**ДИСЦИПЛИНА: УПРАВЛЕНИЕ В ТЕХНИЧЕСКИХ СИСТЕМАХ**

*Козлов Олег Степанович,*

*Щекатуров Александр Михайлович*

**ЛАБОРАТОРНАЯ РАБОТА № 5**

**МАТЕМАТИЧЕСКОЕ МОДЕЛИРОВАНИЕ**

**НЕЛИНЕЙНОЙ САР ЯДЕРНОГО РЕАКТОРА**

**Москва, 201****5**

**СОДЕРЖАНИЕ**

ВВЕДЕНИЕ 3

ЦЕЛЬ РАБОТЫ 5

1 МАТЕМАТИЧЕСКИЕ МОДЕЛИ НЕЙТРОННОЙ КИНЕТИК 6

1.1 Описание блоков специализированной библиотеки Кинетики нейтронов 6

1.2 Определение полюсов, нулей и коэффициентов передаточных функций 12

1.3 Построение графиков частотных характеристик ряда типовых звеньев 15

2 АНАЛИЗ УСТОЙЧИВОСТИ И КОРРЕКЦИЯ САР ЯДЕРНОГО РЕАКТОРА ПО АМПЛИТУДНО-ФАЗОВЫМ ЧАСТОТНЫМ ХАРАКТЕРИСТИКАМ 17

# 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, каждый из них может быть рекомендован для использования в проектных разработках новых реакторных установок только аналогичного типа;

- во-вторых, ни один из этих ПК не пригоден для использования в учебном процессе высшей школы по причине отсутствия соответствующего методического наполнения.

К программным средствам интеллектуального САПР относится и программный комплекс “МВТУ”, 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.

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 реактором типа ВВЭР и РБМК.

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-методическое сопровождения позволяет использовать его в учебном процессе высшей школы по многим инженерным специальностям, включая и выбранную Вами.

В предыдущих лабораторных работах Вы освоили большинство методов работы в среде SimInTech. В настоящей лабораторной работе Вы освоите еще ряд новых методов работы в среде SimInTech, 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

* 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 КИНЕТИК

## 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 реактора (кампании).

Первые два блока позволяют описывать кинетику ядер-предшественников запаздывающих нейтронов от одно- 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):

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*-той группы;

λi - постоянная распада ядер-предшественников *i*-той группы;

βi - доля запаздывающих нейтронов *i*-той 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:

(1.1)

где:

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

- бсолютная (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  *i*. Например, если необходимо учесть вклад фотонейтронов, то, число групп может быть увеличено, например, до 8, и наоборот, можно задать и одногрупповую модель.

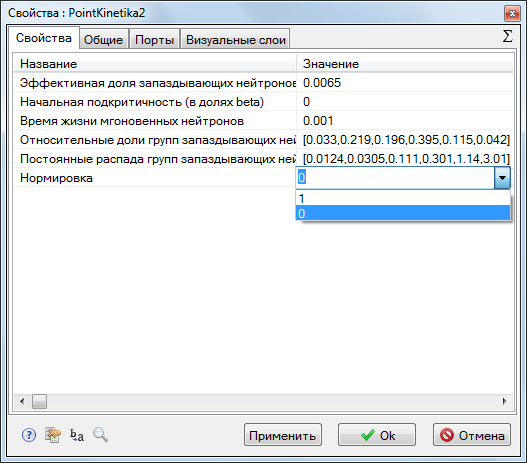


Рисунок 1.1 – Свойства блока ***Точечная Кинетика***

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:

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.

Методы и процедуры, обеспечивающие в среде SimInTech режим работы АНАЛИЗ, будут рассмотрены в процессе выполнения дополнительного задания к рассмотренной в лабораторной работе № 1 демонстрационно-ознакомительной задаче. Сформулируем задачи, которые необходимо решить в процессе анализа АФЧХ САР, структурная схема которой создана Вами в лабораторной работе № 1 и сохранена на жестком диске:

* исследовать на устойчивость исходную САР с использованием критерия Найквиста по годографу АФЧХ и по совместному рассмотрению ЛАХ – ФЧХ;
* исследовать на устойчивость скорректированную САР с использованием критерия Найквиста по годографу АФЧХ и по совместному рассмотрению ЛАХ - ФЧХ, определив запасы по фазе и амплитуде;

Поскольку структурная схема задачи (с исходными данными) была сохранена Вами на жестком диске, откройте эту задачу (проект), используя стандартные интерфейсные процедуры среды SimInTech. Необходимо заметить, что внешний вид структурной схемы в открывшемся проекте возможно отличается от того, который Вы сохраняли ранее.

**Этап 1** - *исследование устойчивости исходной САР*.

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. 1.1.

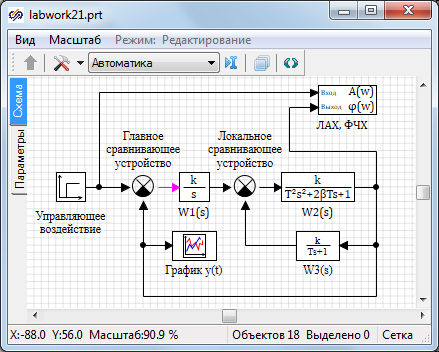


Рисунок 1.1 — Схемное окно проекта

Выполните оформление поясняющих подписей (щелчок *правой* клавишей "мыши" по блоку, далее опция ***Свойства*** и далее ...) и структурная схема САР примет вид, подобный рис. 1.1.

Проверьте, что параметры всех блоков в структурной схеме соответствуют исходным (в т.ч. коэффициент усиления в блоке ***Интегратор*** равен **1.0**). Выполните "контрольное" моделирование и убедитесь, что переходной процесс расходящийся.

Известно, что критерий Найквиста позволяет оценить устойчивость (или неустойчивость) замкнутой линейной САР (с единичной Главной обратной связью) по АФЧХ разомкнутой САР. Поэтому, откройте диалоговое окно блока ***Сравнивающее устройство*** (выполняющего роль ***Главного сравнивающего устройства***) и разомкните ***Главную обратную связь***, установив 2-й весовой коэффициент равным ***нулю***.

Выполните моделирование и убедитесь, что вид переходного процесса типичен для САР, находящихся на апериодической границе устойчивости (один нулевой полюс).

Выделите блок ЛАХ, ФЧХ мышкой и сделайте щелчок левой кнопкой мыши. Из выпавшей вкладки выберите пункт ***Свойства объекта****,* рис. 1.2*.*

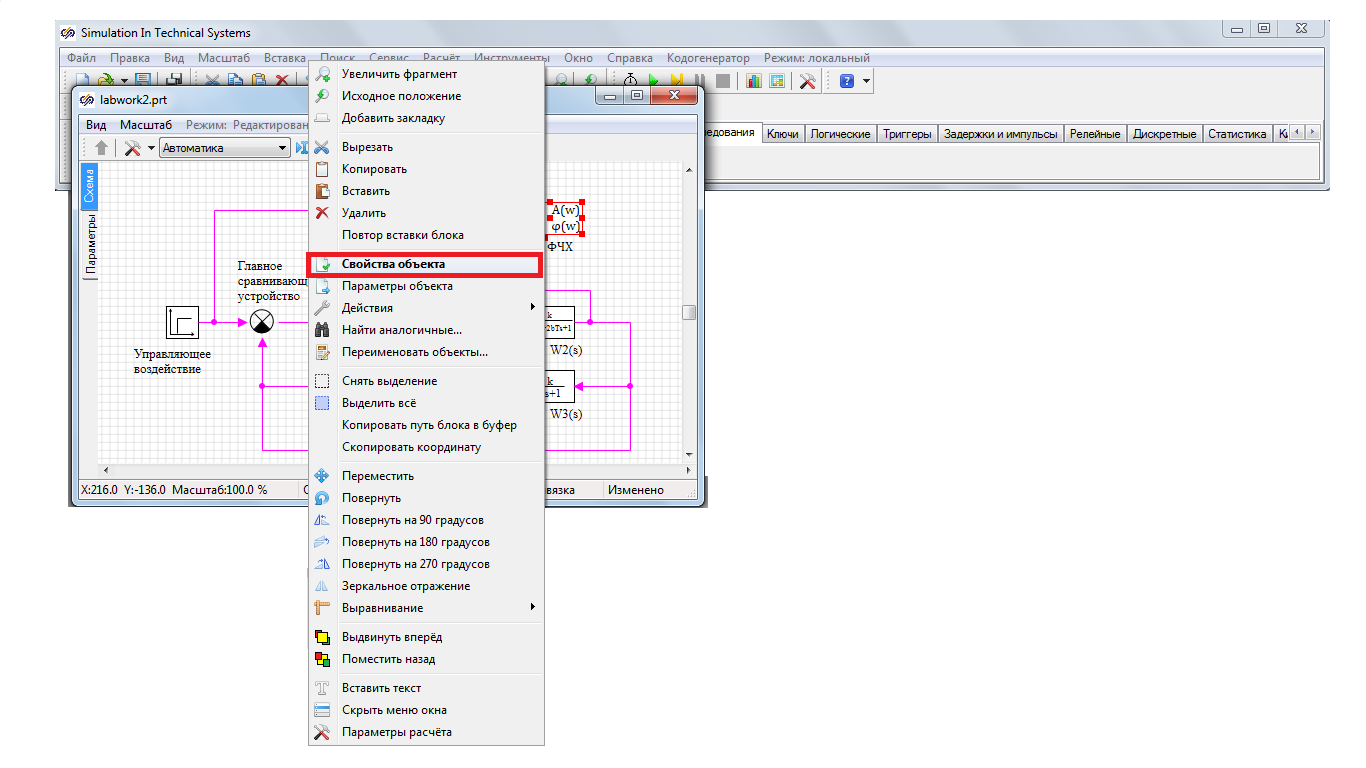


Рисунок 1.2 — Свойства объекта блока ***Построение частотных характеристик***

В открывшемся меню выберите опцию — ***Свойства объекта***, щелкнув по ней *левой* клавишей "мыши". Откроется диалоговое окно ***Свойства***блока ***Построение частотных характеристик***. Введите параметры такие же, как на рис. 1.3.

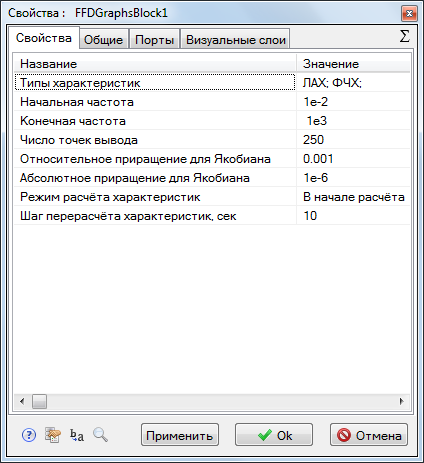


Рисунок 1.3 — Параметры блока ***Построение частотных характеристик***

В диалоговом окне ***Свойства*** параметрами ***Начальная частота*** и ***Конечная частота*** задаются границы частотного диапазона (в рад/с), а параметром ***Число точек вывода*** - количество расчетных точек, равномерно распределенных (в логарифмическом масштабе) внутри частотного диапазона.

Значения параметров полей ***Приращения для Якобиана*** используются в расчете АФЧХ при автоматической линеаризации САР, а в чисто линейных системах расчет частотных характеристик не использует данных по относительным и абсолютным приращениям для Якобиана. Начинающему Пользователю рекомендуется использовать эти параметры "по умолчанию". Значения "по умолчанию" полей ***Приращения для Якобиана*** установлены из личного практического опыта авторов среды SimInTech.

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

* Начальная частота – 0.01 Гц;
* Конечная частота – 1000 Гц;
* Число точек вывода – 250 (равномерно в логарифмическом масштабе);
* Относительное приращение для Якобиана – 0.001 (установлено по умолчанию);
* Абсолютное приращение для Якобиана – 10-6 (установлено по умолчанию).

Переместите курсор на кнопку ***Пуск*** сделайте щелчок *левой* клавишей "мыши": начнется расчет частотных характеристик

Переместите курсор на блок ***Построение частотных характеристик*** и выполните 2-х кратный щелчок *левой* клавишей "мыши": откроется ***Графическое окно*** с результатами расчета. Используя опции ***Графического окна*** (вызов "всплывающего" меню - однократным щелчком *правой* клавиши "мыши") установите следующие параметры оси ординат: *Min Y* - **-270**; *Max Y* - **+90**; Количество делений - **4**. Если Вы выполните дополнительное оформление ***Графического окна***, то получите вид, близкий к рис. 1.4.

Вид графиков на рис. 1.4 показывает, что фазовая характеристика пересекает линию **-180°** вроде бы немного раньше, чем характеристика пересекает линию **0 дБ**. Уточним то, что видим... Переместите курсор в поле ***Графического окна***, выполните щелчок *правой* клавишей "мыши" и выберите опцию ***Таблица*** (щелчок левой клавишей "мыши"): окно графиков заменится таблицей данных расчета. Прокруткой таблицы найдите строку, соответствующую = 1.0413 (см. рис. 1.5), и убедитесь, что > 0 (0.141233), а фазовый сдвиг < -180**°** (-184.6). Следовательно, при замыкании САР единичной обратной связью она будет неустойчивой, что и показал ранее (в Лаб. Раб. № 1) график переходного процесса при исходных параметрах САР.

|  |  |
| --- | --- |
|  |  |
| Рисунок 1.4 — графики ЛАХ, ФЧХ | Рисунок 1.5 — табличные значения ЛАХ, ФЧХ |

Верните предыдущий вид окна ***График - ЛАХ, ФЧХ*** (щелчок *правой* клавишей "мыши" в поле таблицы, затем щелчок *левой* клавишей "мыши" по опции ***График***). Закройте графическое окно с заголовком ***ЛАХ, ФЧХ*** (щелчок по системной кнопке в правом верхнем угле окна).

Для построения годографа *Найквиста* для нашей разомкнутой системы 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. 1.6.

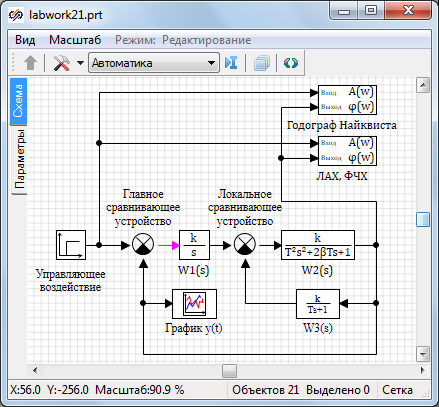


Рисунок 1.6 — блок ***годографа Найквиста***в Схемном окне проекта

Выделите блок ***годограф Найквиста*** мышкой и сделайте щелчок левой кнопкой мыши. В открывшемся меню выберите опцию — ***Свойства объекта***, щелкнув по ней *левой* клавишей "мыши" (*аналогично как указано на* рис. 1.2). Откроется диалоговое окно ***Свойства*** блока ***Построение частотных характеристик***. Введите параметры такие же, как на рис. 1.7.

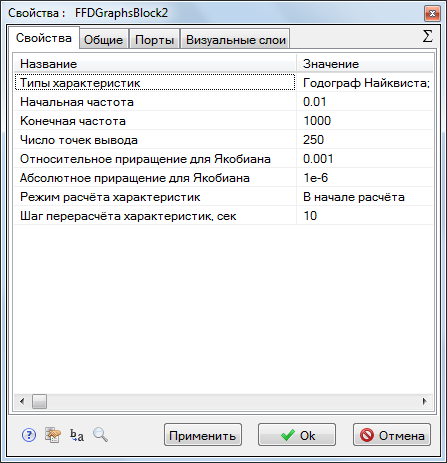


Рисунок 1.7 — параметры ***годографа Найквиста***

Выполните щелчок *левой* клавишей "мыши" по кнопкам ***Инициализация*** и ***Пуск***: начнется расчет годографа АФЧХ (называемого в среде SimInTech годографом Найквиста), а в ***Графическом окне*** - отображение результатов расчета.

Используя опцию *Свойства* командное меню *Графического окна*, приведите изображение графика годографа к такому же виду, как и на рис. 1.8.

Из критерия Найквиста известно, что САР, находящаяся на апериодической границе устойчивости в разомкнутом состоянии, станет устойчивой при ее замыкании единичной Главной обратной связью, если годограф АФЧХ не охватывает на комплексной плоскости "точку Найквиста" (-1, 0·i). Поэтому рассмотрим более "внимательно" поведение линии годографа в окрестности точки (-1, 0·*i*). Для этого, используя еще раз опцию *Свойства* командного меню *Графического окна*, приведите изображение графика годографа к такому же виду, как и на рис. 1.9.

|  |  |
| --- | --- |
|  |  |
| Рисунок 1.8 - годограф Найквиста | Рисунок 1.9 — годограф Найквиста |

Так как линия годографа разомкнутой САР на рис. 1.9 без сомнения охватывает точку (-1, 0·*i*), то резюме: исходная САР в замкнутом состоянии будет неустойчива.

***Этап 2*** *- исследование устойчивости скорректированной САР*.

Закройте графическое окно ***Годограф Найквиста***, щелкнув *левой* клавишей "мыши".

Измените коэффициент *k*1 в блоке *W\_1(s)* на **0.35**, что соответствует оптимальному значению (определенному в демонстрационно-ознакомительной задаче).

Переместите курсор на командную кнопку ***Пуск*** и сделайте щелчок "мышью": произойдет инициализация всех блоков структурной схемы. Далее можно и не считать переходной процесс, так как вся информация о структурной схеме получена и можно проводить расчет частотных характеристик. Переместите курсор на командную кнопку ***Стоп***и сделайте щелчок "мышью": расчет будет прерван, так и не начавшись.

Запустите расчет годографа Найквиста (таким же образом, как Вы выполнили это выше). Сделайте график годографа более "симпатичным", изменив параметры осей координат ***Графического окна*** (см. рис. 1.10).

Еще раз измените параметры осей координат ***Графического окна*** (см. рис. 1.11). Линия годографа разомкнутой САР на рис. 1.11 без сомнения не охватывает точку (-1, 0·*i*). Вывод: скорректированная САР в замкнутом состоянии будет устойчива.

|  |  |
| --- | --- |
|  |  |
| Рисунки 1.10 - годограф Найквиста | Рисунок 1.11 — годограф Найквиста |

Закройте графическое окно ***Критерий Найквиста*** и откройте графическое   
окно ***ЛАХ, ФЧХ.***

Переместите курсор на кнопку ***Пуск*** и сделайте щелчок левой клавишей "мыши": начнется расчет частотных характеристик и отображение результатов в специальном *графическом окне*, причем снова автоматически изменятся заголовок графика и подписи под осями координат (рис. 1.12).

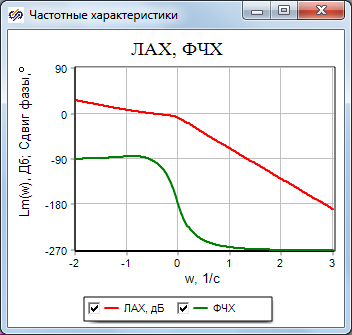


Рисунок 1.12 — ЛАХ, ФЧХ

Из критерия Найквиста известно, что САР, находящаяся на апериодической границе устойчивости в разомкнутом состоянии, станет устойчивой при ее замыкании единичной Главной обратной связью, если график ЛАХ пересекает линию **0 дБ** раньше, чем график ФЧХ линию **- 180°**. Анализ графиков и показывает, что при замыкании единичной обратной связью САР станет устойчивой.

Используя опции ***Графического окна*** переведите его в режим ***Таблица*** и определите запасы по фазе (в градусах) и амплитуде (в дБ). Эти запасы должны составлять ~ 86**°** и ~ 8.2 дБ, соответственно (см. рис. 1.13 и рис. 1.14). Запас по фазе достаточен, однако крайне малый запас по амплитуде (должно быть ~ 30...40 дБ) обосновывает "не очень хорошее" качество переходного процесса в демонстрационно-ознакомительной задаче при k1 = 0.35.

|  |  |
| --- | --- |
|  |  |
| Рисунок 1.13 — значения ЛАХ, ФЧХ | Рисунок 1.14 — значения ЛАХ, ФЧХ |

Закройте графическое окно с заголовком ***ЛАХ, ФЧХ*** (однократный щелчок по системной кнопке в правом верхнем угле окна).

## 1.2 Определение полюсов, нулей и коэффициентов передаточных функций

Верните исходное значение скоростной эффективности интегрирующего регулятора (*k1* = **1**). Разомкните ***Главную обратную связь***(2-ой весовой коэффициент в ***Главном сравнивающем устройстве*** должен быть равен нулю). Выполните щелчок "мышью" по кнопкам **Инициализация** и **Пуск** (структурная схема разомкнутой САР инициализировалась) и затем по кнопке **Стоп** (моделирование прервано, так и не начавшись).

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 передаточных функций***и проведите к ним линии связи, как это показано на рис. 1.15.

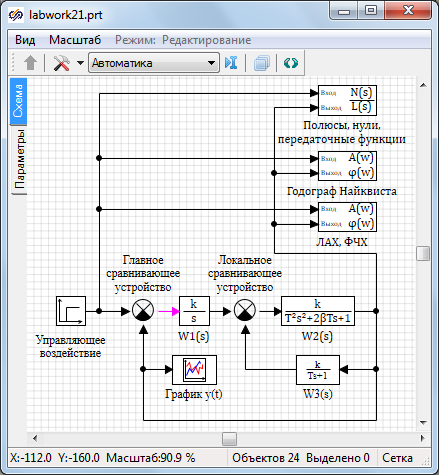


Рисунок 1.15 — Блок *Построение передаточных функций*

Параметры диалоговых строк Относительное приращение для расчета Якобиана и Абсолютное приращение для расчета Якобиана можно оставить без изменений, так как в чисто линейных САР расчет параметров передаточных функций не использует данных по приращениям Якобиана. Использование данных по приращениям Якобиана имеет место в расчете параметров линеаризуемых САР (среда SimInTech автоматически выполняет линеаризацию в окрестности базовой точки). Значения "по умолчанию" данных по приращениям Якобиана выбраны из личного опыта авторов среды SimInTech. Начинающему Пользователю рекомендуется использовать параметры "по умолчанию", как показано на рисунке 1.16.

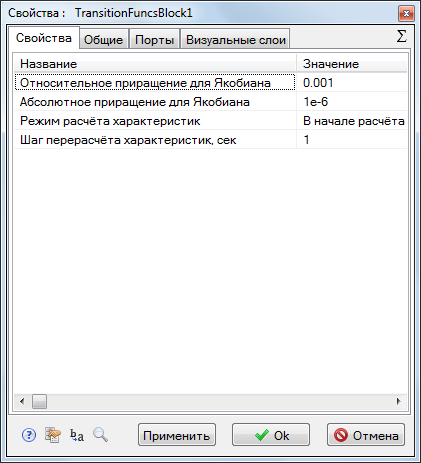
**

Рисунок 1.16 — Свойства блока ***Построение передаточных функций***

Переместите курсор на кнопку **Пуск** и выполните щелчок "мышью": практически мгновенно появится информационное окно с результатами расчета параметров передаточных функций. В окне приведены результаты расчета коэффициентов Знаменателя и Числителей по возрастающим степеням **s**, полюсы и нули передаточных функций САР (см. рис. 1.17).

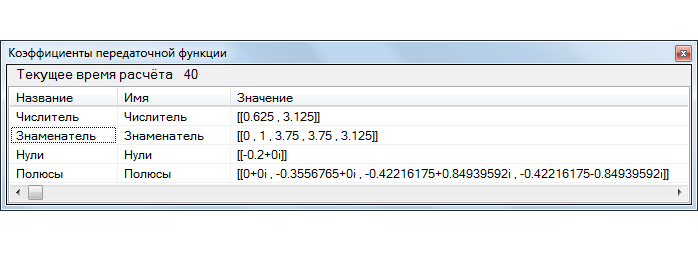


Рисунок 1.17 — Результаты расчета параметров передаточной функции   
для разомкнутой САР со значением скоростной эффективности интегрирующего регулятора равным **1.0**

Учитывая, что эквивалентная передаточная функция рассматриваемой разомкнутой САР определяется не очень громоздким соотношением:

Прямой подстановкой исходных передаточных функций в это соотношение легко убедиться в правильности расчета среды SimInTech коэффициентов эквивалентной передаточной функции (выполните "ручной" расчет и сравните...).

Результаты расчета полюсов показывают, что исходная САР в разомкнутом состоянии находится на апериодической границе устойчивости, так как три полюса расположены в левой полуплоскости, а один - в начале координат.

Закройте блок ***Построение передаточных функций***.

Замкните Главную обратную связь. Выполните щелчок "мышью" по кнопке **Инициализировать** (структурная схема замкнутой САР инициализировалась).

Выполните щелчок по кнопке **Пуск**. Откройте блок ***Построение передаточных функций*** с результатами расчета параметров передаточной функции исходной САР в замкнутом состоянии. В верхней части информационного окна приведены результаты расчета коэффициентов Знаменателя и Числителей по возрастающим степеням **s**, а в нижней части - полюсы и нули передаточных функций САР (см. рис. 1.18).

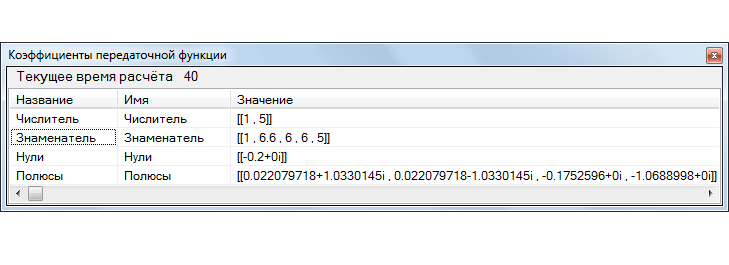


Рисунок 1.18 — Результаты расчета параметров передаточной   
функции для замкнутой САР со значением скоростной эффективности   
интегрирующего регулятора равным **1.0**

В правильности расчета коэффициентов числителя и знаменателя передаточной функции замкнутой САР Вы можете убедиться, выполнив "ручной" расчет.

Анализ нижней таблицы в информационном окне еще раз подтверждает вывод об отсутствии устойчивости исходной САР в замкнутом состоянии: два действительных полюса расположены в левой полуплоскости, а два комплексно-сопряженных полюса - в правой полуплоскости.

Закройте блок ***Построение передаточных функций*.**

Измените значение коэффициента k1 на **0.35**, при котором замкнутая САР несомненно должна быть устойчивой.

Выполните щелчок "мышью" по кнопке ***Инициализация*** (структурная схема замкнутой САР инициализировалась).

Выполните щелчок "мышью" по кнопке ***Старт***. Щелчком мыши по блоку ***Построение передаточных функций*** откройте окно с результатами расчета для скорректированной САР (см. рис. 1.19).

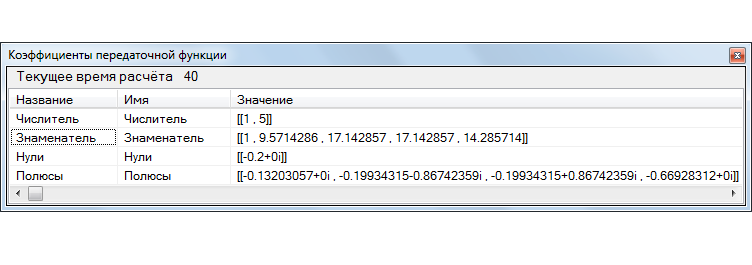
**

Рисунок 1.19 — Результаты расчета параметров передаточной функции для   
замкнутой САР со значением скоростной эффективности интегрирующего   
регулятора равным **0.35**

Анализ нижней таблицы в окне блока ***Построение передаточных функций*** (см. рис. 1.19) еще раз подтверждает вывод об устойчивости скорректированной САР в замкнутом состоянии: все четыре полюса расположены в левой полуплоскости (два отрицательных вещественных и два комплексно-сопряженных с отрицательной вещественной частью).

Закройте блок ***Построение передаточных функций***.

Сохраните структурную схему на жесткий диск под "оригинальным" именем, так она Вам еще потребуется при выполнении лабораторной работы № 3.

## 1.3 Построение графиков частотных характеристик ряда типовых звеньев

Перед выполнением самостоятельного исследования частотных характеристик САР ядерного реактора (загляните в следующий раздел...) в качестве "легкой разминки" необходимо построить графики основных частотных характеристик для некоторых типовых звеньев и сравнить построенное с аналогичными графиками в лекциях по курсу "Управление в технических системах"...

Используя освоенные процедуры работы с блоками Общетехнической библиотеки ***Исследования***, постройте для каждого из перечисленных ниже звеньев следующие частотные характеристики:

* графики годографов АФЧХ (годографов Найквиста);
* графики (ЛАХ);
* графики ФЧХ.

Рекомендуется задавать **600** расчетных точек, равномерно расположенных в логарифмическом масштабе в следующем диапазоне частот: от **10 - 3** до **10 3** Гц.

Список типовых звеньев, для которых необходимо построить вышеуказанные частотные характеристики:

* + 1. Апериодическое звено 1-го порядка: K1=10; T1=1 c; K2=10; T2=10 c.
    2. Колебательное звено: K1=10; T1=1 c; β1=0.8; K2=10; T2=1 c; β2=0.2 c.
    3. Инерционно-дифференцирующее звено: τ1=10 c; T1=1 c; τ2=10c; T2=10 c.

 Рекомендуется строить требуемые частотные характеристики сразу для двух звеньев одного типа, что позволит выявить влияние варьируемого параметра (*T* или *ß*) на соответствующие графики (см. рис. 1.20).

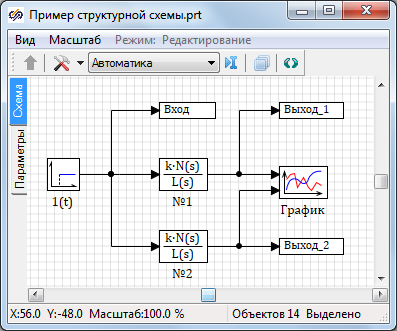
,

Рисунок 1.20 — Пример структурной схемы

**Внимание**: параллельно с исследованием АФЧХ вышеуказанных типовых звеньев в этом задании имеется возможность дополнительно "вспомнить" и переходные функции исследуемых типовых звеньев (при конечном в ремени моделировании **40** с), поэтому структурные схемы на рис. 1.20 содержат типовой блок ***Ступенчатое воздействие*** (с параметрами **0 0 1**) и типовой блок ***Графическое окно****.*

# 2 АНАЛИЗ УСТОЙЧИВОСТИ И КОРРЕКЦИЯ САР ЯДЕРНОГО РЕАКТОРА ПО АМПЛИТУДНО-ФАЗОВЫМ ЧАСТОТНЫМ ХАРАКТЕРИСТИКАМ

В процессе выполнения лабораторной работы № 1 Вы сформировали структурную схему простейшей математической модели динамики САР ядерного реактора, внешний вид которой (с точностью до Ваших художественно-оформительских способностей) имел вид, приблизительно соответствующий структурной схеме на рис. 2.1.

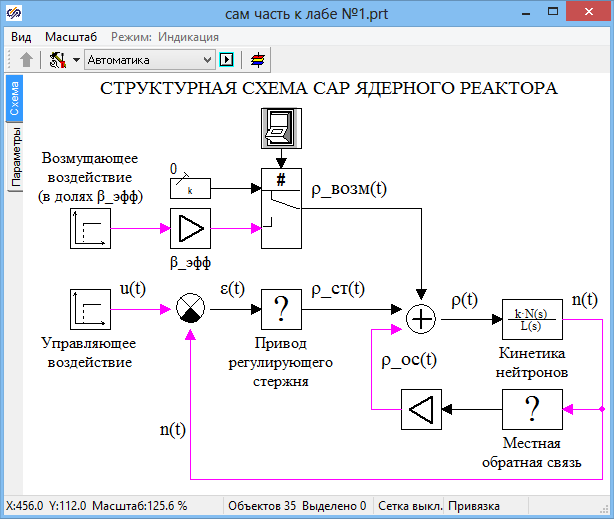


Рисунок 2.1 — Структурная схема простейшей математической

модели динамики САР ядерного реактора

Подписи под блоками, которые формируют преобразование и отображение сигналов (см. рис. 2.1) дают минимальную информацию, по которой Вы должны (?!) "вспомнить" цель задания в предыдущей лабораторной работе и примененные Вами "нестандартные" методы ее решения.

Поскольку задача (проект) Вами была сохранена на жестком диске, запустите среду SimInTech и откройте "свою" модель динамики САР ЯР.

В данной части лабораторной работы Вам предстоит выполнить последовательно ряд этапов, направленных как на исследование частотных характеристик только ядерного реактора ("голый" реактор, реактор с местной обратной связью), так и на анализ САР ЯР в целом (исходной, а затем и скорректированной), включая анализ устойчивости САР ЯР с использованием частотного критерия Найквиста (различные варианты его формулировки) и по теоремам Ляпунова (по полюсам).

Учитывая, что для расчета в среде SimInTech амплитудно-фазовых частотных характеристик необходимо указать на структурной схеме точки приложения единичного гармонического воздействия и точки "выхода", Вы должны определить (самостоятельно) место расположения вышеуказанных точек и затем внести в структурную схему соответствующие добавления (а возможно и изменения).

**Примечания:**

* + 1. При выполнении ряда этапов Вам предстоит, в частности, исследовать АФЧХ "голого" реактора при двух значениях времени жизни мгновенных нейтронов и двух значениях доли запаздывающих нейтронов. Это потребует от Вас создания "дополнительной" модели кинетики для второго ядерного реактора, которую Вы можете расположить в свободном месте Схемного окна (например, в правом нижнем угле Схемного окна (см. рис. 2.1).
    2. При расчете и построении графиков АФЧХ рекомендуется задавать **700** расчетных точек, равномерно расположенных в логарифмическом масштабе в следующем диапазоне частот: от **10 - 3** до **10 4** Гц.

Для выполнения данной части лабораторной работы каждой подгруппе необходимо выполнить следующие этапы:

* В рамках одного "сеанса" работы в режиме АНАЛИЗ рассчитать АФХЧ "голого" реактора (без любых обратных связей) при двух значениях времени жизни мгновенных нейтронов (реактор типа РБМК) и  (реактор типа ВВЭР для плавучих АЭС) и построить графики следующих характеристик:

- годографы Найквиста (два годографа на одном графике);

- логарифмические амплитудные характеристики (две ЛАХ на одном графике);   
- фазовые частотные характеристики (две ФЧХ на одном графике).

Уяснить качественное влияние на вид этих характеристик значения времени жизни мгновенных нейтронов.

* В рамках одного "сеанса" работы в режиме АНАЛИЗ рассчитать АФХЧ "голого" реактора (без любых обратных связей) при двух значениях доли запаздывающих нейтронов (топливо U-235) и  (топливо Pu-239) построить графики следующих частотных характеристик:

- годографы Найквиста (два годографа на одном графике);

- логарифмические амплитудные характеристики (две ЛАХ на одном графике);

- фазовые частотные характеристики (две ФЧХ на одном графике).

* В рамках одного "сеанса" работы в режиме АНАЛИЗ при исходных параметрах САР ЯР рассчитать АФХЧ "голого" реактора (без любых обратных связей) и АФЧХ ядерного реактора с местной обратной связью и построить графики следующих частотных характеристик:

- годографы Найквиста (два годографа на одном графике);

- логарифмические амплитудные характеристики (две ЛАХ на одном графике);

- фазовые частотные характеристики (две ФЧХ на одном графике).

Уяснить качественное влияние на вид этих характеристик отрицательной обратной связи по температуре топлива.

* Выполнить оценку устойчивости исходной САР в разомкнутом и замкнутом состояниях, использую непосредственное вычисление полюсов соответствующих передаточных функций.
* Выполнить "контрольное" моделирование при подаче управляющего воздействия и убедиться, что исходная САР в замкнутом состоянии либо неустойчива, либо имеет явно "плохое" качество переходного процесса
* В рамках одного "сеанса" работы в режиме АНАЛИЗ выполнить анализ устойчивости исходной замкнутой САР, используя критерий Найквиста в следующих вариантах его применения:

- по годографу АФЧХ разомкнутой САР;

- по одновременному рассмотрению ЛАХ и ФЧХ разомкнутой САР.

Определить во сколько раз необходимо уменьшить скоростную эффективность привода регулирующего стержня, чтобы запас устойчивости по амплитуде составлял не менее 30 дБ, а запас по фазе - не менее 60°.

* Выполнить коррекцию САР (уменьшить Kпр) и прямым моделированием убедиться, что при подаче управляющего воздействия скорректированная САР устойчива и имеет удовлетворительное качество переходного процесса.
* В рамках одного "сеанса" работы в режиме АНАЛИЗ проверить устойчивость скорректированной замкнутой САР, используя критерий Найквиста в следующих вариантах его применения:

- по годографу АФЧХ разомкнутой САР;

- по одновременному рассмотрению ЛАХ и ФЧХ разомкнутой САР.

Определить запасы устойчивости скорректированной САР по амплитуде и по фазе.

* Выполнить проверку устойчивости скорректированной САР в замкнутом состоянии, использую непосредственное вычисление полюсов характеристического полинома замкнутой САР.
* Определить аналитические выражения главной передаточной функции передаточной функции по возмущающему воздействию .

Сохраните проект (задачу) на жесткий диск, так как он (проект) частично будет использован Вами при выполнении лабораторной работы № 3.