНЫМ РЕГУЛЯТОРОМ

## 3.1 Исходные данные по параметрам элементов САР

В таблице 1 приведены исходные данные по параметрам элементов САР ЯР, которую Вам предстоит исследовать. Как видно из таблицы 1, параметры САР *Вашего* варианта не совпадают с данными, которые приведены выше в разделе 2 настоящих указаний

Таблица 1 – Исходные данные по параметрам элементов САР

|  |  |  |  |  |  |
| --- | --- | --- | --- | --- | --- |
| № | Элемент САР | Параметры элементов САР | Номер варианта | | |
| 1 | 2 | 3 |
| 1 | Задатчик мощности | Время, с | 10 | 10 | 10 |
| Y0 | 0 | 0 | 0 |
| Y1 | 0,1 | 0,1 | 0,1 |
| 2 | Привод СУЗ | ρст\*/ βэфф | 0,6 | 0,6 | 0,6 |
| τпр,с | 0,2 | 0,25 | 0,25 |
| Тхода, с | 5…50 | 5…50 | 5…50 |
| 3 | Управляющее реле | B | 0,02…0,005 | 0,02…0,005 | 0,02…0,005 |
| M | 0,4 | 0,6 | 0,8 |
| 4 | Ядерный реактор | Vтопл, м3 | 0,1 | 0,2 | 0,4 |
| γтопл, кг/м3 | 10000 | 9000 | 8000 |
| Стопл, Дж/кг⋅К | 300 | 350 | 400 |
| l⋅103, c | 1 | 0,1 | 0,05 |
| βэфф⋅103 | 6 | 6,5 | 7 |
| N₀, МВт | 10 | 20 | 50 |
| 5 | Температурная обратная связь | T₀, K | 700 | 750 | 800 |
| Tw, K | 500 | 550 | 550 |
| α⋅104, 1/К | 0,7…1,5 | 0,7…1,5 | 0,7…1,5 |
| 6 | Возмущающее воздействие | Δtвозм | 2 …20 | 2…20 | 2…20 |
| Δρвозм/ βэфф | 0,1…0,3 | 0,1…0,3 | 0,1…0,3 |
| 7 | Запаздывание по каналу измерения | τзап, с | 0,2…1 | 0,2…1 | 0,2…1 |

Большая часть свойств блоков в структурной схеме САР не требует особых пояснений и комментариев. Ряд параметров в табл. 1 необходимо прокомментировать.

В субмодели ***Привод СУЗ*** свойством *Тхода* обозначено время перемещения регулирующего стержня СУЗ по *всей* длине (высоте) активной зоны (сверху-вниз или наоборот). С помощью этого свойства Вы определите коэффициент скоростной эффективности привода. На рис. 2.2 передаточная функция блока ***Перемещение регулирующего стержня***неизвестна: ее требуется определить на основании уравнений динамики…

В блоке ***Возмущающее по реактивности*** параметр *tвозм* задает время, за которое величина возмущающего воздействия *линейно* изменяется от *нуля* до *возм* .

Данные в табл. 1 типа **5…50** подразумевают, что Вы должны выполнить какое-то исследование при варьировании соответствующего параметра в указанном диапазоне (обычно еще 2…3 дополнительные точки внутри указанного диапазона).

## 3.2 Порядок выполнения лабораторной работы

1. Используя Линейку типовых блоков, процедуры редактирования и сервисные процедуры, заполните Главное и субмодельное схемные окна необходимыми блоками и придайте структурным схемам вид, близкий рис. 2.1 и 2.2.
2. Используя вкладку **Скрипт** и окна свойств блоков задайте их значения в Главном и в субмодельном схемных окнах.
3. Используя блок "Язык программирования", сформируйте (введите) математическую модель блока *Температурная обратная связь*.
4. "Предъявите" набранную модель САР преподавателю для проверки правильности выполненного Вами.
5. При исходных значениях параметров структурной схемы (α = 7·10-5 1/К, τзап = 0.2 с, Тхода = 20 с, b = 0.02) выполните моделирование (время моделирования до 100 с) процесса перевода реактора на повышенный (+10%) и пониженный (-10%) уровни мощности при варьировании скоростной эффективности привода (т.е. при варьировании Тхода). Зарисуйте качественный вид графиков переходного процесса. "Предъявите" их преподавателю с Вашими поясняющими выводами.
6. Восстановите параметры структурной схемы в исходное состояние (α = 7·10-5 1/К, τ зап= 0.2 с, Тхода = 20 с, b = 0.02) и выполните моделирование (время моделирования до 100 с) процесса перевода реактора на повышенный  
   (+10%) и пониженный (-10%) уровни мощности при варьировании инерционности канала измерения (т.е. при варьировании tзап). Зарисуйте качественный вид графиков переходного процесса. "Предъявите" их преподавателю с Вашими поясняющими выводами.
7. Восстановите параметры структурной схемы в исходное состояние (α = 7·10-5 1/К, τ зап = 0.2 с, Тхода = 20 с, b = 0.02) и выполните моделирование (время моделирования до 100 с) процесса перевода реактора на повышенный  
   (+10%) уровень мощности при варьировании коэффициента температурной обратной связи (т.е. при варьировании α). Зарисуйте качественный вид графиков переходного процесса. "Предъявите" их преподавателю с Вашими поясняющими выводами.
8. Восстановите параметры структурной схемы в исходное состояние (α = 7·10-5 1/К, τзап = 0.2 с, Тхода = 20 с, b = 0.02) и выполните моделирование (время моделирования до 100 с) процесса перевода реактора на повышенный  
   (+10%) уровень мощности при варьировании ширины зоны нечувствительности в управляющем реле (т.е. при варьировании b). Зарисуйте качественный вид графиков переходного процесса. "Предъявите" их преподавателю с Вашими поясняющими выводами.
9. Восстановите параметры структурной схемы в исходное состояние (α = 7·10-5 1/К, τ зап = 0.2 с, Тхода = 20 с, b = 0.02) и выполните моделирование (время моделирования до 20 с) переходного процесса при подаче возмущающего воздействия Δρвозм= 0.1∙βэфф и варьировании скорости ввода возмущения по реактивности (т.е. при варьировании Δtвозм). Зарисуйте качественный вид графиков переходного процесса. "Предъявите" их преподавателю с Вашими поясняющими выводами.
10. Восстановите параметры структурной схемы в исходное состояние (α = 7·10-5 1/К, τзап = 0.2 с, Тхода = 20 с, b = 0.02) и выполните моделирование (время моделирования до 20 с) переходного процесса при подаче возмущающего воздействия за Δtвозм = 5 с и варьировании величины возмущения по реактивности (т.е. при варьировании Δρвозм). Зарисуйте качественный вид графиков переходного процесса. "Предъявите" их преподавателю с Вашими поясняющими выводами…