ФЕДЕРАЛЬНОЕ АГЕНТСТВО ПО ОБРАЗОВАНИЮ

ГОСУДАРСТВЕННОЕ ОБРАЗОВАТЕЛЬНОЕ УЧРЕЖДЕНИЕ
ВЫСШЕГО ПРОФЕССИОНАЛЬНОГО ОБРАЗОВАНИЯ
«САМАРСКИЙ ГОСУДАРСТВЕННЫЙ АЭРОКОСМИЧЕСКИЙ
УНИВЕРСИТЕТ имени академика С.П. КОРОЛЕВА»

Моделирование процессов управления в технических системах

Утверждено Редакционно-издательским советом университета в качестве учебного пособия

САМАРА
Издательство СГАУ
2006

УДК 004.9(075)
ББК 32.79
М744



Инновационная образовательная программа "Развитие центра компетенции и подготовка специалистов мирового уровня в области аэрокосмических и геоинформационных технологий"

А.А. Иголкин, М.С. Гаспаров, А.А. Игонин,
Н.Д. Быстров., А.Г. Гимадиев.
Рецензенты: д-р. техн. наук, проф. Д. К. Новиков
канд. техн. наук, доц. Ю.И. Кондрашов

М744 Моделирование процессов управления в технических системах: учеб. пособие / *А.А. Иголкин, М.С. Гаспаров, А.А. Игонин, Н.Д. Быстров., А.Г. Гимадиев.* – Самара: Изд-во Самар. гос. аэрокосм. ун-та, 2006. – 180 с. : ил.
ISBN 5-7883-0441-0

Представлено краткое описание систем управления различного назначения. Описаны программные продукты, с помощью которых можно моделировать динамические процессы управления в сложных технических системах. В отдельные разделы выделены курсовая работа и лабораторный практикум.

Учебное пособие предназначено для студентов механических факультетов, обучающихся по специальностям "Гидравлические машины, гидроприводы и гидропневмоавтоматика", "Авиационные двигатели и энергетические установки".

УДК 004.9(075)
ББК 32.79

ISBN 5-7883-0441-0

© А.А. Иголкин, М.С. Гаспаров, А.А. Игонин, Н.Д. Быстров, А.Г. Гимадиев, 2006
© Самарский государственный аэрокосмический университет, 2006

Оглавление

Оглавление 3

Предисловие 7

Введение 8

Часть 1. Общие сведения об управлении в технических системах 9

1.1. Проблема управления 9

1.2. Примеры систем управления 12

1.2.1. Система посадки самолета 12
1.2.2. Система регулирования температуры 15
1.2.3. Система управления двигателем внутреннего сгорания 16
1.2.4. Система управления производственным оборудованием 18

1.3. Теоретические основы моделирования динамических характеристик САР 20

1.4. Алгоритм расчета динамических характеристик САР 32

Часть 2. Использование программных комплексов для моделирования процессов управления в технических системах 37

2.1. Работа с пакетом МВТУ 38

2.1.1. Назначение, режимы работы, особенности и достоинства программного комплекса МВТУ 38
2.1.2. Панель инструментов главного окна 40
2.1.3. Панель типовых блоков 43
2.1.4. Основные этапы работы в среде ПК «МВТУ» 47
2.1.5. Демонстрационно-ознакомительная задача 48
2.1.6. Ввод структурной схемы и исходных данных 49
2.1.6.1. Этап 1 – заполнение схемного окна необходимыми типовыми блоками 49
2.1.6.2. Этап 2 – проведение линий связи на структурной схеме 50
2.1.6.3. Этап 3 – ввод параметров структурной схемы 52
2.1.6.4. Этап 4 – установка параметров интегрирования 53
2.1.6.5. Этап 5 – оформление поясняющих подписей 53
2.1.6.6. Этап 6 – открытие графического окна и изменение его размеров 54
2.1.7. Моделирование переходных процессов и вариантные расчеты 55

2.1.8. Анализ частотных характеристик в среде ПК МВТУ 56

2.2. Работа с пакетом Simulink 67

2.2.1. Общие сведения 67
2.2.2. Запуск Simulink 68
2.2.3. Обозреватель разделов библиотеки Simulink 69
2.2.4. Создание модели 71
2.2.5. Окно модели 73
2.2.6. Основные приемы подготовки и редактирования модели 75
2.2.6.1. Добавление текстовых надписей 75
2.2.6.2. Выделение объектов 76
2.2.6.3. Копирование и перемещение объектов в буфер промежуточного хранения 76
2.2.6.4. Вставка объектов из буфера промежуточного хранения 77
2.2.6.5. Удаление объектов 77
2.2.6.6. Соединение блоков 77
2.2.6.7. Изменение размеров блоков 78
2.2.6.8. Перемещение блоков 78
2.2.6.9. Использование команд Undo и Redo 79
2.2.6.10. Форматирования объектов 79
2.2.6.11. Установка параметров расчета и его выполнение. 80
2.2.6.12. Установка параметров расчета модели 80
2.2.6.13. Установка параметров обмена с рабочей областью 83
2.2.6.14. Установка параметров диагностирования модели 84
2.2.6.15. Выполнение расчета 85
2.2.6.16. Завершение работы 85

2.3. Основные сведения о работе в LabVIEW 85

2.3.1. Вход в программу и выход из нее 85
2.3.2. Организация расположения панелей LabVIEW 87
2.3.2.1. Способы расположения панелей на экране 87
2.3.2.2. Расположение нескольких панелей 88
2.3.3. Структура файла и панелей LabVIEW 88
2.3.4. Панель управления (Controls), приборы панели 91
2.3.5. Функциональная панель (Functions) 93
2.3.6. Маркировка объекта панелей 94
2.3.6.1. Маркировка меткой 94

2.3.6.2. Маркировка надписью ... 95
2.3.6.3. Удаление метки ... 95
2.3.6.4. Удаление метки ... **Ошибка! Закладка не определена.**
2.3.6.5. Особенности метки инструмента функциональной панели ... 96
2.3.7. Выделение, перемещение и удаление объектов ... 96
2.3.8. Соединение объектов LabVIEW ... 98
2.3.8.1. Входы и выходы инструментов функциональной панели ... 102
2.3.8.2. Названия выводов инструмента ... 102
2.3.8.3. Соединение виртуальных инструментов ... 105
2.3.8.4. Перемещение и удаление проводов ... 109
2.3.8.5. Описание сборки схемы LabVIEW ... 110

Часть 3. Исследование динамических характеристик САР частоты вращения ГТД ... 114

3.1. Назначение и принцип действия САР ... 114

3.2. Вывод дифференциальных уравнений звеньев ... 116

3.2.1. Уравнения объектов регулирования ... 116
3.2.2. Уравнение центробежного чувствительного элемента ... 118
3.2.3. Уравнение горизонтального рычага ... 119
3.2.4. Уравнение первого каскада гидроусилителя ... 120
3.2.5. Уравнение золотникового распределителя второго каскада гидроусилителя ... 122
3.2.6. Уравнение сервопоршня второго каскада гидроусилителя ... 124
3.2.7. Уравнение дроссельной иглы ... 125
3.2.8. Уравнение топливных форсунок ... 126

3.3. Построение структурной схемы и определение передаточных функций САР ... 128

3.4. Анализ устойчивости САР ... 131

3.5. Оценка качества регулирования САР ... 134

Часть 4. Лабораторный практикум ... 137

4.1. Моделирование процессов управления в линейных технических системах ... 137

4.1.1. Передаточная функция звена управления. Исследование временных характеристик систем автоматического управления ... 137

4.1.2. Исследование частотных характеристик систем автоматического управления 142
4.1.3. Моделирование динамических процессов в САР частоты вращения двигателя с использованием программного комплекса МВТУ 146
4.1.4. Система управления скоростью автомобиля с использованием пропорционального регулятора. 155
4.2. Моделирование процессов управления в нелинейных технических системах. 158
4.2.1. Выбор параметров ПИД-регуляторов для систем с запаздыванием. 158
4.2.2. Исследование автоколебаний в нелинейных системах 164
4.3. Моделирование процессов управления в цифровых технических системах 169
4.3.1. Исследование устойчивости цифровых систем 169
4.3.2. Алгоритмы решения задачи исследования устойчивости 169
4.3.2.1. Непосредственное вычисление корней характеристического уравнения 169
4.3.2.2. W – преобразование. 170
4.3.2.3. Критерий Гурвица. 170
4.3.2.4. Частотные методы 171
4.3.3. Дискретный ПИД-регулятор скорости движения автомобиля 173
4.3.4. Проектирование цифрового ПИД – регулятора. 175
Библиографический список 179

Предисловие

В современный век бурного развития техники, автоматизации процессов в технологических и энергетических установках нельзя создать работоспособные системы управления без моделирования сложных гидро- и газодинамических явлений и устройств механики. Основы моделирования динамических процессов, имеющих большое значение при разработке систем управления, даются в курсе лекций по теории автоматического регулирования и управления, являющейся базовой дисциплиной по многим специальностям. Например, по специальности 150802 «Гидравлические машины, гидроприводы и гидропневмоавтоматика» в учебном плане предусмотрены такие курсы лекций, как "Управление техническими системами", "Динамика и регулирование гидро- и пневмосистем" с выполнением курсовых и лабораторных работ. Одним из трудных для усвоения студентами разделов указанных курсов лекций является составление математической модели агрегатов и систем в целом с принятием обоснованных упрощающих допущений и моделирование динамических процессов. Поэтому важна разработка таких учебных пособий, которые позволили бы студентам самостоятельно изучить и применять различные способы и методы моделирования процессов в системах. Предлагаемое учебное пособие соответствует учебным программам по курсам лекций "Теория управления сложными системами" специальности 150802, "Теория автоматического управления" и "Автоматика и регулирование авиационных двигателей и энергетических установок" специальности 160301 – «Авиационные двигатели и энергетические установки», "Автоматика и регулирование ракетных двигателей" специальности 160302 – "Ракетные двигатели".

Особенностью предлагаемого пособия является изложение материала по моделированию динамических процессов применительно к различным объектам, предоставление студентам возможности самостоятельного выполнения курсовых и лабораторных работ на ПК с применением современных программных средств.

Учебное пособие может быть использовано также слушателями различных курсов переподготовки инженерных кадров.

Введение

Известно, что управление сложными техническими объектами, к которым относятся авиационные и ракетные двигатели, двигатели внутреннего сгорания, имеющие множество изменяющихся параметров, возможно только средствами автоматики. Кроме того, в настоящее время автоматизация технологических процессов начала широко применяться в энергетике, машиностроении, химической и газовой промышленности.

Создание и функционирование систем автоматического управления базируются на определенных правилах и закономерностях, которые изучаются в теории автоматического управления. При изучении динамических процессов в системах автоматического регулирования широко применяется метод математического моделирования. Без достаточных знаний и опыта моделирования трудно создать работоспособную систему автоматического регулирования. Поэтому весьма важным является подготовка квалифицированных кадров в этой области техники.

При проектировании сложной технической системы применяется методика компьютерного моделирования. Существует много программных продуктов, которые в процессе проектирования реализуют принципы создания и моделирования устройств автоматического управления. К таким программным продуктам можно отнести пакет Simulink (часть большого программного пакета MATLAB), пакет программ LabView американской кампании National Instruments, программный комплекс “МВТУ” (“Моделирование в технических устройствах”), разработанный в Московском Государственном Техническом Университете имени Н. Э. Баумана. Каждый из этих программных продуктов имеет свои преимущества и области применения. В учебном пособии дано описание перечисленных выше программ, а также рассмотрены примеры их применения в учебном процессе.

Часть 1. Общие сведения об управлении в технических системах

1.1. Проблема управления

Проблемы управления возникают при создании технических систем автоматического управления (САУ), включающих в общем случае ряд систем автоматического регулирования (САР), призванных поддерживать или изменять по заданной программе выходные параметры объекта управления (регулирования). САУ должна выполнять все функции, сформулированные в техническом задании, от запуска объекта управления, выхода ее на режим работы, и до останова. Параметры объекта, регулируемые САР, не должны выходить за пределы нормативных величин. В зависимости от назначения объекта управления требования к САР могут отличаться существенно, например, объект управления – ракета-носитель, или объект управления – доменная печь. Тем не менее можно указать общие характеристики для всех систем:

1. Необходимость компенсации возмущений.
2. Ограничение на величину установившейся ошибки.
3. Желаемый вид переходных характеристик.
4. Ограничения на чувствительность к изменению параметров объекта управления.

Создание САУ с указанными выше характеристиками возможно при выполнении следующих этапов:

1. Выбор датчиков для измерения выходных параметров объекта управления.
2. Выбор исполнительных устройств для воздействия на объект управления.
3. Составление математических моделей (уравнений) объекта, датчика и исполнительного устройства.
4. Проектирование регулятора на основании разработанных моделей и критериев качества регулирования.
5. Оценка результатов синтеза системы аналитически, путём имитационного моделирования и, наконец, испытанием физической системы.
6. Если испытание физической системы даёт неудовлетворительные результаты, то необходимо осуществить повторение предыдущих этапов.

Проблемы управления возникают на каждом из этапов, если создавать САУ, отвечающую современным жестким требованиям. Например, часто

вследствие неточности построения математических моделей результаты испытания реальной системы управления не соответствуют желаемым. Поэтому инженер-проектировщик должен повторить процедуру синтеза, используя все доступные средства, чтобы добиться желаемых результатов. При этом очень важную роль играют интуиция и личный опыт, приобретённый в процессе исследования и эксплуатации реальных систем.

В зависимости от типа системы и опыта проектировщика некоторые из перечисленных выше этапов могут быть опущены. В частности, многие системы управления создаются путём использования серийных промышленных регуляторов и экспериментальной настройки их параметров в процессе их пошагового тестирования совместно с физическим объектом, при этом нет необходимости в разработке математических моделей. Для некоторых систем такой подход является приемлемым, а для других он совершенно не пригоден. Например, система управления космическим аппаратом не может быть спроектирована подобным образом; она должна правильно выполнять свои функции сразу же после начала эксплуатации.

Проблемы управления возникали исторически с созданием новых систем управления и решались многими учеными. Например, голландский механик и химик Корнелиус Дреббель (1572-1633) изобрёл регулятор температуры, который он использовал в своих химических опытах и в инкубаторах для выведения цыплят. Этот регулятор содержал устройство, позволявшее выпускать нагретый воздух из камеры, когда температура в ней достигала желаемого значения. Его можно сравнить с уже известной нам системой автоматического регулирования температуры в жилом помещении; разница лишь в том, что в этой системе нагретый воздух начинал циркулировать, когда температура опускалась ниже заданного значения.

Американец Уильям Генри изобрёл регулятор температуры, в котором использовалась заслонка, автоматически управлявшая сгоранием топлива и, следовательно, температурой. Принцип действия датчика температуры и исполнительного устройства был основан на давлении нагретого воздуха при его расширении. Расширение воздуха приводило к закрытию заслонки и уменьшению сгорания топлива, а сжатие воздуха стремилось открыть заслонку.

Многими изобретателями были внесены усовершенствования в конструкцию поплавковых регуляторов уровня жидкости. Это сделали Джеймс Бриндли в 1758 году, Саттон Томас Вуд в 1784 (оба – в США) и И. И. Ползунов в 1763 году в России. Усовершенствования регуляторов давления для паровых котлов сделали Дени Папен, Роберт Делап и Мэтью Мюррей в 1799 году. Главным изобретением в области управления скоростью ветряных мельниц и паровых машин был центробежный регулятор скорости, изображенный на рисунке 1. При увеличении скорости враще-

ния машины шарики за счет центробежной силы расходились, что, в свою очередь, приводило к перемещению втулки вверх по оси машины. При этом с помощью клапана, управляемого рычажным механизмом, уменьшалась подача пара и, следовательно, скорость вращения. Уменьшение скорости вращения приводило к обратному эффекту. Во многих случаях регулятор вместо того, чтобы поддерживать постоянное значение выходной переменной, позволял ей совершать небольшие колебания относительно заданного значения. Этот эффект часто называли “рысканием”. Чтобы устранить подобную неустойчивость, потребовалось создание математических моделей физических устройств, т. е. уравнений, решение которых описывало бы поведение этих устройств. В результате появились современные математические методы моделирования, анализа и синтеза систем управления.

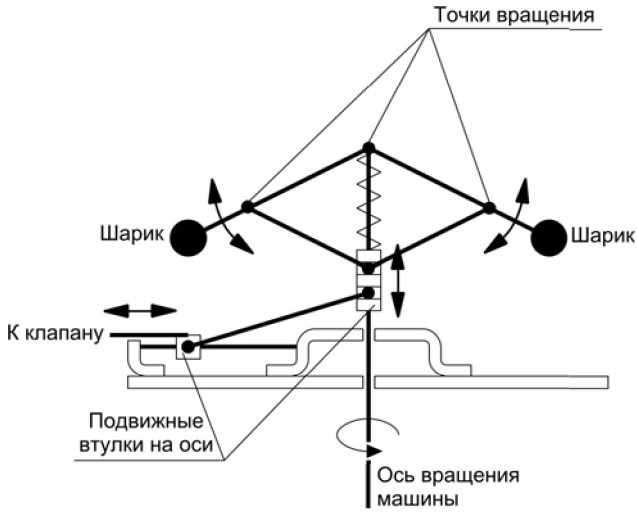


Рисунок 1. Принципиальная схема регулятора скорости вращения паровой машины

В разработку этих методов внесли свой вклад многие ученые. Пьер Симон Лаплас (1749-1827) изобрел преобразование (названное впоследствии его именем), являющееся основой большинства методов анализа и синтеза систем управления. Из других ученых отметим следующих:

1) Исаак Ньютон (1642-1727) – математическое моделирование и анализ;
2) Вышнеградский (1831-1895) – диаграмма Вышнеградского;
3) Жуковский Н. Е. (1847-1921) – первый учебник по автоматическим регуляторам в России;

4) Михайлов А. В. – частотный критерий устойчивости системы (1938).
5) Чарльз П. Стейнметц (1863-1923) – анализ частотных характеристик с помощью комплексных переменных;
6) Гарри Найквист (1889-1976) – критерий Найквиста;
7) Гарольд С. Блэк (1898-1981) – усилители с отрицательной обратной связью;
8) Хендрик У. Боде (1905-1982) – диаграмма Боде (амплитудно-частотная характеристика);
9) У. Р. Эванс – корневой годограф;
10) Джон фон Нейман (1903-1957) – принцип действия цифрового компьютера.

Список приведен только с целью дать читателю сведения о том, какие идеи и в какое время разрабатывали перечисленные выше ученые. Список современных ученых, внесших весомый вклад в развитие теории автоматического управления, был бы слишком длинным.

В данной книге излагаются математические процедуры анализа характеристик систем управления. В книге также рассматривается применение промышленных регуляторов, в связи с чем приводятся методы анализа, имеющие целенаправленный характер и обосновывающие целесообразность использования этих регуляторов в системах управления.

1.2. Примеры систем управления

Этот раздел имеет целью познакомить читателя с некоторыми типами систем управления и, кроме того, дать представление об основных элементах этих систем.

1.2.1. Система посадки самолета

В качестве первого примера рассмотрим замкнутую систему управления посадкой самолёта.

В данном случае пилот имеет три основных задачи. Во-первых, самолёт должен приближаться к аэродрому, выдерживая курс по центру посадочной полосы, как показано на рисунке 2. На этом рисунке также показана и вторая задача пилота – соблюдение надлежащей глиссады. Третьей задачей является выдерживание правильной скорости.

Мы рассмотрим только одну из этих задач – задачу удержания самолёта по центру посадочной полосы. Функциональная схема системы, решающей данную задачу, приведена на рисунке 3. Предполагается, что курс самолёта регулируется с помощью элеронов. Элероны в совокупности с механизмами, изменяющими угол их наклона, образуют исполнительное устройство системы управления.

В данной системе пилот использует несколько датчиков для определения положения самолёта. Он может сделать это с помощью прибора на панели управления в кабине самолёта. Кроме того, пилот обычно визуально наблюдает посадочную полосу и может оценить положение самолёта относительно её центра. Таким образом пилот знает желаемое положение самолёта и имеет информацию о действительном его положении. Он управляет элеронами так, чтобы самолёт занял желаемое положение. В терминах систем управления мы обычно разность между желаемым и действительным положением называем ошибкой системы.

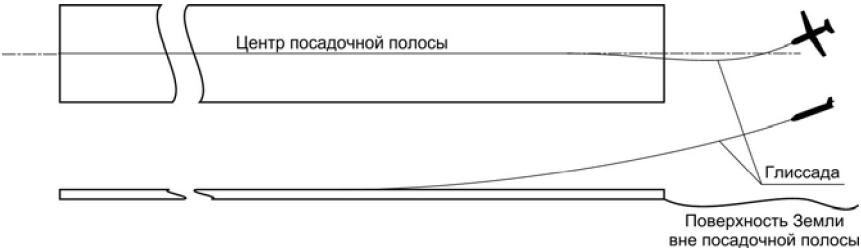


Рисунок 2. Схема приземление самолета

Теперь нам осталось выяснить назначение регулятора на рисунке 3. В данной системе функции регулятора выполняет пилот, который также выступает в качестве датчика и одновременно управляет элеронами. Оценивая положение самолёта, пилот управляет элеронами таким образом, чтобы свести ошибку к нулю. Качество выполнения пилотом этих действий определяется степенью его тренированности. Например, для большого пассажирского лайнера действия пилота должны быть совершенно иными, нежели для небольшого одномоторного самолёта. То есть, мы можем сказать, что функции регулятора заложены в сознании пилота и являются результатом интенсивной тренировки. Цель ее в том, чтобы при каждой посадке при одних и тех же обстоятельствах предпринимались одни и те же действия.

Рассмотрим теперь автоматическую систему посадки самолёта, в которой пилот не принимает участия. Во многих аэропортах большой пассажирский лайнер может быть заведён на посадку автоматически. Ещё более сложная система управления посадкой характерна для авианосцев [12].



Рисунок 3. Функциональная схема САР положения самолета

Система автоматической посадки также может быть представлена схемой на рисунке 3. Однако элеронами здесь управляет автопилот, который, в свою очередь, является замкнутой системой управления. Роль датчика обычно выполняет радар, который определяет положение самолёта относительно центра посадочной полосы. Функции регулятора выполняет цифровой компьютер, который решает систему уравнений и вырабатывает команды, подаваемые на автопилот.

Отметим также, что очень часто человек, выполняющий определённые действия, является частью замкнутой системы управления. Когда мы управляем автомобилем, то постоянно контролируем его положение и направление движения. Если мы считаем, что эти параметры нас не удовлетворяют, то предпринимаем действия, чтобы исправить их. Иными словами, мы пытаемся устранить ошибку системы. Второй простой пример – это процесс рисования. Мы постоянно следим за положением карандаша на бумаге, пытаясь минимизировать разность между желаемым и действительным положением. (Если вы сомневаетесь, что процесс рисования – разновидность управления с обратной связью, то попытайтесь нарисовать что-нибудь с закрытыми глазами.) Ещё один пример: чтобы поймать летящий мяч, мы следим за его движением и управляем положением рук до тех пор, пока мяч не попадёт в них.

Ранее мы отметили, что примером биологической системы управления является система регулирования температуры человеческого тела. Эта система стремится поддерживать постоянное значение температуры. Окружающая среда пытается повлиять на эту температуру и отклонить её от желаемого значения. Тело реагирует на отклонение (ошибку) изменением ритма дыхания, ускорением или замедлением потока крови, дрожью и т. д. Эта система имеет одну особенность, не свойственную системам управления, создаваемым человеком: она обычно нормально функционирует более 70 лет. И наоборот, биологическая система имеет другую особенность, которая в равной мере присуща и системам управления, создаваемым человеком: если величина ошибки становится слишком большой, то работа системы нарушается.

1.2.2. Система регулирования температуры

Вторая система управления, которую мы рассмотрим в этом разделе – это система регулирования температуры в микротеплице. Учёные используют такую теплицу для изучения влияния температуры на рост растений [13]. Функциональная схема системы регулирования температуры приведена на рисунке 4. Температура в теплице измеряется с помощью термистора (резистора, сопротивление которого зависит от температуры), включённого в одно из плеч мостовой схемы [14]. Выходной сигнал измерительного моста имеет малую величину (милливольты), поэтому необходим усилитель, чтобы довести напряжение до приемлемого уровня. Вообще многие преобразователи характеризуются очень малым выходным напряжением, поэтому датчики систем управления очень часто укомплектовываются встроенными усилителями.

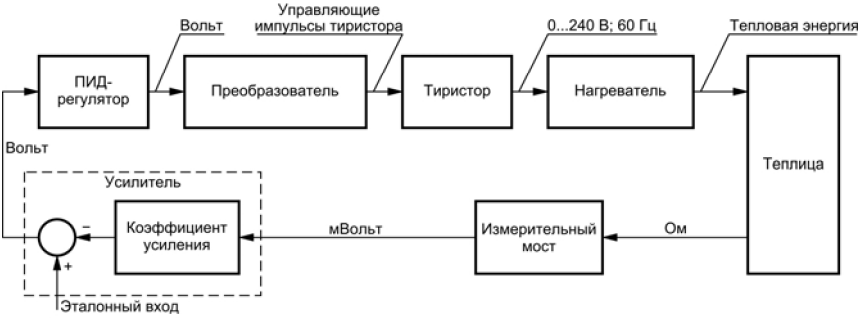


Рисунок 4. Функциональная схема системы регулирования температуры в теплице

Желаемая температура в теплице также задаётся в виде напряжения. Разность между желаемой температурой (напряжение) и действительной температурой (тоже напряжение) есть сигнал ошибки. Кондиционер пытается поддержать температуру в теплице ниже желаемой, а напряжение, подаваемое на нагреватель (см. рисунок 4), стремится увеличить температуру до желаемого значения. Таким образом, увеличение напряжения приводит к увеличению температуры, а уменьшение напряжения – к уменьшению температуры. Напряжение, подаваемое на нагреватель, регулируется тиристором, который в свою очередь управляется сигналом ошибки, преобразованным в импульсную форму.

В данной системе, как и в случае автоматической посадки самолёта, используется ПИД-регулятор. Такой закон регулирования может быть реализован как с помощью цифрового компьютера, так и в виде аналоговой схемы, состоящей из резисторов, конденсаторов и операционных усилителей.

1.2.3. Система управления двигателем внутреннего сгорания

Дизельный двигатель – одни из наиболее характерных объектов управления. Широкое распространение получили дизели с газотурбинным наддувом, в которых воздух в двигатель подается турбокомпрессором, приводимым во вращение за счет энергии отработавших газов. В этих дизелях имеется целый ряд регулируемых параметров – температуры охлаждающей жидкости и смазывающего масла, давление и температура воздуха и др. Но основным регулируемым параметром дизельного двигателя является частота вращения коленчатого вала.

Свойства дизеля как объекта регулирования по частоте вращения обусловлены особенностями взаимодействия основных элементов САР: поршневой части двигателя, турбокомпрессора, потребителя вырабатываемой двигателем энергии. Характер взаимодействия этих элементов в процессе работы двигателя отражен в принципиальной и функциональной схемах, представленных на рисунке 6 (а, б).

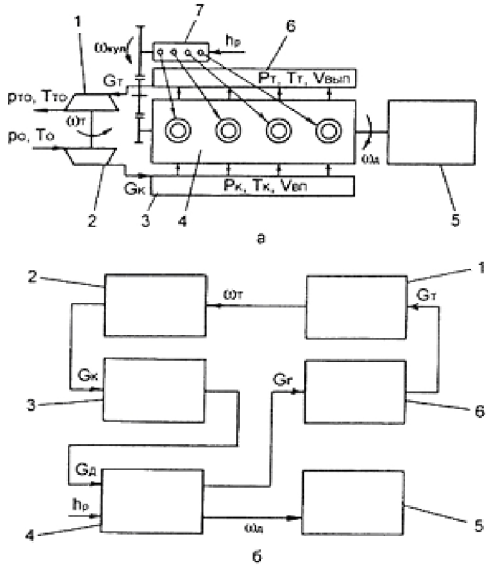


Рисунок 5. Принципиальная (а) и функциональная (б) схемы дизеля с турбонаддувом как объекта регулирования по частоте вращения коленчатого вала

Основной элемент такого объекта – его шатунно-поршневая часть или, собственно, двигатель 4. Входными координатами двигателя 4 на функциональной схеме являются подача воздуха и подача топлива, опре-

деляемая положением h_p дозирующего органа (например, рейки топливного насоса). Процесс смесеобразования происходит непосредственно в цилиндрах дизеля. Образовавшаяся горючая смесь воспламеняется от теплоты сжатия. Вырабатываемая энергия приводит во вращение коленчатый вал двигателя. Поэтому выходная координата – частота вращения коленчатого вала связывает двигатель 4 с потребителем 5, а расход отработавших газов с выпускным коллектором 6. Из коллектора 6 газы в количестве G_T под давлением p_T поступают на турбину 1, приводя ее во вращение с частотой ω_T. С такой же частотой вращается и компрессор 2, в результате чего во впускной коллектор 3 поступает сжатый воздух с расходом G_K. Из коллектора 3 воздух в количестве $G_Д$ подается в двигатель 4. Статические и динамические свойства дизеля с турбонаддувом обусловлены соответствующими свойствами всех элементов, входящих в описанную функциональную схему. Эти свойства могут быть определены по уравнениям, описывающим элементы и систему автоматического управления в целом.

Одно из важнейших свойств – устойчивость – характеризует способность двигателя возвращаться к исходному установившемуся режиму работы после его нарушения. Устойчивость режима может быть определена по статическим характеристикам момента двигателя M_e и момента сопротивления M_c. Для этого используется параметр, называемый фактором устойчивости $F_Д$ и определяемый из выражения

$$F_Д = \frac{\partial M_c}{\partial \omega_Д} - \frac{\partial M_e}{\partial \omega_Д}.$$

При работе двигателя на равновесном режиме его основные параметры (угловая скорость коленчатого вала, положение рейки топливного насоса, предварительная деформация пружин регулятора и др.) остаются неизменными во времени.

При нарушении равновесного режима в системе двигатель – потребитель появляется избыток или недостаток энергии, вырабатываемой двигателем, в связи с чем угловая скорость коленчатого вала начинает меняться во времени, автоматический регулятор перемещает рейку топливного насоса, изменяя подачу топлива в цилиндры, и т.д. В этих условиях двигатель работает на неравновесных режимах, при которых параметры, характеризующие работу двигателя, изменяются во времени. Процесс, происходящий при смене равновесного режима или при возвращении двигателя в равновесное состояние после возмущающего действия и характеризую-

щийся изменением параметров во времени, называется переходным процессом.

Характер переходного процесса отражает динамические свойства системы автоматического регулирования двигателя и поэтому подлежит исследованию при создании этой системы или изучении ее работы. Обычно наибольший интерес при подобных исследованиях представляет изучение зависимости регулируемого параметра от времени. В рассматриваемых системах таким параметром в большинстве случаев является угловая скорость ω коленчатого вала двигателя.

1.2.4. Система управления производственным оборудованием

Примером применения системы автоматического управления в промышленности может стать система управления натяжением алюминиевой ленты в линии правки и резки рулонного алюминия. Схема показана на рисунке 6.

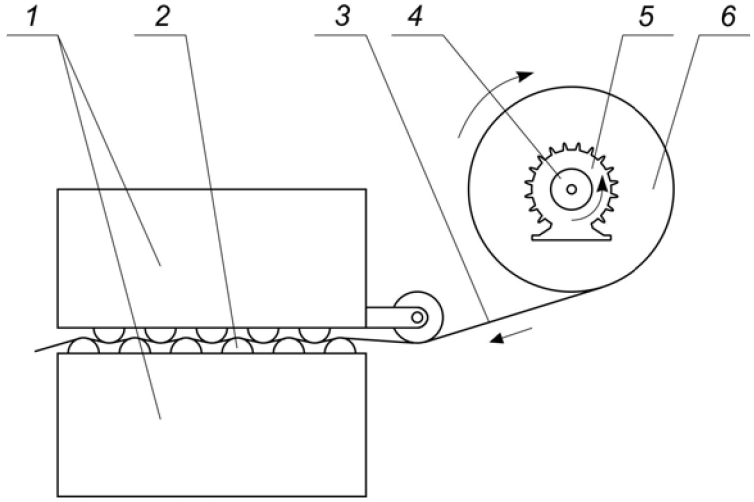


Рисунок 6. Схема разматывателя и правильной машины:
1 – плиты правильной машины, 2 – ролики правильной машины,
3 – алюминиевая лента, 4 – датчик угловой скорости,
5 – двигатель постоянного тока, создающий противонатяжение,
6 – рулон

Для равномерной подачи алюминиевой ленты в правильную машину на разматывателе установлен двигатель постоянного тока, момент вращения которого направлен противоположно разматыванию ленты. Двигатель управляется так, что можно регулировать силу натяжения ленты путем ограничения тока, подаваемого на него. Зависимость между натяжением

ленты и током на рабочем участке характеристики прямо пропорциональная. Момент силы, создаваемый двигателем при одном и том же ограничении тока, постоянен, а противоположно направленный ему момент силы, создаваемый правильной машиной, с уменьшением диаметра рулона уменьшается. В результате, когда диаметр рулона станет меньше определенного значения, лента под действием двигателя разматывателя, преодолевая силу трения скольжения в правильной машине, может начать двигаться в противоположном направлении – таким образом можно повредить и ленту и правильную машину.

Автоматическое управление в данной системе сводится к изменению максимального тока двигателя в зависимости от скорости вращения разматывателя: чем больше скорость вращения разматывателя, тем меньшим значением нужно ограничить максимальный ток двигателя, следовательно, станет меньше крутящий момент, создаваемый им.

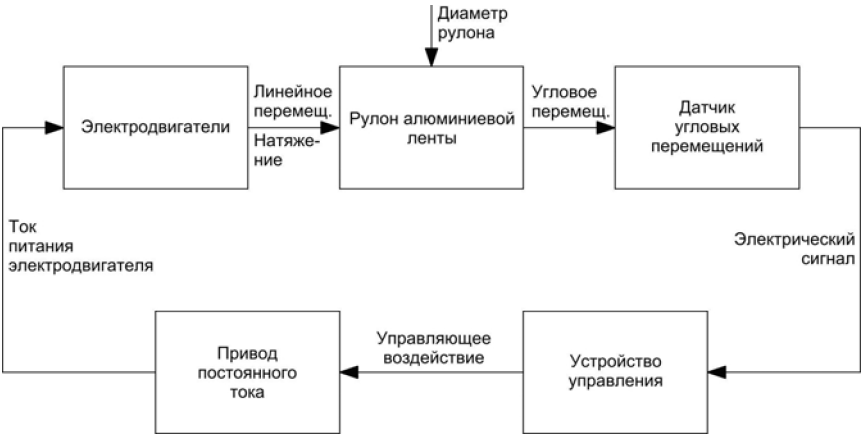


Рисунок 7. Функциональная схема системы управления натяжением алюминиевой ленты.

В результате при правильной работе системы управления крутящий момент двигателя разматывателя ленты уменьшается по мере уменьшения остаточного диаметра катушки, которое раньше приводило к увеличению момента вращения, создаваемого двигателем разматывателя. Таким образом, значение момента вращения двигателя разматывателя с уменьшением диаметра рулона не изменяется. Функциональная схема такой системы регулирования представлена на рисунке 7.

Согласно рисунку работу системы можно описать следующим образом. Электродвигатели правильной машины и разматывателя создают соответственно перемещение алюминиевой ленты и её натяжение; скорость перемещения постоянна. На вращающемся (разматывающемся) рулоне

линейное перемещение ленты преобразуется в угловое перемещение вращающегося рулона, угловая скорость которого увеличивается с уменьшением диаметра в процессе разматывания. Угловое перемещение фиксируется датчиком угловых перемещений и сигнал с датчика поступает на устройство управления. Устройство управления фактически является микропроцессорной системой и в нем осуществляется вычисление угловой скорости вращения рулона по отсчетам времени и по данным об угловом перемещении. Для уменьшения избыточного противонатяжения устройством управления формируется управляющее воздействие, подаваемое на привод постоянного тока, который вводит новое ограничение тока двигателя, разматывателя, уменьшая противонатяжение.

1.3. Теоретические основы моделирования динамических характеристик САР

Динамические характеристики САР определяются при стандартных входных воздействиях. В теории автоматического регулирования в качестве стандартных воздействий приняты:

- ступенчатая функция Хевисайда $x_{ax}(t) = A_{ax} \cdot 1(t)$;
- дельта-функция или функция Дирака $x_{ax}(t) = \delta(t)$;
- гармоническая функция $x_{ax}(t) = A_{ax} \sin \omega t$;

здесь A_{ax} – величина ступени или амплитуда входного воздействия, ω – угловая частота колебаний, t – время. В практике исследований САР наибольшее распространение получили ступенчатая и гармоническая функции. При задании гармонического входного сигнала анализируются частотные характеристики САР, а при задании ступенчатого входного сигнала – устойчивость и качество регулирования САР.

При исследовании динамических характеристик САР обычно считаются известными следующие данные о САР:

- принципиальная схема САР,
- объект регулирования и регулятор с указанием регулируемого параметра и регулирующего фактора,
- управляющее и возмущающее воздействия,
- числовые значения параметров САР.

Исследование САР начинается с описания назначения и принципа действия системы с четким выделением объекта регулирования и характерных элементов регулятора: чувствительного элемента; задающего устройства; элементов сравнения; усилителя; исполнительного механизма;

корректирующего элемента. Рассматривается состояние системы при установившемся режиме работы и в динамике при управляющем и возмущающем воздействиях [6].

Выделяются типовые звенья САР и для них выводятся дифференциальные уравнения. Типовым звеном представляется, как правило, объект регулирования и каждый характерный элемент регулятора. Вывод уравнения звена начинается с определения координат и выбора направления их отсчета. За положительные направления отсчета принимают такие, при движении по которым происходит процесс компенсации отклонения регулируемого параметра при действии возмущений или процесс установления нового его значения в соответствии с управляющим воздействием. Положительные направления перемещений элементов на схеме обозначают стрелками.

Для каждого из выделенных элементов принимаются упрощающие допущения, и на основе законов физики, механики, гидродинамики и газовой динамики записываются соответствующие уравнения. Например, для подвижных элементов записывается уравнение движения, а для элементов, связанных с протоком жидкости – уравнение расходной характеристики и баланса расходов. Если в выражение входят нелинейные зависимости, то производится их линеаризация путем разложения функций в ряд Тейлора около точки, соответствующей равновесному (установившемуся) режиму, с учетом первых двух членов разложения. Вводятся базисные величины, за которые обычно принимают значения параметров при данном установившемся режиме, и записываются уравнения звеньев в относительных координатах. Полученные уравнения звеньев сводят в систему уравнений и проверяют их "замкнутость". Число переменных в уравнениях (исключая управляющие и возмущающие воздействия) должно быть равно числу уравнений.

При наличии системы дифференциальных уравнений исследование динамических характеристик САР может быть выполнено различными методами. В теории автоматического регулирования наибольшее распространение получил операторный метод, основанный на преобразовании Лапласа [1].

Система дифференциальных уравнений представляется в операторной форме и для каждого из выделенных звеньев записывается передаточная функция $W(s) = \frac{\tilde{x}_{вых}}{\tilde{x}_{вх}}$ как отношение выходного параметра к входному в изображениях по Лапласу при нулевых начальных условиях. Для этого в дифференциальных уравнениях производится замена

$\frac{d}{dt} = s$, $\frac{d^2}{dt^2} = s^2$, …, а сами переменные записываются в изображениях по Лапласу: $\tilde{x}_{вых}$, $\tilde{x}_{вх}$. Например, для турбореактивного двигателя (ТРД) как объекта регулирования, описываемого дифференциальным уравнением

$$T_1 \frac{d\delta n}{dt} + \delta n = k_1 \delta G_T + k_2 \delta p_B^*,$$

операторное уравнение имеет вид

$$(T_1 s + 1)\delta\tilde{n} = k_1 \delta\tilde{G}_T + k_2 \delta\tilde{p}_B^*, \qquad (1)$$

где $\delta n = \frac{\Delta n}{n_0}$, $\delta G_T = \frac{\Delta G_T}{G_{T0}}$, $\delta p_B^* = \frac{\Delta p_B^*}{p_{B0}^*}$ – относительные приращения частоты вращения ротора двигателя, расхода топлива и давления заторможенного потока воздуха на входе в двигатель соответственно; T_1 – постоянная времени ТРД; k_1, k_2 – коэффициенты передачи по соответствующим воздействиям. Уравнение (1) может быть выражено через передаточные функции в виде

$$\delta\tilde{n} = \frac{k_1}{T_1 s + 1}\delta\tilde{G}_T + \frac{k_2}{T_1 s + 1}\delta\tilde{p}_B^*,$$

или

$$\delta\tilde{n} = W_1(s)\delta\tilde{G}_T + W_2(s)\delta\tilde{p}_B^*, \qquad (2)$$

где $W_1(s) = \frac{\delta\tilde{n}}{\delta\tilde{G}_T} = \frac{k_1}{T_1 s + 1}$ – передаточная функция ТРД по регулирующему воздействию (при $\delta\tilde{p}_B^* = 0$); $W_2(s) = \frac{\delta\tilde{n}}{\delta\tilde{p}_B^*} = \frac{k_2}{T_2 s + 1}$ – передаточная функция ТРД по возмущающему воздействию (при $\delta\tilde{G}_T = 0$).

Для получения компактных структурных схем иногда целесообразно уравнение (2) представить в форме

$$\delta\tilde{n} = W_1(s)\left[\delta\tilde{G}_T + \frac{k_2}{k_1}\delta\tilde{p}_B^*\right]. \qquad (3)$$

Составляется структурная схема САР. Для этого каждое звено обозначается в виде прямоугольника, внутри которого записывается выражение для передаточной функции; входной и выходной параметры обозначаются входящими и выходящими стрелками (см. рисунок 8). Затем звенья со-

единяются в соответствии с системой уравнений и правилами построения структурных схем. При этом четко выделяются: регулируемый параметр, управляющие и возмущающие воздействия; обратные связи. Структурные схемы отражают направления воздействий одного звена на другое, которые не всегда согласуются с направлениями физических параметров на принципиальных схемах, например, с направлением потока жидкости в элементах САР.

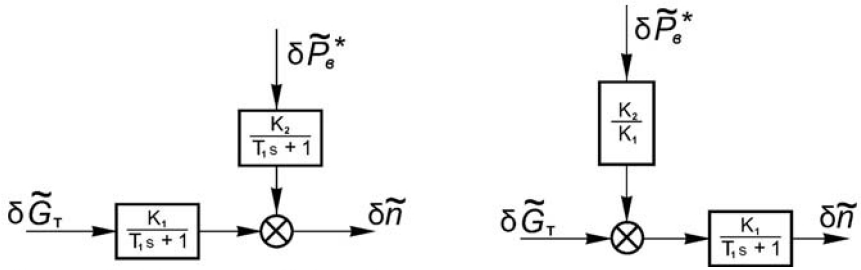


Рисунок 8. Обозначение ТРД как объекта регулирования в структурной схеме САР: а – по уравнению 2; б – по уравнению 3

Далее определяются характерные передаточные функции САР. Структурная схема САР условно размыкается между объектом регулирования и чувствительным элементом. Вводятся обозначения $\tilde{y}_{вх}$ – отклонение регулируемого параметра на входе в чувствительный элемент, а $\tilde{y}_{вых}$ – отклонение регулируемого параметра на выходе из объекта регулирования. Определяется передаточная функция системы в разомкнутом состоянии: $W_{раз}(s) = -\dfrac{\tilde{y}_{вых}}{\tilde{y}_{вх}} W_0(s) W_p(s)$. При этом в структурной схеме выделяются группы характерных соединений звеньев, которые заменяют эквивалентным звеном с передаточной функцией:

$W_{экв}(s) = \prod_{i=1}^{k} W_i(s)$ – при последовательном соединении звеньев;

$W_{экв}(s) = \sum_{i=1}^{k} W_i(s)$ – при параллельном согласном соединении звеньев;

$W_{экв}(s) = \dfrac{W(s)}{1 \pm W(s) W_{ос}(s)}$ – для звеньев, охваченных обратной связью, причем знак “+” для отрицательной обратной связи, а знак “–” для положительной. Примеры такого соединения звеньев можно увидеть на

рисунке 9. Для систем со сложной схемой используются специальные правила преобразования структурных схем [2, 3].

Передаточная функция замкнутой системы определяется, как и передаточная функция системы в разомкнутом состоянии, нахождением передаточных функций характерных соединений с применением правил преобразования структурных схем:

$W_{зам}(s) = \frac{\tilde{y}}{\tilde{x}}$ – передаточная функция замкнутой системы по управляющему воздействию (при $\tilde{f} = 0$);

$F(s) = \frac{\tilde{y}}{\tilde{f}}$ – передаточная функция замкнутой системы по возмущающему воздействию (при $\tilde{x} = 0$).

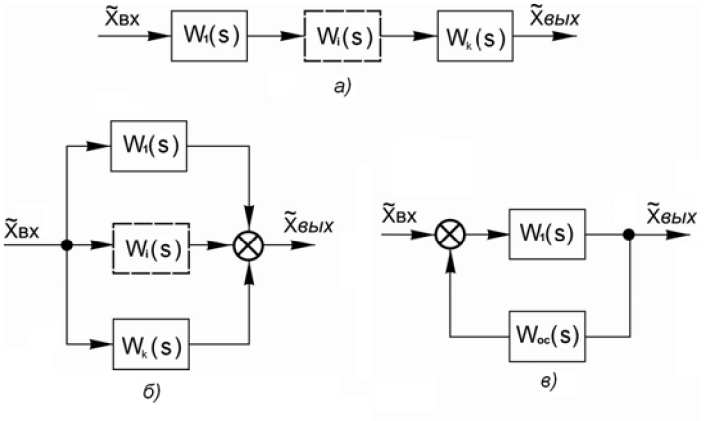


Рисунок 9. Структурные схемы характерных соединений звеньев САР

Определенные таким образом передаточные функции САР записываются в виде соотношений:

$$W_{раз}(s) = \frac{K_{раз}(s)}{D_{раз}(s)};\ W_{зам}(s) = \frac{K_{зам}(s)}{D_{зам}(s)};\ F(s) = \frac{K_f(s)}{D_{зам}(s)},$$

где $K_{раз}(s)$; $K_{зам}(s)$; $K_f(s)$ – операторы возмущения; $D_{раз}(s)$; $D_{зам}(s) = D_{раз}(s) + K_{раз}(s)$ – собственные операторы разомкнутой и замкнутой САР, представляющие собой полиномы по переменной s. На-

пример, для $W_{зам}(s)$, оператор возмущения и собственный оператор можно представить так:

$$K_{зам}(s) = b_0 s^m + b_1 s^{m-1} + \ldots + b_m;$$

$$D_{зам}(s) = a_0 s^n + a_1 s^{n-1} + \ldots + a_{n-1} s + a_n,$$

где b_i; a_i – постоянные коэффициенты, зависящие от параметров и режима работы САР.

На основании полученных выражений для передаточных функций записываются операторные уравнения для системы в целом:

$$\tilde{y} D_{зам}(s) = \tilde{x} K_{зам}(s);$$

$$\tilde{y} D_{зам}(s) = \tilde{f} K_f(s).$$

В этих уравнениях операторы возмущения $K_{зам}(s)$, $K_f(s)$ характеризуют возмущенное движение системы, а собственный оператор $D_{зам}(s)$ – свободное движение системы регулирования. Передаточные функции САР и операторные уравнения системы в целом могут быть получены не только по структурной схеме, но и из решения системы операторных уравнений звеньев, что является иногда предпочтительным.

Область устойчивости замкнутой САР строится в плоскости выбранного (заданного) параметра, за который обычно выбирается коэффициент передачи или постоянная времени, в которые входит легко изменяемый (перенастраиваемый) в процессе доводки САР физический параметр, например жесткость пружины, сопротивление дросселирующего элемента, давление питания рабочей жидкости гидроусилителей. Кривая D-разбиения (рисунок 10) строится в следующем порядке:

а) записывается собственный оператор или характеристический полином замкнутой системы $D_{зам}(s) = 0$, который решается затем относительно исследуемого параметра, например коэффициента T;

б) подставив численные значения остальных коэффициентов, входящих в уравнение, и заменив $s = j\omega$, определяют комплексное выражение $T = \mathrm{Re}T(\omega) + j\,\mathrm{Re}T(\omega)$;

в) на комплексной плоскости $\left[\mathrm{Re}T(\omega),\, j\,\mathrm{Re}T(\omega)\right]$ строится кривая D-разбиения, каждой точке которой соответствует вполне определенная частота колебаний ω, при этом частота ω изменяется от $-\infty$ до $+\infty$;

г) на кривой D-разбиения наносится штриховка с левой стороны по мере возрастания частоты ω.

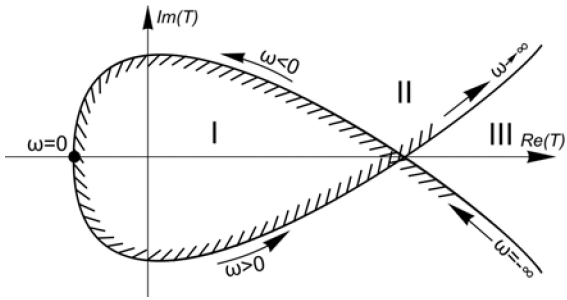


Рисунок 10. D-разбиение в плоскости параметра T : I – область устойчивой работы, II, III – области неустойчивой работы САР

Переход через кривую D-разбиения с незаштрихованной стороны в заштрихованную соответствует смене знака вещественной части одного корня характеристического уравнения с “+” на “–”, т. е. переходу системы в более устойчивое состояние. Обратный переход соответствует обратной смене знака. С использованием этого правила выделяется область изменения коэффициента T, в которой реализуется большее число корней с отрицательной вещественной частью. Выбрав из этой области значение T (по действительной оси), проверяют устойчивость САР. Если система устойчива, то она будет устойчива во всей выделенной области, если неустойчива, то никаким изменением параметра Т нельзя сделать систему устойчивой.

Устойчивость САР проверяется использованием алгебраического критерия устойчивости Рауса-Гурвица или частотных критериев Михайлова и Найквиста. При проверке устойчивости по критерию Рауса-Гурвица составляется определитель Гурвица:

$$\Delta = \begin{bmatrix} a_1 & a_3 & a_5 & \dots & 0 \\ a_0 & a_2 & a_4 & & \vdots \\ 0 & a_1 & a_3 & & \vdots \\ \vdots & a_0 & a_2 & & \vdots \\ \vdots & 0 & a_1 & & \vdots \\ \vdots & \vdots & a_0 & & 0 \\ 0 & 0 & 0 & & a_n \end{bmatrix}$$

где a_0, a_1, … , a_n – коэффициенты собственного оператора системы $D(s)$. Для устойчивости САР при $a_0 > 0$ необходимо и достаточно, чтобы определитель Δ и его $n-1$ диагональных минора (выделены штриховыми линиями) были положительны. Для системы с характеристическими уравнениями третьего порядка $(n = 3)$ определитель Гурвица записывается в виде

$$\Delta = \begin{bmatrix} a_1 & a_3 & 0 \\ a_0 & a_2 & 0 \\ 0 & a_1 & a_3 \end{bmatrix},$$

и при $a_0 > 0$ условие устойчивости выражается неравенствами

$$\begin{cases} a_1 > 0, \\ a_1 a_2 - a_0 a_3 > 0, \\ a_3 > 0. \end{cases}$$

При проверке устойчивости САР по частотному критерию Михайлова на комплексной плоскости строится годограф Михайлова и анализируется его расположение относительно начала координат. Годограф Михайлова (рисунок 11) строится по характеристическому полиному $D_{зам}(s)$ заменой $s = j\omega$ и представлением его в виде

$$D_{зам}(j\omega) = \mathrm{Re}\, D_{зам}(\omega) + j\, \mathrm{Im}\, D_{зам}(\omega).$$

Каждой точке годографа Михайлова соответствует определенная частота колебаний ω. Для устойчивости САР необходимо и достаточно, чтобы при увеличении частоты колебаний ω от 0 до $+\infty$ вектор годографа Михайлова охватил последовательно в положительном направлении (против часовой стрелки) столько квадрантов, каков порядок характеристического полинома.

Критерии устойчивости Рауса-Гурвица и Михайлова применяются при анализе устойчивости как замкнутых, так и разомкнутых САР с соответствующими собственными операторами $D_{зам}(s)$, $D_{раз}(s)$.

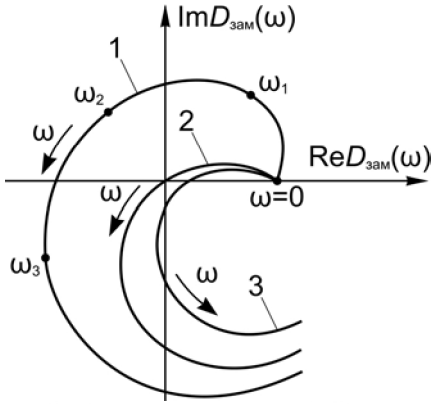


Рисунок 11. Годограф Михайлова замкнутых САР с характеристическим уравнением четвертого порядка: 1 – устойчивой; 2 – находящейся на границе устойчивости; 3 – неустойчивой САР

Частотный критерий устойчивости Найквиста применяется при анализе устойчивости замкнутой САР по расположению ее амплитудно-фазочастотной характеристики (АФЧХ) в разомкнутом состоянии $W_{раз}(j\omega)$ относительно точки на действительной оси с координатой $(-1, j0)$. АФЧХ разомкнутой САР (рисунок 12) строится по передаточной функции $W_{раз}(s) = \dfrac{K_{раз}(s)}{D_{раз}(s)}$ заменой $s = j\omega$ и представлением ее в виде

$$D_{раз}(j\omega) = \mathrm{Re}\, D_{раз}(\omega) + j\, \mathrm{Im}\, D_{раз}(\omega).$$

При проверке устойчивости замкнутой САР по критерию Найквиста необходимо знать ее устойчивость в разомкнутом состоянии, причем если разомкнутая САР неустойчива, то нужно знать, сколько корней характеристического полинома обладают положительной вещественной частью. Для этого анализируется собственный оператор разомкнутой САР $D_{раз}(s)$ по критерию Рауса-Гурвица или Михайлова.

В технике, как правило, применяются устойчивые и нейтральные (содержащие в прямой цепи регулирования интегрирующее типовое звено) САР в разомкнутом состоянии. Поэтому в книге приводится оценка устойчивости только таких систем.

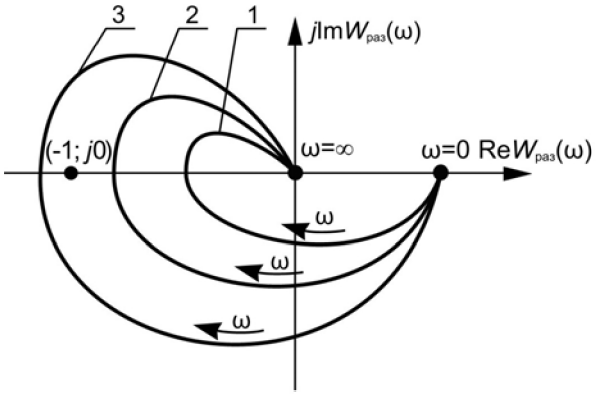


Рисунок 12. Амплитудофазочастотные характеристики устойчивых разомкнутых САР, соответствующие: 1 – устойчивой; 2 – находящейся на границе устойчивости;3 – неустойчивой замкнутой САР

Для устойчивости замкнутой САР, устойчивой в разомкнутом состоянии, необходимо и достаточно, чтобы при изменении частоты колебаний ω от $-\infty$ до $+\infty$ АФЧХ системы в разомкнутом состоянии не охватывала точку с координатой $(-1; j0)$ (см. рисунок 12). Это же правило справедливо и для нейтральных (астатических) разомкнутых САР (рисунок 13). АФЧХ астатической САР берет начало (при $\omega = 0$) в $-\infty$ вдоль мнимой оси. При оценке устойчивости САР по критерию Найквиста такую АФЧХ дополняют дугой бесконечно большого радиуса (см. рисунок 13, пунктирная линия). Более подробно с оценкой устойчивости по критерию Найквиста можно ознакомиться в специальной литературе [1, 2, 3].

Расчет границ D-разбиения в плоскости выбранного параметра, а также расчет частотных характеристик САР при оценке ее устойчивости облегчается, если воспользоваться персональным компьютером и специально разработанными пакетами программ расчета (см. раздел 2).

Строится переходная характеристика или переходная функция $y(t)$ и анализируется качество регулирования САР при ступенчатом управляющем $x(t) = X_0[1(t)]$ или ступенчатом возмущающем $f(t) = F_0[1(t)]$ воздействиях. Переходный процесс в САР определяется в результате интегрирования дифференциального уравнения САР при нулевых начальных условиях. Для САР, описываемой дифференциальным уравнением высокого порядка, переходный процесс определяется по вещественным частотным характеристикам систем или с использованием вычислительных машин.

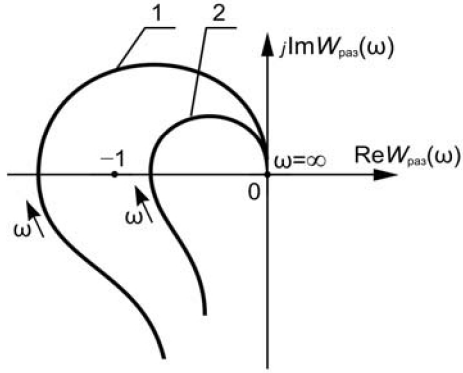


Рисунок 13. Амплитудно-фазочастотные характеристики астатических САР, соответствующие 1 – устойчивой; 2 – неустойчивой системе в замкнутом состоянии.

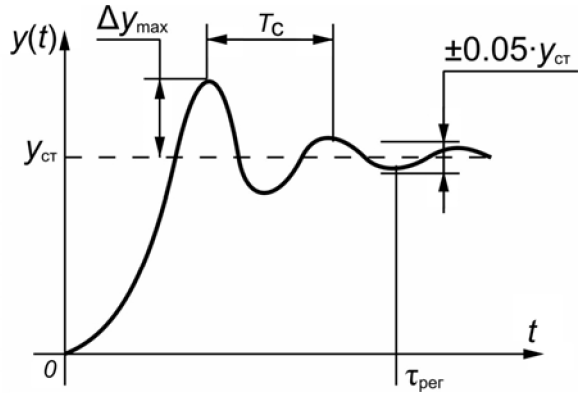


Рисунок 14. Переходная характеристика замкнутой САР при ступенчатом управляющем воздействии $x(t) = X_0[1(t)]$

В результате построения и анализа переходной функции определяются основные показатели качества регулирования САР. При управляющем воздействии (рисунок 14) такими показателями являются:

$\tau_{\max}^{упр} = \dfrac{\Delta y_{max}}{y_{уст}} 100\%$ – величина перерегулирования;

$\tau_{рег}$ – время регулирования, в течение которого заканчивается переходный процесс в пределах заданной погрешности, например 5% от $y_{уст}$.

$\omega_c = \dfrac{2\pi}{T_c}$ – угловая частота собственных колебаний;

N – число периодов колебаний за время переходного процесса.

При возмущающем воздействии (рисунок 15) показателями качества регулирования являются:

$\sigma_{max}^{возм} = \Delta y_{max}$ – величина перерегулирования;

$\tau_{рег}$ – время регулирования, в течение которого заканчивается переходный процесс в пределах заданной погрешности, например ±5% от $y_{ст}$ для статической САР, или ±5% от Δy_{max} для астатической САР;

N – число периодов колебаний за время переходного процесса;

$\omega_c = \dfrac{2\pi}{T_c}$ – угловая частота собственных колебаний САР.

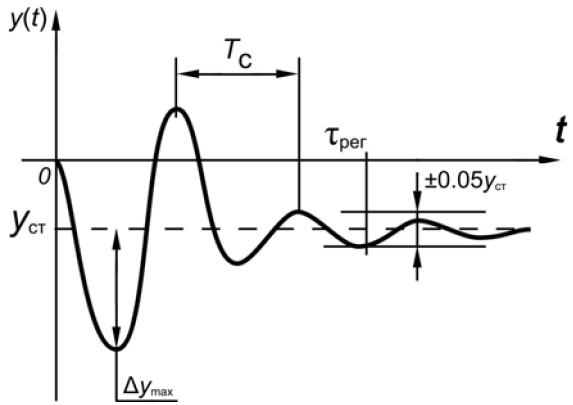


Рисунок 15. Переходная характеристика замкнутой САР при ступенчатом возмущающем воздействии $f(t) = F_0[1(t)]$

Чем меньше значения показателей качества регулирования, тем лучше переходная характеристика САР, т.е. тем лучше работает регулятор. Оценка качества регулирования САР может проводиться и по другим по-

казателям при других входных воздействиях, например при постоянной скорости нарастания управляющего или возмущающего воздействий.

Выбор параметров САР, при которых удовлетворяются заданные показатели качества регулирования, обычно осуществляется с использованием различных методов теории автоматического регулирования, например по распределению корней характеристического уравнения, по интегральным оценкам качества переходного процесса [7].

При выборе параметров САР основное внимание уделяется ограничению перерегулирования и времени переходного процесса за счет изменения параметра D-разбиения. При этом из выделенной области устойчивости выбираются от двух до четырех положительных значений этого параметра, и для каждого из них строится переходный процесс. Здесь следует иметь в виду, что при значениях параметров, взятых близко к границе устойчивости, реализуется колебательный переходный процесс с большим перерегулированием.

1.4. Алгоритм расчета динамических характеристик САР

Исследование динамических характеристик САР на ПК с самостоятельной разработкой алгоритмов и программ расчета приводит к большим затратам времени исследователя и не позволяет ему сосредоточить основное внимание на анализе решения самой задачи. Поэтому разрабатываются программы решения стандартных задач динамики систем, реализация которых в диалоговом режиме дает высокий эффект в обучении и приобретении навыков исследования САР с использованием вычислительных машин.

В данном разделе пособия приведены алгоритм расчета частотных и переходных характеристик САР.

Исходными данными при расчете динамических характеристик САР являются: выражение для D-разбиения, представленного в операторной форме; передаточные функции САР.

При расчете D-разбиения в плоскости параметра $T(s)$ исходная зависимость представляется в следующей стандартной форме:

$$T(s) = \frac{B(s)}{A(s)} = \frac{\beta_0 s^m + \beta_1 s^{m-1} + \ldots + \beta_{m-1} s + \beta_m}{\alpha_0 s^n + \alpha_1 s^{n-1} + \ldots + \alpha_{n-1} s + \alpha_n}, \qquad (4)$$

где $\beta_0 \ldots \beta_m$; $\alpha_0 \ldots \alpha_n$ – постоянные коэффициенты, зависящие от параметров САР. В процессе расчета D-разбиения с заменой $s = j\omega$, для дальнейших расчетов могут понадобиться действительная и мнимая части числителя и знаменателя частотной функции $T(j\omega)$:

$$T(j\omega)=\frac{\mathrm{Re}\,B(\omega)+j\,\mathrm{Im}\,B(\omega)}{\mathrm{Re}\,A(\omega)+j\,\mathrm{Im}\,A(\omega)},$$

где

$$\mathrm{Re}\,B(\omega)=\beta_m-\beta_{m-1}\omega^2+\beta_{m-4}\omega^4-\ldots;$$
$$\mathrm{Im}\,B(\omega)=\beta_{m-1}\omega-\beta_{m-3}\omega^3+\beta_{m-5}\omega^5-\ldots;$$
$$\mathrm{Re}\,A(\omega)=\alpha_n-\alpha_{n-2}\omega^2+\alpha_{n-4}\omega^4-\ldots;$$
$$\mathrm{Im}\,A(\omega)=\alpha_{n-1}\omega-\alpha_{n-3}\omega^3+\alpha_{n-5}\omega^5-\ldots.$$

Результаты расчета удобнее записать в следующей форме:

$$T(j\omega)=\mathrm{Re}\,T(\omega)+j\,\mathrm{Im}\,T(\omega)=|T(\omega)|\cdot e^{j\cdot ArgT(\omega)},$$

где

$$\mathrm{Re}\,T(\omega)=\frac{\mathrm{Re}\,B(\omega)\mathrm{Re}\,A(\omega)+\mathrm{Im}\,B(\omega)\mathrm{Im}\,A(\omega)}{\mathrm{Re}^2\,A(\omega)+\mathrm{Im}^2\,A(\omega)}$$ –

– действительная часть частотной функции,

$$\mathrm{Im}\,T(\omega)=\frac{\mathrm{Re}\,A(\omega)\mathrm{Im}\,B(\omega)-\mathrm{Re}\,B(\omega)\mathrm{Im}\,A(\omega)}{\mathrm{Re}^2\,A(\omega)+\mathrm{Im}^2\,A(\omega)}$$ –

– мнимая часть частотной функции,

$$|T(\omega)|=\sqrt{\frac{\mathrm{Re}^2\,B(\omega)+\mathrm{Im}^2\,B(\omega)}{\mathrm{Re}^2\,A(\omega)+\mathrm{Im}^2\,A(\omega)}}$$ – модуль частотной функции;

$$\arg T(\omega)=\mathrm{arctg}\frac{\mathrm{Im}\,B(\omega)}{\mathrm{Re}\,B(\omega)}-\mathrm{arctg}\frac{\mathrm{Im}\,A(\omega)}{\mathrm{Re}\,A(\omega)}$$ – аргумент частотной функции $T(\omega)$.

Устойчивость САР по частотному критерию Михайлова определяется по собственному оператору замкнутой (разомкнутой) САР, заданной в виде

$$D(s)=a_0s^n+a_1s^{n-1}+\ldots+a_{n-1}s+a_n,$$

где $a_0\ldots a_n$ – коэффициенты, зависящие от параметров САР. В программе расчета предусмотрена замена $s=j\omega$ и определение частотной функции $D(j\omega)$:

$$D(j\omega)=\mathrm{Re}\,D(\omega)+j\,\mathrm{Im}\,D(\omega)=|D(\omega)|e^{j\mathrm{Arg}D(\omega)},$$

где $\mathrm{Re}\,D(\omega)=a_n-a_{n-2}\omega^2+a_{n-4}\omega^4-\ldots$ – действительная часть частотной функции;

$\mathrm{Im}\,D(\omega)=a_{n-1}\omega-a_{n-3}\omega^3+a_{n-5}\omega^5-\ldots$ – мнимая часть частотной функции;

$|D(\omega)|=\sqrt{\mathrm{Re}^2\,D(\omega)+\mathrm{Im}^2\,D(\omega)}$ – модуль частотной функции;

$\arg D(\omega)=\mathrm{arctg}\dfrac{\mathrm{Im}\,D(\omega)}{\mathrm{Re}\,D(\omega)}$ – аргумент частотной функции;

При оценке устойчивости замкнутой САР по критерию Найквиста передаточная функция системы в разомкнутом состоянии записывается в виде

$$W_p(s)=\frac{d_0s^m+d_1s^{m-1}+\ldots d_{m-1}s+d_m}{c_0s^n+c_1s^{n-1}+\ldots c_{n-1}s+c_n},$$

где $c_0\ldots c_n$, $d_0\ldots d_n$ – постоянные коэффициенты, зависящие от параметров системы. Алгоритм расчета АФЧХ разомкнутой САР аналогичны алгоритму расчета D-разбиения (см. формулу (4)).

Определение переходной характеристики производится по передаточной функции САР по управляющему или возмущающему воздействию:

$$W(s)=\frac{\tilde{y}}{\tilde{x}}=\frac{b_0s^m+b_1s^{m-1}+\ldots+b_{m-1}s+b_m}{a_0s_n+a_1s^{n-1}+\ldots+a_{n-1}s+a_n}. \qquad (5)$$

Выражение (5) соответствует линейному дифференциальному уравнению

$$\begin{aligned}&\left(a_0p^n+a_1p^{n-1}+\ldots+a_{n-1}p+a_n\right)y(t)=\\&=\left(b_0p^m+b_1p^{m-1}+\ldots+b_{m-1}p+b_m\right)x(t),\end{aligned} \qquad (6)$$

где $y(t)$ – регулируемый параметр; $x(t)$ – управляющее или возмущающее воздействия; $a_0\ldots a_n$, $b_0\ldots b_m$ – постоянные коэффициенты; $p=\dfrac{d}{dt}$ - оператор дифференцирования.

Для отыскания решения уравнения (6) необходимо определить корни характеристического уравнения и постоянные интегрирования, учитывающие начальные условия. Операция вычисления корней и решение системы уравнения для отыскания постоянных интегрирования представляет собой трудоёмкий процесс, особенно для систем высокого порядка. Рас-

четы получаются более простыми в том случае, когда правая часть уравнения равна нулю, т.е. имеется однородное дифференциальное уравнение.

Для типового входного воздействия вида единичной ступенчатой функции сведение неоднородного уравнения (6) к однородному может быть выполнено переходом к другой переменной. Предполагается, что $x(t) = 1(t)$, причем единица имеет размерность переменной, стоящей в правой части (6). Тогда установившееся значение $y(t)$ при $t \to \infty$ можно найти из (6), предполагая все производные равные нулю:

$$y(\infty) = y_{уст} = \frac{b_m}{a_n}.$$

Это установившееся значение представляет собой частное решение неоднородного уравнения (6), т. е. $y_B(t) = y_{уст}$.

Вводится новая переменная $z(t) = y(t) - y_в(t) = y(t) - y_{уст}$, тогда уравнение (6) с новой переменной перепишется в виде

$$a_0 \frac{d^n z}{dt^n} + a_1 \frac{d^{n-1} z}{dt^{n-1}} + \ldots + a_{n-1} \frac{dz}{dt} + a_n z = 0. \qquad (7)$$

Решение однородных уравнений не представляет затруднений. При известном решении $z(t)$ переход к переменной $y(t)$ осуществляется по формуле

$$y(t) = z(t) + y_{уст} = z(t) + \frac{b_m}{a_n}.$$

При решении уравнений используются начальные условия до ступенчатого воздействия (y_{-0}) и после (y_{+0}) и эти условия будут различные. Для простоты расчетов для времени $t = 0$ (до воздействия) почти всегда принимают нулевые начальные условия, т.е. $y_{-0} = 0$; $y'_{-0} = 0$; $y''_{-0} = 0$ и т. д. В дальнейшем под нулевыми начальными условиями будут иметься в виду именно эти равенства.

Начальные условия, реализующиеся непосредственно после приложения ступенчатого воздействия, т.е. при $t = +0$, можно определить из исходного дифференциального уравнения (6).

Для первых $n - m - 1$ начальных условий имеют место равенства:

$$
\begin{aligned}
y_{+0} &= y_{-0};\\
y'_{+0} &= y'_{-0}\\
\dots &\quad \dots \quad \dots\\
y_{+0}^{(n-m-1)} &= y_{-0}^{(n-m-1)}
\end{aligned}
$$

Таким образом, для самой переменной y и первых $(n-m-1)$ производных начальные условия сохраняются и после приложения ступенчатого воздействия. Для остальных начальных условий выполняются соотношения (8).

В формулах (8) множитель 1 имеет размерность $x(t)$. Если воздействие прикладывается в виде скачка, не равного единице, то вместо единицы следует поставить величину скачка. Из формул (8) ясно, что только при $m=0$, т.е. для дифференциального уравнения $D(p)y(t)=b_m x(t)$, при ступенчатом воздействии, начальные условия при $t=+0$ соответствуют начальным условиям при $t=-0$.

$$
\begin{aligned}
y_{+0}^{n-m} &= y_{-0}^{(n-m)}+\frac{b_0}{a_0};\\
y_{+0}^{(n-m+1)} &= y_{-0}^{(n-m+1)}\frac{b_1}{a_0}-\frac{a_1}{a_0}\left[y_{+0}^{(n-m)}-y_{-0}^{(n-m)}\right]\\
\dots &\quad \dots \quad \dots\\
y_{+0}^{(n-1)} &= y_{-0}^{(n-1)}+\frac{b_{m-1}}{a_0}-\frac{a_{m-1}}{a_0}\left[y_{+0}^{(n-m)}-y_{-0}^{(n-m)}\right]-\dots\\
&\quad \dots-\frac{a_1}{a_0}\left[y_{+0}^{(n-2)}-y_{-0}^{(n-2)}\right]
\end{aligned}
\qquad (8)
$$

Интегрирование (нахождение корней) дифференциального уравнения (7) производится численным методом Рунге-Кутта четвертого порядка [4].

Часть 2. Использование программных комплексов для моделирования процессов управления в технических системах

Сегодня трудно представить себе процесс проектирования сложной технической системы без применения компьютера. И для проектирования устройств управления также разработаны многочисленные специализированные программные продукты. Речь идет не о программах общематематического назначения, таких как MathCad, Axion или Maple – существует много программных продуктов, которые в процессе проектирования реализуют именно принципы создания и моделирования устройств автоматического управления.

В данной главе изложены основные приемы работы с тремя популярными программными продуктами, специализированными под разработку устройств автоматики, механизмов и алгоритмов автоматического управления.

Пакет Simulink является частью большого программного пакета MATLAB[6, 10], произведенного кампанией MathSoft. Эта программа позволяет также создавать виртуальную панель управления, отображающуюся на дисплее, и использовать в работе модели данные, поступающие напрямую с устройства сбора данных. К его достоинствам можно отнести открытость для обмена данными различных форматов, хороший интерфейс для визуального проектирования, недостатком же является то, что он не может использоваться независимо от пакета MATLAB, стоимость которого довольно высока. Весьма требователен этот пакет и к вычислительным ресурсам ПК.

Пакет программ LabView [11] американской кампании National Instruments специализирован для работы с оборудованием сбора измерительных данных и осуществляет обработку данных согласно визуально заданной структурной схеме. Относительно других пакетов LabView обладает меньшей наглядностью, в то же время позволяет создавать программные продукты, специализированные для сложных процессов измерения и регулирования – так называемые виртуальные инструменты. Еще LabView позволяет использовать виртуальные инструменты в качестве пользовательских программ в промышленных контроллерах National Instruments.

Каждый виртуальный инструмент состоит из двух частей – собственно структурной схемы, которая преобразуется в алгоритм, исполняемый на компьютере или загружаемый в контроллер, и виртуальной панели управления, отображаемой на мониторе управляющего компьютера.

Достоинства пакета – возможность простой стыковки реальных технических систем и программных продуктов, а также ориентация на промышленное использование. Недостатки – своеобразность схемотехнического языка и высокая требовательность к ресурсам. Обладает большим быстродействием, чем MATLAB.

Программный комплекс МВТУ ("Моделирование в технических устройствах") [5], разработанный в Московском Государственном Техническом Университете имени Н. Э. Баумана, является распространенным учебным программным пакетом для моделирования устройств автоматики, имеет набор специализированных функций, использование которых позволяет быстро получить характеристики исследуемой модели. Достоинства: простота, дешевизна, невысокая требовательность к ресурсам, приспособленность к использованию в процессе обучения.

2.1. Работа с пакетом МВТУ

2.1.1. Назначение, режимы работы, особенности и достоинства программного комплекса МВТУ

Программный комплекс [5] – современная среда интеллектуального САПР, предназначенная для детального исследования и анализа динамических процессов в системах автоматического управления (САУ), в следящих приводах и роботах, в ядерных и тепловых энергоустановках, в любых технических системах, описание динамики которых может быть реализовано методами структурного моделирования. Может использоваться для моделирования нестационарных процессов в физике, в электротехнике, в динамике машин и механизмов, в астрономии и т.д., а также для решения нестационарных краевых задач (теплопроводность, гидродинамика и др.). Может функционировать в сетевых моделирующих комплексах, в том числе и в режиме удаленного доступа к технологическим и информационным ресурсам.

МВТУ является альтернативой программным продуктам MATRIXx, Simulink, VisSim и др.

Реализует режимы работы:

Режим "Моделирование", обеспечивающий:

- моделирование динамических процессов в непрерывных, дискретных и гибридных САУ с анализом топологии структурной схемы, диагностикой и развязкой алгебраических контуров;
- рестарт задачи ("безударное" продолжение расчета), архивацию и воспроизведение результатов моделирования;
- редактирование параметров структурной схемы и расчета, в режиме "online";

- расчет в масштабе реального времени (если позволяют технические возможности компьютера) или при масштабировании модельного времени.

Режим “Оптимизация”, позволяющий решать задачи:

- параметрической оптимизации САУ и идентификации опытных данных;
- синтеза оптимальных регуляторов и оптимального управления в многокритериальной постановке при наличии ограничений на значения динамических переменных, управляющих воздействий, параметров элементов системы автоматического управления, функционалов качества.

Режим “Частотный анализ”, обеспечивающий расчет амплитудно-фазовых частотных характеристик для любой линейной и большинства нелинейных систем управления (годограф АФЧХ, ЛАХ, ФЧХ и др.).

Программный комплекс “МВТУ” имеет следующие достоинства:

- открытость за счет реализации в ПК МВТУ нескольких механизмов обмена данными с внешними расчетными программами, а также за счет встроенного в ПК интерпретатора математических функций;
- принцип вложенности структур (глубина вложенности не ограничена), что особо актуально при моделировании сложных динамических систем;
- векторизация алгоритмов передачи и обработки данных за счет реализации линий связи типа «шина» данных и векторизации входов/выходов практически всех типовых блоков;
- наличие наиболее полной общетехнической библиотеки типовых блоков и ряда специализированных библиотек, в т. ч. теплофизических свойств основных рабочих тел;
- наличие библиотеки “контроль и управление”, что позволяет формировать в ПК МВТУ панели (щиты) приборов для отображения и оперативного управления моделируемой системой в процессе расчета;
- 14 алгоритмов интегрирования, включая 10 новых эффективных алгоритмов (7 явных и 3 неявных) для жестких систем дифференциальных уравнений;
- функционирование в любой версии WINDOWS, наличие подробной контекстной справочной системы, эффективность в отраслевых разработках и учебном процессе.

2.1.2. Панель инструментов главного окна

Главное окно имеет специальные кнопки (см. рисунок 16), реализующие различные функции (далее – командные кнопки).

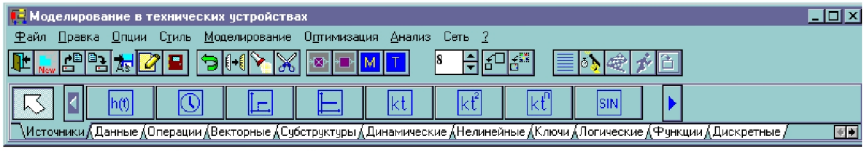


Рисунок 16. Панель инструментов главного окна

Ниже приведен список таких функций: слева указана пиктограмма и название кнопки, а справа краткое описание назначения кнопки.



Новый

Открывает схемное окно нового проекта (задачи).



Открыть

Открывает окно считывания с диска ранее созданной структурной схемы динамической задачи (по умолчанию вызывается корневой каталог с указанием файлов, имеющих расширение *.prj*).



Сохранить

Сохраняет структурную схему и параметры (по умолчанию файл с расширением *.prj*), включая метод, параметры интегрирования, окна отображения результатов расчета и т. п.



Вырезать

Удаляет выделенный блок или фрагмент структурной схемы с сохранением его в буфере обмена.



Копировать

Копирует выделенный блок или фрагмент структурной схемы в буфер обмена.



Вставить

Копирует в схемное окно содержимое буфера обмена.



Выделить всё

Выделяет полностью содержимое активного схемного окна.



Увидеть всю схему

Отображает всю структурную схему проекта в схемном окне текущего размера (с изменением масштаба отображения).



Показать выделения

Отображает в схемном окне текущего размера выделенный участок проекта (с изменением масштаба отображения).



Параметры счета

Вызывает диалоговое окно выбора метода интегрирования, установки времени, шага интегрирования, точности.



Старт

Выполняет первый этап запуска проекта на счет, проводя инициализацию всех блоков и линий связи в схемных окнах проекта на нулевом шаге проектирования.



Стоп

Завершает расчет с сохранением в оперативной памяти параметров модели и состояния системы.



Продолжить

Запускает задачу (проект) на счет, если команда “Старт” не выполнялась; запускает задачу на продолжение счета, если команда “Старт” выполнялась; продолжает процесс моделирования до конца, если он был прерван кнопкой (командой) “Пауза”.



Пауза

Прерывает процесс расчета с сохранением в оперативной памяти параметров текущего состояния системы.



Исключить блок

Выключает блок (группу блоков) из динамической модели; фон блоков становится черным.



Включить блок

Включает ранее выключенные блоки в динамическую модкль; цвет фона блоков меняется на исходный.



Заморозить

Кнопка (М – “мороз”) предназначена для поддержания в процессе моделирования постоянным сигнала на выходе динамического блока и равного начальным условиям для данного блока



Разморозить

Кнопка (Т – “тепло”) отменяет команду “Заморозить”.



Параметры макроблока

При активном главном схемном окне открывает окно глобальных параметров проекта (посредствоа редактора интерпретатора математических функций). При активном субмодельном схемном окне – окне глобальных параметров макроблока (субмодели).



Справка

Открывает окно контекстной справочной системы программного комплекса “МВТУ”.



Поиск блока

Открывает диалоговое окно поиска блока в структурной схеме по отличительным признакам (тип блока, название, и т. п.).



Продолжить

Продолжает поиск блоков в структурной схеме по выбранному отличительному признаку (тип блока, название блока, и т. п.)

поиск блока



Поиск переменной

Оказывает диалоговое окно поиска переменной в структурной схеме по ряду отличительных признаков (имя глобальной переменной, источник переменной или ссылка на переменную).



Продолжить поиск переменной

Продолжает поиск переменной в структурной схеме по выбранному отличительному признаку (имя глобальной переменной или ссылка на переменную).



Выйти

Завершает сеанс работы в среде программного комплекса с предложением сохранить текущую структурную схему.

Кроме вышеуказанных, в центральной части панели инструментов расположена панель ввода параметра с кнопками увеличения и уменьшения, предназначенная для ручного масштабирования изображения в активном схемном окне. Значение параметра соответствует шагу узлов сетки схемного окна в пикселях.

2.1.3. Панель типовых блоков

В настоящем программном комплексе библиотека типовых блоков состоит (условно) из общетехнической и специализированных библиотек. Доступ к блокам осуществляется с панели типовых блоков, расположенной на экране монитора под командными кнопками.

Панель типовых блоков состоит из отдельных библиотек, переключение которых осуществляется однократным щелчком левой кнопки «мыши» в поле закладки с соответствующим названием. Так как все закладки не умещаются по длине панели, в ее правом нижнем углу предусмотрены кнопки перемещения по всей области закладок.

Каждая из библиотек содержит от 2 до 20 блоков. Те библиотеки, которые не вмещаются по длине панели, можно перемещать кнопками в начале и конце панели.

В составе данной версии программного комплекса МВТУ содержится 15 отдельных библиотек, сгруппированных в основном по функциональному признаку. Их список приведен ниже.

Библиотека “Источники входных сигналов”:

- модельное время (часы),
- константа,
- ступенчатое воздействие,
- многоступенчатое воздействие,
- произвольное кусочно-линейное воздействие,
- линейное воздействие,
- квадратичное воздействие,
- полиномиальное воздействие,
- гиперболическое воздействие,
- синусоидальное воздействие,
- экспоненциальное воздействие,
- нормальный шум,
- равномерный шум,
- пила,
- обратная пила,
- треугольное воздействие,
- меандр,
- текущий шаг интегрирования.

Библиотека “Данные”:

- графическое окно 1 (временной график),
- графическое окно 2 (фазовая плоскость),
- графическое окно 3 (пространственный график),
- запись в файл,
- считывание из файла,
- считывание из таблицы.

Библиотека “Операции математические”:

- суммирование,
- умножение,
- векторное суммирование,
- векторное умножение,
- деление (скалярное, векторное),
- модуль,
- знак,
- усиление.

Библиотека “Векторные операции”:

- мультиплексор,
- демультиплексор,
- векторный размножитель скалярного сигнала,

- векторный размножитель векторных сигналов,
- распаковка матрицы входного сигнала,
- запаковка матрицы выходного сигнала,
- выборка из вектора входа,
- компенсатор начальных условий,
- решение системы ЛАУ,
- перемножение матрицы на вектор.

Библиотека “Субструктуры ”:

- макроблок,
- порт входа,
- порт выхода,
- в память (“передатчик”),
- из памяти (“приемник”),
- останов,
- заметка,
- комментарий.

Библиотека “Функции математические”:

- размножитель,
- линейная функция,
- квадратичная функция,
- полиномиальная функция,
- гиперболическая функция,
- экспонента,
- синус,
- арксинус,
- арккосинус,
- арктангенс,
- арккотангенс,
- синус гиперболический,
- косинус гиперболический,
- тангенс гиперболический,
- котангенс гиперболический,
- степенная функция,
- показательная функция,
- показательно-степенная функция ,
- логарифм натуральный,
- логарифм десятичный.

Библиотека “Динамические звенья”:

- динамическое звено общего вида,

- идеальное интегрирующее звено,
- интегратор с насыщением,
- интегратор с изменяемыми начальными условиями,
- апериодическое звено 1-го порядка,
- колебательное звено,
- инерционно-интегрирующее звено,
- инерционно-форсирующее звено,
- переменные состояния,
- “новый” блок,
- идеальное запаздывающее звено.

Библиотека “Нелинейные звенья”:

- квадратичный функционал качества,
- линейное звено с насыщением,
- линейное звено с зоной нечувствительности,
- линейное звено с насыщением и зоной нечувствительности,
- релейное неоднозначное,
- релейное неоднозначное, с зоной нечувствительности,
- зазор,
- люфт,
- излом,
- произвольная однозначная нелинейность,
- запоминание минимума,
- запоминание максимума,
- запоминание макс. и мин. из двух скалярных сигналов,
- запоминание макс. и мин. из n векторных сигналов,
- переменное транспортное запаздывание,
- дифференцирование,
- ограничение скорости изменения,
- “дельта-функция”.

Библиотека “Логические звенья”:

- универсальный блок булевой логики,
- логическое “и”,
- логическое “или”,
- логическое “не”,
- “равно”,
- “не равно”,
- “больше”,
- “больше или равно”,
- “меньше”,
- “меньше или равно”,

- исключающее “или” с отрицанием и без него,
- временное подтверждение,
- m из n (событийная логика),
- триггер.

Библиотека “Ключи”:

- управляемый ключ (в режиме “on-line”),
- ключи амплитудные (4 блока),
- ключи временные (4 блока),
- ключ интегратора.

Библиотека “Дискретные звенья”:

- задержка на один шаг интегрирования,
- экстраполятор нулевого порядка,
- запаздывание дискретное,
- дифференцирование дискретное,
- разность нулевого порядка,
- передаточная функция общего вида,
- передаточная функция от обратного аргумента,
- переменные состояния,
- ПИД-регулятор.

Библиотека “Внешние”:

- экспорт/импорт через файл прямого доступа (5 блоков),
- экспорт/импорт через протокол TCP/IP (2 блока) ,
- dll-библиотека.

2.1.4. Основные этапы работы в среде ПК «МВТУ»

В данном подразделе рассматриваются только основные приемы работы, освоение которых является обязательным условием для самостоятельной работы в среде программного комплекса.

Команды и опции выполняются либо посредством меню главного окна, либо посредством командных кнопок, назначение которых уже было приведено выше.

Формирование, редактирование структурной схемы проекта (задачи), ввод параметров блоков, начальных условий, выбор метода и параметров интегрирования проводятся с использованием как специальных графических интерфейсных элементов, так и посредством пунктов меню, или сочетаний клавиш.

Структурную схему исследуемой задачи рекомендуется предварительно изобразить на черновике примерно в том же виде, в каком Вы желаете видеть ее на экране монитора.

Формирование структурной схемы и ее параметров, выбор метода, параметров интегрирования и т.п. целесообразно проводить в следующей последовательности:

- используя "линейку" типовых блоков, заполните схемное окно необходимыми блоками примерно так же, как они должны быть расположены в структурной схеме;
- используя процедуры "перетаскивания" блоков, изменения ориентации блоков и их размеров, придайте структурной схеме легко воспринимаемый вид;
- используя "мышь", соедините блоки линиями связи;
- двигаясь слева направо и сверху вниз (по блокам в схемном окне), задайте параметры блоков на структурной схеме (коэффициенты усиления, постоянные времени, начальные условия и т.д.);
- используя кнопку "параметры расчета", задайте конечное время интегрирования, выберите необходимый метод интегрирования и другие параметры расчета;
- сохраните набранную схему (проект) под оригинальным именем на жесткий диск (например, "*task_1.prj*" или, например, "*proba.prj*");
- запустите задачу на счет, смотрите текущие результаты в графических окнах и анализируйте.

Рекомендуется выполнять процедуру сохранения на жесткий диск не в конце ввода всех условий задачи, а после каждого из вышеперечисленных этапов.

Первый этап – ввода структурной схемы (заполнение типовыми блоками) – можно начинать сразу после запуска программного комплекса в чистое схемное окно (создав его однократным щелчком левой кнопки «мыши» по пункту меню "Новый").

2.1.5. Демонстрационно-ознакомительная задача

Для приобретения навыков самостоятельной работы в среде программного комплекса МВТУ выполним все этапы, рекомендованные в подразделе 2.1.4 данной главы, применительно к моделированию динамики САР, структурная схема которой приведена на рисунке 17.

Объект управления с передаточной функцией $W_2(s)$ соответствует типовому звену – колебательному с параметрами: $k_2 = 1.0$; $T_2 = 1\,\text{с}$; параметр демпфирования $b = 0.5$; начальные условия нулевые.

Местная обратная связь с передаточной функцией $W_3(s)$ соответствует типовому звену – апериодическому 1-го порядка с параметрами: $k_3 = 0.6$; $T_2 = 5$ с.

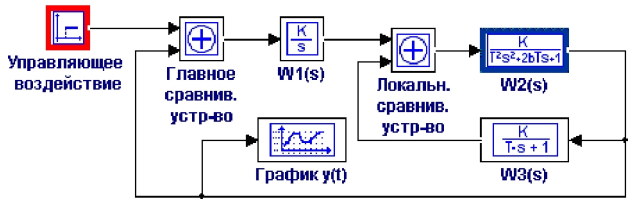


Рисунок 17. Структурная схема САР в демонстрационно-ознакомительной задаче

Локальное сравнивающее устройство обеспечивает отрицательную обратную связь, т.е. "работает" в режиме обычного вычитания.

Необходимо подобрать коэффициент усиления k_1 интегрирующего регулятора ($W_1(s)$) таким образом, чтобы при подаче ступенчатого управляющего воздействия $u(t) = 0.8 \cdot 1(t)$ перерегулирование отсутствовало (т. е. $y_{\max} \le 0.8$) и время переходного процесса не превышало 20 с.

Для отображения результатов расчета использовать типовой блок библиотеки "Данные" – "Временной график".

2.1.6. Ввод структурной схемы и исходных данных

Ввод структурной схемы и исходных данных выполним в последовательности, рекомендованной в подразделе 2.1.4 данной главы.

2.1.6.1. Этап 1 – заполнение схемного окна необходимыми типовыми блоками

Убедитесь, что все файлы закрыты и схемное окно отсутствует. Переместите курсор на кнопку "Новый" и сделайте однократный щелчок левой кнопкой "мыши" – откроется чистое схемное окно. Переместите курсор на закладку "Источники" входных воздействий и щелкните однократно левой кнопкой "мыши" – откроется соответствующая библиотека типовых блоков. Переместите курсор на блок "Ступенчатое воздействие" (подпись "Ступенька") и сделайте однократный щелчок левой кнопкой "мыши": фон блока на панели изменился. Это означает, что блок можно располагать в схемном окне. Переместите курсор "мыши" в верхний ле-

вый угол схемного окна и щелкните один раз левой кнопкой “мыши” в поле схемного окна – в нем появится переносимый блок. Переместите курсор на закладку “Операции математические” и выполните однократный щелчок левой кнопкой “мыши”: вы выбрали соответствующую типовую библиотеку. Переместите курсор на блок “Сумматор” и сделайте однократный щелчок: фон блока изменился. Переместите курсор в поле схемного окна на место, где вы желали бы расположить “Главное сравнивающее устройство” и щелкните 1 раз левой кнопкой “мыши” – перенос блока “Сумматор” в схемное окно выполнен. Повторите вышеописанные действия и перенесите на свободное место в схемном окне (ниже и левее) и второй блок “Сумматор”, также необходимый для моделирования локального сравнивающего устройства. Переместите курсор на закладку “Динамические звенья”, выберите ее, перенесите требуемые блоки (“Интегратор”, “Апериодическое звено” и “Колебательное звено”) в схемное окно аналогичным образом на желаемые места. Наконец, перенесите описанным выше способом в схемное окно блок “Временной график”. Затем переместите курсор на большую кнопку в левой части панели типовых блоков и сделайте однократный щелчок, временно закрывая все библиотеки типовых блоков.

2.1.6.2. Этап 2 – проведение линий связи на структурной схеме

Переместите курсор на один из “Сумматоров” – будущее “Главное сравнивающее устройство”, затем перетащите этот блок левой кнопкой “мыши” так, чтобы его верхний вход по горизонтали был на одном уровне с выходом (выходным портом) блока “Управляющее воздействие”. Для упрощения этой процедуры рекомендуется включить опцию “Сетка” в схемном окне: переместите курсор на свободное место в Схемном Окне и сделайте однократный щелчок правой кнопкой “мыши”: появится дополнительное командное меню, в котором необходимо сделать щелчок левой кнопкой “мыши” по строке “Сетка” (режим сетки можно установить и без вызова дополнительного командного меню: нажмите клавишу F4). Далее, переместите курсор на выход блока “Управляющее воздействие”. Затем сделайте щелчок левой кнопкой “мыши” и, отпустив кнопку, протяните, перемещая “мышь”, горизонтальную линию связи к верхнему входному порту “Главного сравнивающего устройства”. Снова сделайте однократный щелчок левой кнопкой – на верхнем входе появится стрелка.

Если требуется сделать поворот линии связи, выполните щелчок левой кнопкой “мыши” и продолжайте проведение линии связи в новом направлении.

Если Вы желаете прервать процедуру проведения линии связи, например, чтобы перерисовать ее, нажмите клавишу “Shift” и, не отпуская ее, сделайте щелчок левой кнопкой “мыши”: линия оборвется. Далее

можно удалить эту линию: выделите ее (щелчок левой кнопкой "мыши" по линии) и затем удалите линию с помощью командной кнопки Вырезать (пиктограмма «ножницы»).

С использованием аналогичных процедур уточните расположение блоков в прямой цепи структурной схемы ($W_1(s)$, "Локальное сравнивающее устройство" и $W_2(s)$) и проведите линии связи. Переместите курсор на блок $W_3(s)$ и щелкните левой кнопкой "мыши", удерживая клавишу "Shift" на клавиатуре: порты блока повернутся против часовой стрелки под прямым углом. Повторите эту процедуру еще раз: ориентация блока станет справа-налево. Если требуется, скорректируйте расположение блока $W_3(s)$, перетаскивая его в схемном окне. Проведите линии связи от блока $W_2(s)$ к блоку $W_3(s)$ и далее от него ко второму (нижнему) входному порту "Локального сравнивающего устройства".

Переместите курсор на линию связи от блока $W_2(s)$ к блоку $W_3(s)$, нажмите на клавиатуре клавишу "Ctrl" и, не отпуская ее, сделайте щелчок левой кнопкой "мыши": появится темная точка. Отпустив и "Ctrl", и кнопку "мыши", проведите линию связи вниз (малой длины): таким образом делается ответвление от существующей линии связи (сравните с рисунком 17). Используя вышеописанные процедуры, продлите линию главной обратной связи до 2-го входного порта "главного сравнивающего устройства".

Переместите блок "Временной график", сделайте ответвление от главной обратной связи и продлите его до входа в блок "Временной график" (см. рисунок 17).

Сохраните введенную часть задачи. Для этого переместите курсор в "главном окне" на кнопку "Сохранить как..." и сделайте однократный щелчок левой кнопкой "мыши": в появившемся диалоговом окне инициализируйте строку ввода и наберите оригинальное имя вашей задачи, например, *mvtu_lab.prj* (расширение может быть любым, необязательно *.prj*). Закройте окно сохранения, щелкнув по кнопке "ОК".

Переместите курсор на левый нижний угол рамки схемного окна (появится наклонная двухсторонняя стрелка), затем измените размер схемного окна так, чтобы структурная схема отображалась в схемном окне полностью.

Если набранная структурная схема не уместилась в размеры схемного окна, хотя оно стало раскрытым во весь экран, нажмите курсором на кнопку "Увидеть всю схему" и сделайте однократный щелчок левой кнопкой "мыши": произойдет перемасштабирование структурной

схемы таким образом, что она станет наблюдаемой в схемном окне полностью.

Снова сохраните задачу, щелкнув левой кнопкой “мыши” по кнопке “Сохранить”.

2.1.6.3. Этап 3 – ввод параметров структурной схемы

Переместите курсор на блок “Входное воздействие” и сделайте двойной щелчок левой кнопкой “мыши”: откроется диалоговое окно этого блока. Инициализируйте диалоговую строку, введите строку из трех чисел, разделенных пробелами: “0 0 0.8”. и нажмите на кнопку “ОК”. Повторите аналогичные процедуры для блоков $W_2(s)$ и $W_3(s)$: введите соответствующие значения *k*, *T* и начальных условий. Откройте диалоговое окно “Главного сравнивающего устройства” и убедитесь, что в диалоговой строке уже по умолчанию присутствуют необходимые параметры: должны быть записаны через пробел числа 1 и −1. При моделировании блок “Сумматор” реализует алгебраическое сложение двух сигналов в соответствии с введенными коэффициентами: первый – с весовым коэффициентом, равным единице, а второй – с коэффициентом, равным −1. Если необходимо алгебраически сложить три сигнала, например с весовыми коэффициентами 0.8, −1.2 и 2.5, то в строке ввода необходимо ввести соответствующие параметры через пробел: 0.8 −1.2 2.5. При закрытии диалогового окна блока “Сумматор” произойдет перерисовывание этого блока, и он будет иметь три входных порта, где верхний входной порт (при ориентации блока слева направо) – для первого, (коэффициент равен 0.8), средний – для второго (коэффициент равен −1.2) и нижний – для третьего сигнала (коэффициент равен 2.5). Повторите аналогичные процедуры для блока “Локальное сравнивающее устройство”.

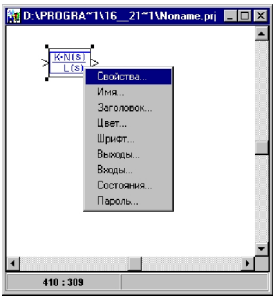


Рисунок 18. Схемное окно со всплывающим меню блока

Откройте диалоговое окно блока $W_1(s)$, введите оценочное значение коэффициента усиления: $k_1 = 1$. Начальное условие уже установлено по

умолчанию. Закройте диалоговое окно. Снова сохраните задачу, щелкнув по командной кнопке “Сохранить”.

Примечание. Диалоговое окно любого типового блока можно открыть и другим способом. Переместите курсор на редактируемый блок и выполните однократный щелчок правой кнопкой “мыши”: появится всплывающее меню блока; щёлкните левой кнопкой “мыши” по строке “Свойства” которого вызывает диалоговое окно блока.

Ниже перечислены опции “всплывающего” меню блока с кратким описанием их предназначения:

- опция “Свойства” вызывает диалогового окна параметров блока;
- опция “Имя” присваивает блоку имя-идентификатор;
- опция “Заголовок” – для изменения подписи под блоком;
- опции “Цвет” и “Шрифт” дублируют аналогичные опции из меню “Стиль”;
- опции “Выходы” и “Входы” предназначены для изменения расположения выходных и входных портов блока, а для некоторых блоков специализированных библиотек – добавлять и удалять порты, изменять тип сигналов на входах и выходах блока (например, в соответствии с граничными и начальными условиями при решении задач теплопроводности с использованием блоков библиотеки “Теплопроводность”);
- опция “Пароль” закрывает доступ к параметрам блока, а для макроблока опция “Пароль” закрывает нежелательный доступ к его внутренней структуре;
- опция “Состояния” в данной версии программного комплекса не работает.

2.1.6.4. Этап 4 – установка параметров интегрирования

Переместите курсор на командную кнопку “Параметры расчета” и сделайте однократный щелчок левой кнопкой “мыши”: откроется диалоговое окно для установки параметров интегрирования. Выберите численный метод, например, “Адаптивный 1”. Далее введите: время интегрирования - 40 (с.); минимальный шаг интегрирования - 0.001 (с.); максимальный шаг интегрирования - 0.1 (с.); Число точек вывода - 400. Параметр точности можно оставить тем же (по умолчанию 0.001). Закройте диалоговое окно, щелкнув левой кнопкой “мыши” по кнопке “ОК”.

Снова сохраните задачу (кнопка “Сохранить”).

2.1.6.5. Этап 5 – оформление поясняющих подписей

Выполним оформление схемного окна, как это сделано на рисунке 17. Переместите курсор на блок “Входное воздействие” и сделайте двойной

щелчок левой кнопкой “мыши”: появится окно для ввода текста. Переместите курсор в это окно, сделайте щелчок левой кнопкой “мыши” и затем введите заголовок данного блока (в две строки). Переместите курсор на свободное место в схемном окне и сделайте двойной щелчок левой кнопкой “мыши”: временное окно закроется и под блоком появится желаемая подпись. Если в подписи были допущены ошибки, снова откройте временное окно для ввода текста и, используя клавиши редактирования (“Backspace”, “Delete”, стрелки и др.), скорректируйте подпись.

Подпись под блоком можно выполнить и другим способом. Переместите курсор на редактируемый блок, выполните однократный щелчок правой кнопкой “мыши” и в появившемся «всплывающем» меню блока щелкните левой кнопкой “мыши” по строке “Заголовок”. Посредством всплывающего меню блока можно редактировать и другие характерные свойства блока.

Интерфейс программного комплекса “МВТУ” позволяет изменить в подписи тип, размер и цвет шрифта. Выделите блок, откройте меню “Стиль” и выберите опцию “Шрифт” подписи блока. Откроется диалоговое окно “Выбор шрифта”, в котором можно установить желаемые параметры подписи. Например: шрифт – “Arial Cyr”, начертание – “Обычный”, цвет – красный, размер – 10. При закрытии диалогового окна “Выбор шрифта” (щелчок по кнопке “ОК”) происходит автоматический возврат к редактированию схемы.

Используя меню “Стиль” и его опции, можно изменить фон блока, фон всего схемного окна, цвет линий связи (выделив предварительно редактируемый блок или линию связи однократным щелчком левой кнопки “мыши”). Выполните цветовое оформление структурной схемы самостоятельно. Также самостоятельно выясните назначение опций “Подпись блока”, “Рисовать обрамление” и других опций в меню “Стиль”.

Сохраните введенные изменения, используя командную кнопку “Сохранить”.

2.1.6.6. Этап 6 – открытие графического окна и изменение его размеров

Переместите курсор на блок “График y(t)”, сделайте однократный щелчок правой кнопкой “мыши” и во всплывающем меню блока левой кнопкой “мыши” выберите строку “Свойства”. Первая строка (“Число входов”) в диалоговом окне не требует редактирования, так как в ней по умолчанию введено значение 1. Переместите курсор на поле ввода второй строки ввода (“Вывод на каждом шаге”), в которой по умолчанию введено “нет”, и выполните однократный щелчок левой кнопкой “мыши”: в поле ввода появится специальная кнопка. Щелкнув по этой кнопке левой кнопкой “мыши”, Вы имеете возможность выбора: “нет” или “да”.

Если вы выбрали “да”, то при выполнении моделирования в графическом окне будут отображаться все изменения линии графика после каждого шага интегрирования. Если вы выбрали “нет”, то при выполнении моделирования в графическом окне будут отображаться изменения линии графика через временной интервал, равный приблизительно отношению времени интегрирования к числу точек вывода (см. диалоговое окно “Параметры расчета”).

В третьей строке диалогового окна (“Прореживание точек”) по умолчанию введено “да”. Если необходимо иметь информацию о всех расчетных данных, выводимых на график, то нужно в поле ввода 3-й диалоговой строки изменить “да” на “нет”.

Заметим, что если в третьей диалоговой строке введено “да”, то при обоих вариантах значения второй диалоговой строки отображаемые данные подвергаются прореживанию по следующему алгоритму: если три последовательные расчетные точки лежат на одной прямой (с заданной точностью), то средняя точка не отображается на графике, т.к. отрезок, проведенный через первую и третью точки, содержит и вторую точку.

Закройте диалоговое окно блока “Временной график” (щелчок по кнопке “ОК”) и выполните двойной щелчок левой кнопкой мыши по изображению этого блока в схемном окне: откроется графическое окно с заголовком “График y(t)”.

Сохраните введенные изменения, используя кнопку “Сохранить”.

2.1.7. Моделирование переходных процессов и вариантные расчеты.

Переместите курсор на командную кнопку “Продолжить” и щелкните левой кнопкой “мыши”: Вы запустили созданную задачу на счет. По окончании расчета появится специальное информационное окно “Возникшие ошибки” с сообщением: “Предупреждение: Заданная точность не обеспечивается”.

Измените масштаб графического окна двойным щелчком левой кнопкой “мыши”. Переместите курсор на кнопку “Параметры расчета” и измените минимальный шаг интегрирования на новое значение ($1 \cdot 10^{-10}$) и повторите процесс моделирования.

Данные расчета показывают, что, во-первых, внешний вид переходного процесса не изменился при резком уменьшении минимального шага интегрирования, так как при шаге 0.001 заданная точность не обеспечивалась только на первом шаге моделирования (при отработке ступенчатого воздействия). Поэтому, в данном случае, сообщение о недостаточной точности можно проигнорировать. Во-вторых, данные расчета свиде-

тельствуют, что при $k_1 = 1$ исходная САР неустойчива и переходный процесс расходится (рисунок 19, а).

Продолжим редактирование графического окна. Переместите курсор в центральную часть графического окна и сделайте однократный щелчок правой кнопкой "мыши": появится всплывающее меню графического окна. Щелкните левой кнопкой "мыши" по строке "Свойства": откроется диалоговое окно блока "Временной график", имеющее внизу три закладки: "Графики", "Ось X" и "Ось Y", причем закладка "Графики" будет активной. Переместите курсор в верхнее диалоговое поле и скорректируйте название на "График переходного процесса при k=1". Можно изменить цвет линии на графике: переместите курсор на цветную кнопку, щелкните левой кнопкой "мыши" и выберите новый цвет линии (FG), например синий, а правой кнопкой - цвет поля графика (BG), например, белый. Выберите закладку "Ось X", дополните подпись под осью абсцисс: "Время, с". Щелкнув по цветной кнопке, установите левой кнопкой "мыши" цвет сетки по X (FG), например серый, а правой кнопкой "мыши" – цвет окантовки графика (BG), например белый. Выбрав закладку "Ось Y", сотрите подпись по оси Y ("переменная") и введите y(t). Измените цвет сетки по данной оси тоже на серый. Закончив процедуры редактирования параметров графического окна, переместите курсор на кнопку "да" и закройте данное диалоговое окно.

Измените значение k_1 на новое: 0.2 (рисунок 19, б). Повторите процесс моделирования, измените масштаб окна графиков по окончании расчета. Данные свидетельствуют, что хотя перерегулирование и отсутствует, но время переходного процесса значительно превышает 20 секунд.

Снова измените значение k_1 на новое: 0.35 (рисунок 19, в). Повторите вышеописанные процедуры. Анализ полученных данных показывает, что вы добились требуемых характеристик переходного процесса: перерегулирование - отсутствует; время входа в 5-процентную "трубку" не превышает 20 секунд.

На этом демонстрационно-ознакомительная задача завершена.

Сформированная структурная схема САР далее будет использована для освоения процедур других режимов работы программного комплекса "МВТУ", а именно "Частотный анализ" и "Оптимизация".

2.1.8. Анализ частотных характеристик в среде ПК МВТУ

Методы и процедуры, реализующие в программном комплексе МВТУ режим работы "Частотный анализ", будут рассмотрены в процессе выполнения дополнительного задания к рассмотренной выше ознакомительной задаче. Поскольку структурная схема задачи (с исходными данными)

была сохранена вами на жестком диске, откройте эту задачу (проект), используя интерфейс программного комплекса "МВТУ".

Переместите курсор на закладку "Субструктуры" и однократным щелчком левой кнопки "мыши" откройте одноименный каталог в общетехнической библиотеке типовых блоков. Перенесите в схемное окно два блока "В память" и проведите к ним линии связи, как это показано на рисунке 20– эти блоки потребуются для определения точек входа и выхода рассчитываемой модели при построении ее частотных характеристик.

Переместите курсор на левый блок "В память", откройте его диалоговое окно и введите в соответствующей строке имя переменной, например *input*. Точкой подключения данного блока к линии связи между блоками "Управляющее воздействие" и "Главное сравнивающее устройство", а также именем переменной (*input*) задана точка приложения единичного гармонического воздействия $\sin\omega t$. Закройте диалоговое окно левого блока и повторите вышеописанное для правого блока "В память", присвоив новой переменной имя, например *output*. Точка подключения данного блока и имя переменной (*output*) задают точку выхода при расчете амплитудно-фазовых частотных характеристик. Выполните оформление поясняющих подписей.

Проверьте, что параметры всех блоков в структурной схеме соответствуют исходным, в том числе, коэффициент усиления в блоке "Интегратор" должен быть равен 1. Убедитесь, что вид переходного процесса расходящийся (выполните контрольный расчет переходного процесса).

Откройте диалоговое окно блока "Сумматор", выполняющего роль "Главного сравнивающего устройства", и разомкните главную обратную связь, установив его второй весовой коэффициент равным нулю. Выполните моделирование и убедитесь, что вид переходного процесса типичен для САР, находящихся на апериодической границе устойчивости (один нулевой полюс).

Переместите курсор на надпись "Анализ" в командном меню и сделайте однократный щелчок "мышью". В открывшемся выпадающем меню выберите опцию "Частотный анализ", щелкнув по ней левой кнопкой "мыши". Откроется диалоговое окно параметров режима "Частотный анализ". Введите значения первых трех параметров, остальные параметры оставьте без изменения.

Переместите курсор на строку "input" в окне "Список переменных", нажмите левую кнопку "мыши" и, не отпуская ее, переместите курсор на ячейку таблицы ниже заголовка "Входы": в этой ячейке появится имя переменной *input*. Аналогично перенесите имя переменной *output* в соседнюю ячейку (ниже заголовка "Выход").

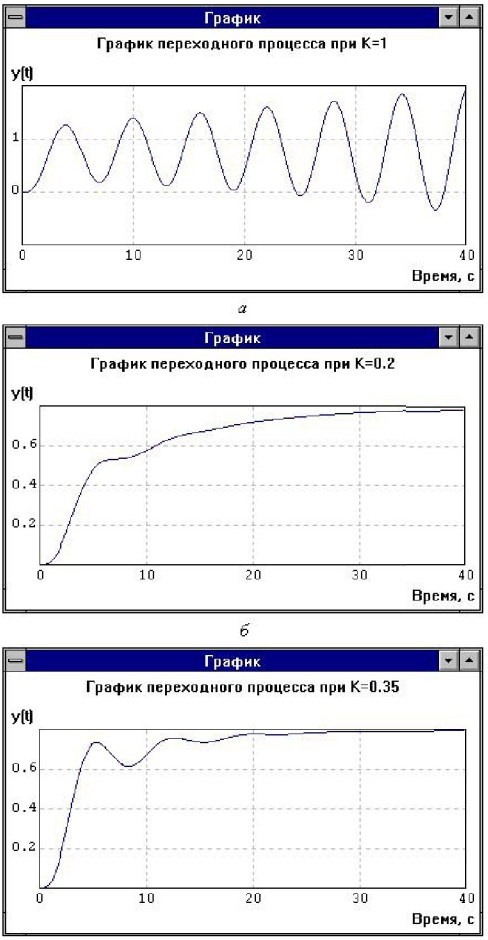


Рисунок 19. Вид переходного процесса в графическом окне при различных значениях коэффициента усиления: $k = 1$ *(а),* $k = 0.2$ *(б) и* $k = 0.35$ *(в)*

Повторите описанное выше и заполните вторую строку в этом же окне (рисунок 21).

Переместите курсор на последнюю ячейку в первой строке этого окна (ниже заголовка “Вид характеристики”), сделайте однократный щелчок левой кнопкой “мыши” и затем, щелкнув “мышью” по специальной кнопке, откройте выпадающее меню, в котором выберите опцию ЛАХ (логарифмическая амплитудно-частотная характеристика). Повторите такие же

процедуры и для второй строки в этой таблице и выберите опцию ФЧХ (фазочастотная характеристика).

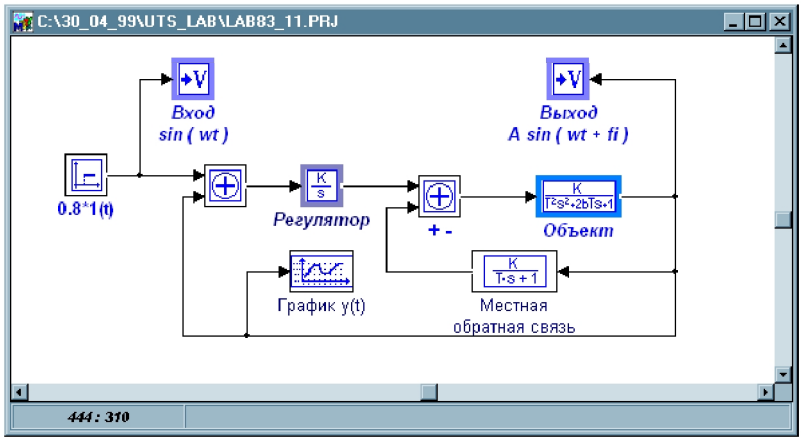


Рисунок 20. Дополнение структурной схемы для расчета частотных характеристик

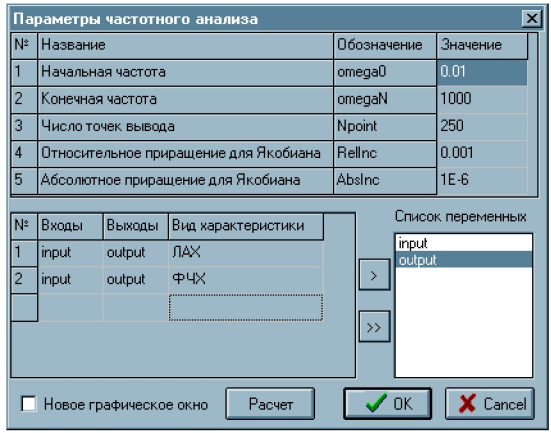


Рисунок 21. Диалоговое окно параметров режима "Частотный анализ"

Заполнив по инструкции диалоговое окно параметров режима “Частотный анализ”, вы задали следующее: рассчитать ЛАХ и ФЧХ разомкнутой САР, если:

- начальная частота – $0.01\ сек^{-1}$;
- конечная частота – $1000\ сек^{-1}$;

- 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);
- входы – переменная *input* (одна и та же);
- выходы – переменная *output* (одна и та же).

Переместите курсор на кнопку "Расчет" и сделайте щелчок левой кнопкой "мыши": начался расчет заданных частотных характеристик (кнопка "Расчет" недоступна – отображена менее контрастно) и появилось специальное графическое окно для вывода результатов расчета. Через несколько секунд расчет будет закончен и кнопка "Расчет" снова станет доступной и отобразится более контрастно. Переместите курсор в поле графического окна и выполните двойной щелчок левой кнопкой "мыши": масштаб графика подстроится под размеры данного графического окна. Используя опции графического окна (вызов всплывающего меню – однократным щелчком правой кнопки "мыши"), установите следующие параметры оси ординат: $Y_{\min} = -270; Y_{\max} = +90$. Количество делений – 4.

Вид графиков показывает, что фазовая характеристика пересекает линию −180° немного раньше, чем логарифмическая амплитудная характеристика пересекает линию 0 дБ. Следовательно, при замыкании САР единичной обратной связью она будет неустойчивой, что и показал ранее график переходного процесса при исходных параметрах САР.

Закройте диалоговое окно параметров режима "Частотный анализ" кнопкой "ОК": на экране монитора снова появится схемное окно. Измените коэффициент усиления в блоке "Интегратор" ("Регулятор") на 0.35, что соответствует найденному оптимальному значению (см. демонстрационно-ознакомительную задачу).

Переместите курсор на командную кнопку "Старт" 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 кнопку "Стоп" и сделайте щелчок "мышью": расчет переходного процесса будет прерван, так и не начавшись. Переместите курсор на надпись "Анализ" в командном меню, сделайте однократный щелчок "мышью" и в "выпадающем" меню выберите опцию "Частотный анализ". В открывшемся диалоговом окне режима "Частотный анализ" не требуется переустанавливать параметры, так как они сохранены автоматически. Запустите расчет частотных характеристик таким же образом, как это было выполнено выше. Измените масштаб графика в

графическом окне двойным щелчком “мыши”, установив курсор внутри графического окна. Выполнив дополнительные оформительские процедуры, можно привести график к виду, показанному на рисунке 23.

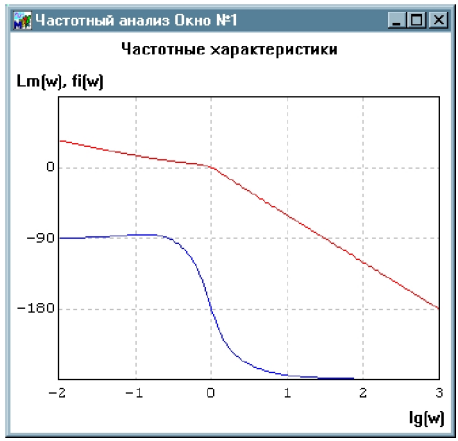


Рисунок 22. Графическое окно с логарифмической амплитудно-частотной характеристикой (верхняя линия) и фазочастотной характеристикой (нижняя линия) модели при k=1

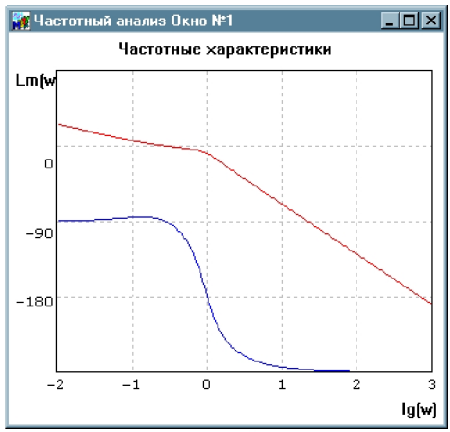


Рисунок 23. Графическое окно с логарифмической амплитудно-частотной характеристикой (верхняя линия) и фазочастотной характеристикой (нижняя линия) модели при k=0.35

Сравнительный анализ графиков $\varphi(\omega)$ и $L_m(\omega)$ показывает, что при замыкании единичной обратной связью САР станет устойчивой. Используя опции графического окна, переведите его в режим “Список” и опреде-

лите запасы по фазе (в градусах) и амплитуде (в дБ). Эти запасы должны составлять около 86.5° и около 8.2 дБ соответственно. Запас по фазе достаточен, однако крайне малый запас по амплитуде (должно быть около 30…40 дБ) обосновывает посредственное качество переходного процесса в демонстрационно-ознакомительной задаче при $K = 0.35$.

Использование возможностей программного комплекса "МВТУ" для решения задач оптимального управления и параметрической оптимизации рассмотрим в процессе выполнения еще одного дополнительного задания к демонстрационно-ознакомительной задаче.

Скорректируем ранее поставленное условие задачи. Теперь задача сводится к определению значения скоростной эффективности интегрирующего регулятора (коэффициента усиления блока "Интегратор"), обеспечивающего перевод замкнутой САР из состояния $y = 0$ при $t = 0$ в состояние $y = 0.8 \pm 0.04$ (пятипроцентный допуск) при следующих ограничениях:

- время переходного процесса не более 20 секунд;
- не должно быть перерегулирования ($\sigma_{макс} = 0$).

Приведем перечень основных этапов расчета, которые необходимо выполнить в режиме работы "Оптимизация" программного комплекса "МВТУ":

- задать варьируемые параметры, как глобальные переменные, используя клавишу "F8", и далее через окно «Редактор интерпретатора математических функций» задать варьируемые параметры в формате *имя=значение*, или *имя=алгебраическое выражение*; в дальнейшем их можно использовать при задании параметров элементов схемы;
- сформировать локальные критерии качества, которые необходимы для решения основной задачи оптимизации;
- ввести в диалоговые окна режима "Оптимизация" требуемые данные, включая имена варьируемых параметров, пределы их изменения и погрешность расчета, имена локальных критериев и допустимые пределы их значений, расчетный метод оптимизации и его параметры;
- запустить вычисления и ждать результата.

Восстановите исходное (замкнутое) состояние САР, возвратив исходное значение второго весового коэффициента в блоке "Сумматор" .

Убедитесь, что схемное окно активно, и затем нажмите клавишу "F8": откроется окно глобальных параметров, реализуемое через окно "Редактор интерпретатора математических функций". Введите с клавиа-

туры: $K=1$. Закройте окно “Редактор интерпретатора математических функций”, щелкнув “мышью” по кнопке ОК.

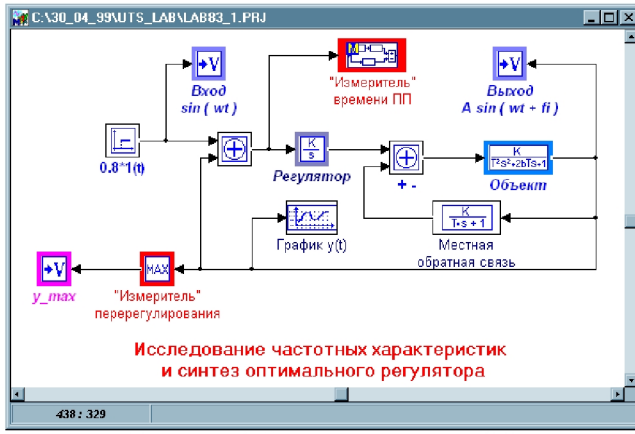


Рисунок 24. Структурная схема САР

Откройте диалоговое окно блока “Интегратор” (“Регулятор”) и измените значение коэффициента усиления, введя вместо числа имя переменной K.

Перенесите в схемное окно блоки “Максимум” (библиотека “Нелинейные звенья”) и “В память”. Переместите их в требуемое место “схемного окна” (рисунок 24), проведите необходимые линии связи и сделайте поясняющие подписи.

В диалоговом окне блока “В память” в строке “Имя переменной” введите *ymax*.

Откройте меню “Файл” и в выпадающем меню выберите опцию “Вставить субмодель”: откроется соответствующее диалоговое окно среды Windows. Найдите в списке файл “*time_p_p.sub*” и перенесите его имя в строку “Имя файла”. Закройте это окно, щелкнув по кнопке ОК. Переместите курсор в ту часть схемного окна, где должна быть расположена вставляемая субмодель, и сделайте щелчок левой кнопкой “мыши”: в данном месте схемного окна появится субмодель “Измеритель времени ПП”.

Переместите курсор на субмодель и выполните двойной щелчок левой кнопки “мыши” – откроется схемное окно субмодели, экранная копия которого представлена на рисунке 25. Процедуру открытия окна субмодели можно было выполнить и другим способом: щелкнуть по субмодели левой кнопкой “мыши” и затем на клавиатуре нажать клавишу “PgDn”.

Переместите курсор на блок с подписью “Величина трубки” и измените:

- в первой диалоговой строке значение 0.05 на 0.04, что соответствует пятипроцентной окрестности установившегося значения регулируемой переменной, равного 0.8;
- во второй диалоговой строке из двух вариантов “Скаляр” или “Вектор” выберите первый.

Закройте это диалоговое окно. Переместите курсор на блок “В память” и, выполнив двойной щелчок левой клавиши “мыши”, откройте его диалоговое окно. Введите в строке “Имя переменной” *tpp*. Закройте диалоговое окно этого блока.

Данная субмодель реализует измерение времени переходного процесса и присвоение этого значения переменной *tpp*.

Схема работает следующим образом. На второй или средний входной порт “Ключа-4А” (“Величина трубки”) подается модуль сигнала рассогласования. Если этот сигнал больше заданного, то на выход “Ключа-4А” передается сигнал с третьего (нижнего) входного порта – текущее модельное время. Если управляющий сигнал на среднем входном порту меньше заданного, то на выход “Ключа-4А” передается сигнал с первого (верхнего) входного порта, т.е. тот же сигнал, но задержанный на один шаг интегрирования. Задержку на 1 шаг интегрирования осуществляет типовой блок с подписью “Время переходного процесса” (“Задержка на шаг интегрирования” из библиотеки “Дискретные звенья”).

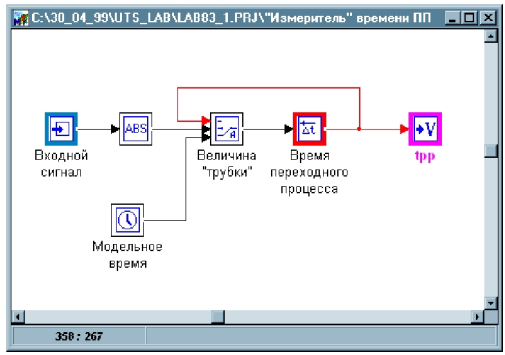


Рисунок 25. Структурная схема измерителя времени переходного процесса

Закройте субмодель, выполнив двойной щелчок “мышью” в свободном месте схемного окна субмодели (только не под блоком) или нажав на клавишу “PgUp”.

Переместите курсор на надпись “Оптимизация” в командном меню, выполните однократный щелчок левой клавишей “мыши” и в выпадающем меню выберите опцию “Параметры”. Откроется диалоговое окно режима “Оптимизация” с активной (по умолчанию) закладкой “Параметры” (рисунок 26). Переместите курсор на специальную кнопку в правой

части диалогового окна с изображением символа “<” и сделайте однократный щелчок левой клавишей «мыши»: откроется дополнительное диалоговое окно глобальных констант проекта (рисунок 27). Поскольку в Вашем проекте только одна глобальная константа (параметр $k = 1$), можно сразу щелкнуть по кнопке ОК: это диалоговое окно закроется и появится снова предыдущее диалоговое окно, соответствующее закладке Параметры с заполненной строкой по параметру k. Скорректируйте его максимум: вместо единицы введите число 2.

Если бы количество глобальных констант было бы, например 4, а для решения оптимизационной задачи нужно только 3, то в дополнительном окне глобальных констант (параметров) необходимо сначала выбрать из списка требуемые параметры и только затем щелкнуть по кнопке ОК. Подобная процедура будет выполнена ниже при выборе критериев оптимизации.

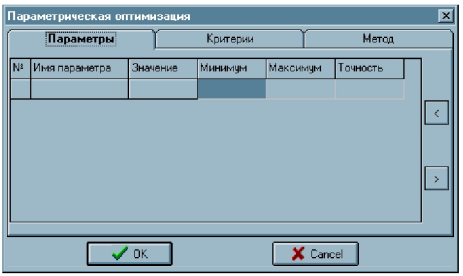


Рисунок 26. Диалоговое окно “Параметрическая оптимизация”

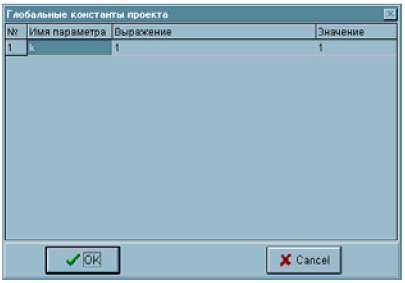


Рисунок 27. Диалоговое окно “Глобальные константы”

Скорректируйте значения минимума и максимума, как это показано на рисунке 28. Значение максимума для переменной *tpp* формирует требование по времени переходного процесса: не более 20 сек. Значение максимума для переменной *ymax* формирует требование по перерегулированию: его не должно быть.

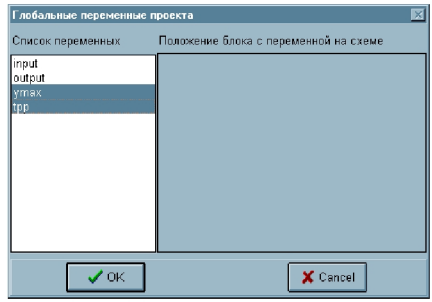


Рисунок 28. Окно "Глобальные переменные проекта"

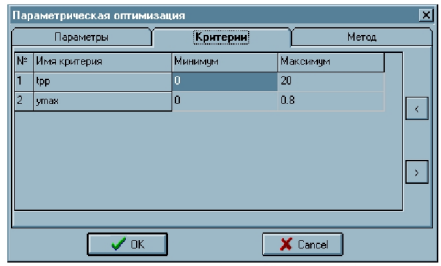


Рисунок 29. Пример заполнения закладки "Метод" окна "Параметрическая оптимизация"

Переместите курсор на закладку "Метод" и сделайте однократный щелчок левой кнопкой "мыши": откроется диалоговое окно, соответствующее данной закладке. Выберите метод, максимальное число моделирований, вид свертки локальных критериев в глобальный, и т.п. так, как это показано на рисунке 29. Выбранный метод оптимизации ("Поиск-2"), хотя и является одним из простейших алгоритмов прямого поиска минимума функционала, обладает высоким быстродействием и эффективностью, особенно в учебных задачах. Заданное максимальное число моделирований (200) вполне достаточно для поиска оптимума в задачах такого типа. Заданный вид общего критерия ("Квадратичный") определяет, что локальные критерии оптимизации будут свернуты в глобальный критерий с использованием стандартной квадратичной формы, причем значения весовых коэффициентов будут рассчитаны автоматически по ограничениям и точности для оптимизируемого параметра и локальных критериев. Две последние диалоговые строки заполняются только при использовании стохастического метода.

Переместите курсор на кнопку "ОК" и выполните щелчок левой кнопкой "мыши": диалоговое окно, соответствующее опции "Параметры" командного меню "Оптимизация", закроется и на экране монитора снова появится главное схемное окно. Переместите курсор на командную кнопку "Параметры", откройте соответствующее диалоговое окно и измените

метод интегрирования, например, на метод Рунге-Кутта. Запустите задачу на счет и убедитесь, что переходной процесс расходится.

Переместите курсор на командное меню “Оптимизация”, откройте его и выберите опцию “Начать”: появится окно “Результаты оптимизации”, а в графическом окне будут появляться и исчезать графики переходных процессов при различных значениях K. Приблизительно через 20 с поиск завершится и появится запрос, на который необходимо ответить положительно.

Сделайте активным главное схемное окно и нажмите клавишу “F8”: откроется окно “Редактор интерпретатора математических функций” со скорректированной записью $K=0.4$. Это означает, что по завершении процесса оптимизации автоматически вычисляется и предлагается для подтверждения значение параметра K (скоростной эффективности интегрирующего регулятора).

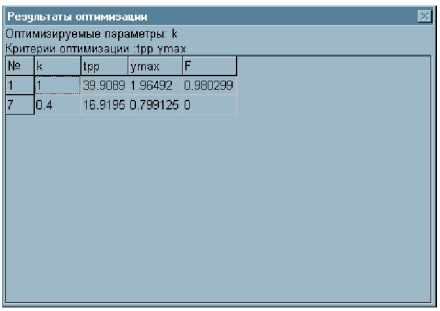


Рисунок 30. Окно “Результаты оптимизации”

Запустите задачу на расчет переходного процесса с новым значением K и убедитесь, что получившийся переходной процесс полностью соответствует поставленным условиям и ограничениям.

2.2. Работа с пакетом Simulink

2.2.1. Общие сведения

Программа Simulink является приложением к пакету MATLAB. При моделировании с использованием Simulink реализуется принцип визуального программирования, в соответствии с которым пользователь на экране из библиотеки стандартных блоков создает модель устройства и осуществляет расчеты. При этом, в отличие от классических способов моделирования, пользователю не нужно досконально изучать язык программирования и численные методы математики, а достаточно общих знаний, требующихся при работе на компьютере и, естественно, знаний той предметной области, в которой он работает.

Simulink является достаточно самостоятельным инструментом MATLAB и при работе с ним совсем не требуется знать сам MATLAB и остальные его приложения. С другой стороны, доступ к функциям MATLAB и другим его инструментам остается открытым и их можно использовать в Simulink. Часть входящих в состав пакетов имеет инструменты, встраиваемые в Simulink, например, LTI-Viewer приложения Control System Toolbox – пакета для разработки систем управления. Имеются также дополнительные библиотеки блоков для разных областей применения (например, Power System Blockset – моделирование электротехнических устройств, Digital Signal Processing Blockset – набор блоков для разработки цифровых устройств и т.д).

При работе с Simulink пользователь имеет возможность модернизировать библиотечные блоки, создавать свои собственные, а также составлять новые библиотеки блоков.

При моделировании пользователь может выбирать метод решения дифференциальных уравнений, а также способ изменения модельного времени (с фиксированным или переменным шагом). В ходе моделирования имеется возможность следить за процессами, происходящими в системе. Для этого используются специальные устройства наблюдения, входящие в состав библиотеки Simulink. Результаты моделирования могут быть представлены в виде графиков или таблиц.

Преимущество Simulink заключается также в том, что он позволяет пополнять библиотеки блоков с помощью подпрограмм, написанных как на языке MATLAB, так и на языках C + +, Fortran и Ada.

2.2.2. Запуск Simulink

Для запуска программы необходимо предварительно запустить пакет MATLAB. Основное окно пакета MATLAB показано на рисунке 31. Там же показана подсказка, появляющаяся в окне при наведении указателя мыши на ярлык Simulink в панели инструментов.

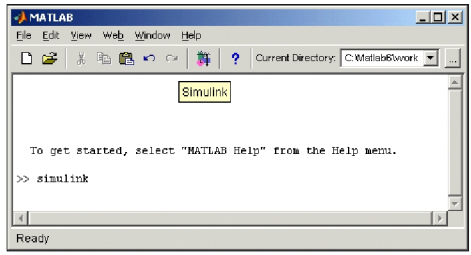


Рисунок 31. Основное окно программы MATLAB

После открытия основного окна программы MATLAB нужно запустить программу Simulink. Это можно сделать одним из трех способов:

- Нажать кнопку “Simulink” на панели инструментов командного окна MATLAB.
- В командной строке главного окна MATLAB напечатать Simulink и нажать клавишу Enter на клавиатуре.
- Выполнить команду Open… в меню File и открыть файл модели (mdl - файл).

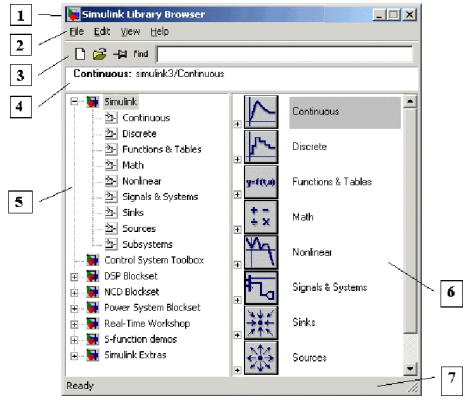


Рисунок 32. Окно обозревателя разделов библиотеки Simulink

Последний вариант удобно использовать для запуска уже готовой и отлаженной модели, когда требуется лишь провести расчеты и не нужно добавлять новые блоки в модель. Использование первого и второго способов приводит к открытию окна обозревателя разделов библиотеки Simulink (рисунок 32).

2.2.3. Обозреватель разделов библиотеки Simulink

Окно обозревателя библиотеки блоков содержит следующие элементы (рисунок 32):

- заголовок, с названием окна – Simulink Library Browser;
- меню, с командами File, Edit, View, Help;
- панель инструментов, с ярлыками наиболее часто используемых команд;
- окно комментария для вывода поясняющего сообщения о выбранном блоке;
- список разделов библиотеки, реализованный в виде дерева;
- окно содержимого раздела библиотеки (список вложенных разделов библиотеки или блоков);
- строка состояния, содержащая подсказку по выполняемому действию.

На рисунке 32 выделена основная библиотека Simulink (в левой части окна) и показаны ее разделы (в правой части окна). Библиотека Simulink содержит следующие основные разделы.

- Continuous – линейные блоки.
- Discrete – дискретные блоки.
- Functions & Tables – функции и таблицы.
- Math – блоки математических операций.
- Nonlinear – нелинейные блоки.
- Signals & Systems – сигналы и системы.
- Sinks - регистрирующие устройства.
- Sources — источники сигналов и воздействий.
- Subsystems – блоки подсистем.

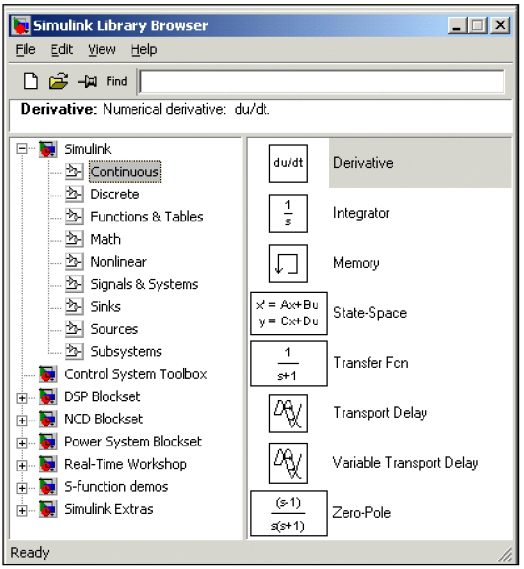


Рисунок 33. Окно обозревателя с набором блоков раздела библиотеки

Список разделов библиотеки Simulink представлен в виде дерева, и правила работы с ним являются общими для списков такого вида.

1. Пиктограмма свернутого узла дерева содержит символ "+", а пиктограмма развернутого содержит символ "–".
2. Для того чтобы развернуть или свернуть узел дерева, достаточно щелкнуть на его пиктограмме левой клавишей мыши (ЛКМ).
3. При выборе соответствующего раздела библиотеки в правой части окна отображается его содержимое.

Для работы с окном используются команды, собранные в меню. Меню обозревателя библиотек содержит следующие пункты.

- File (Файл) — Работа с файлами библиотек.
- Edit (Редактирование) — Добавление блоков и их поиск (по названию).
- View (Вид) — Управление показом элементов интерфейса.
- Help (Справка) — Вывод окна справки по обозревателю библиотек.

Для работы с обозревателем можно также использовать кнопки на панели инструментов (рисунок 34).



Рисунок 34. Панель инструментов обозревателя разделов библиотек: 1 – создать новую S-модель, 2 – открыть одну из существующих S-моделей, 3 – изменить свойства окна обозревателя, 4 – поиск блока по названию

2.2.4. Создание модели

Для создания модели в среде SIMULINK необходимо последовательно выполнить ряд действий.

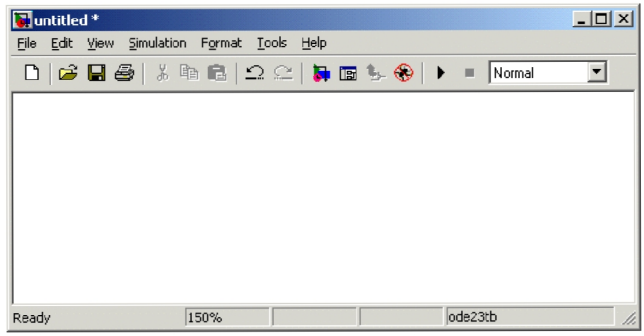


Рисунок 35. Пустое окно модели

Во-первых, создать новый файл модели с помощью команды File/New/Model, или используя кнопку “New” на панели инструментов (здесь и далее, с помощью символа “/”, указаны пункты меню программы, которые необходимо последовательно выбрать для выполнения указанного действия). Вновь созданное окно модели показано на рисунке 35.

Во-вторых - расположить блоки в окне модели. Для этого необходимо открыть соответствующий раздел библиотеки (Например, Sources - Источники). Далее, указав курсором на требуемый блок и нажав на левую клавишу “мыши” - “перетащить” блок в созданное окно. Клавишу мыши нужно держать нажатой. На рисунке 36 показано окно модели, содержащее блоки.

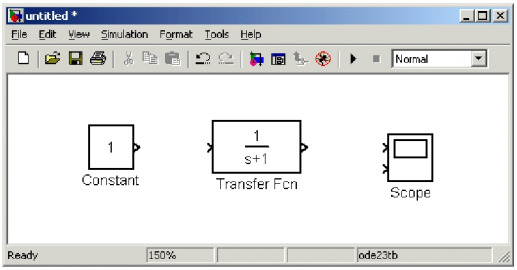


Рисунок 36. Окно модели, содержащее блоки

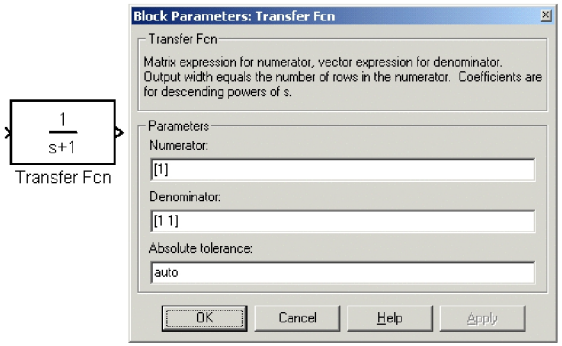


Рисунок 37. Блок, моделирующий передаточную функцию и окно редактирования параметров блока

Для удаления блока необходимо выбрать блок (указать курсором на его изображение и нажать левую клавишу “мыши”), а затем нажать клавишу Delete на клавиатуре. Для изменения размеров блока требуется выбрать блок, установить курсор в один из углов блока и, нажав левую клавишу “мыши”, изменить размер блока (курсор при этом превратится в двухстороннюю стрелку).

Далее, если это требуется, нужно изменить параметры блока, установленные программой “по умолчанию”. Для этого необходимо дважды щелкнуть левой клавишей “мыши”, указав курсором на изображение блока. Откроется окно редактирования параметров данного блока. При задании численных параметров следует иметь в виду, что в качестве десятичного разделителя должна использоваться точка, а не запятая. После вне-

сения изменений нужно закрыть окно кнопкой OK. На рисунке 38 в качестве примера показаны блок, моделирующий передаточную функцию и окно редактирования параметров данного блока.

После установки на схеме всех блоков из требуемых библиотек нужно выполнить соединение элементов схемы. Для соединения блоков необходимо указать курсором на “выход” блока, а затем нажать и, не отпуская левую клавишу “мыши”, провести линию к входу другого блока, после чего отпустить клавишу. В случае правильного соединения изображение стрелки на входе блока изменяет цвет. Для создания точки разветвления в соединительной линии нужно подвести курсор к предполагаемому узлу и, нажав правую клавишу “мыши”, протянуть линию. Для удаления линии требуется выбрать линию (так же, как это выполняется для блока), а затем нажать клавишу Delete на клавиатуре. Схема модели, в которой выполнены соединения между блоками, показана на рисунке 38.

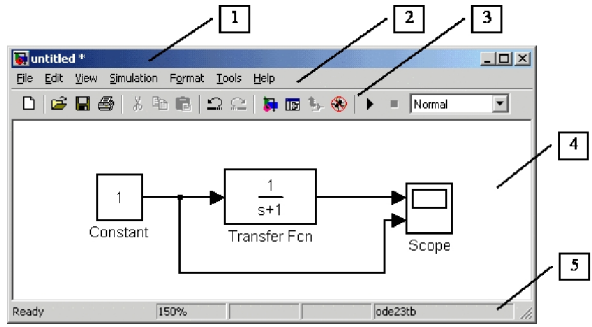


Рисунок 38. Схема модели

После составления расчетной схемы необходимо сохранить ее в виде файла на диске, выбрав пункт меню File/Save As... в окне схемы и указав папку и имя файла. Следует иметь в виду, что имя файла не должно превышать 32 символов, должно начинаться с буквы и не может содержать символы кириллицы и спецсимволы. Это же требование относится и к пути файла (к тем папкам, в которых сохраняется файл). При последующем редактировании схемы можно пользоваться пунктом меню Fille/Save. При повторных запусках программы SIMULINK загрузка схемы осуществляется с помощью меню File/Open... в окне обозревателя библиотеки или из основного окна MATLAB.

2.2.5. Окно модели

Окно модели содержит следующие элементы (рисунок 38):

- Заголовок, с названием окна (1). Вновь созданному окну присваивается имя *Untitled* с соответствующим номером.

- Меню (2) с командами File, Edit, View и т.д.
- Панель инструментов (3).
- Окно (4) для создания схемы модели.
- Строка состояния (5), содержащая информацию о текущем состоянии модели.

Меню окна содержит команды для редактирования модели, ее настройки и управления процессом расчета, работы файлами и т.п.:

- File (Файл) — Работа с файлами моделей.
- Edit (Редактирование) — Изменение модели и поиск блоков.
- View (Вид) — Управление показом элементов интерфейса.
- Simulation (Моделирование) — Задание настроек для моделирования и управление процессом расчета.
- Format (Форматирование) — Изменение внешнего вида блоков и модели в целом.
- Tools (Инструментальные средства) — Применение специальных средств для работы с моделью (отладчик, линейный анализ и т.п.)
- Help (Справка) — Вывод окон справочной системы.

Для работы с моделью можно также использовать кнопки на панели инструментов (рисунок 39).

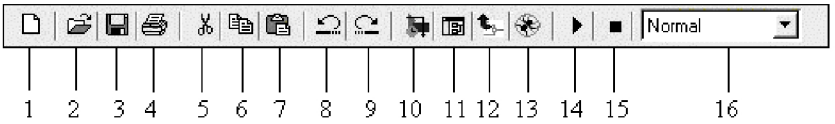


Рисунок 39. Панель инструментов окна модели

Кнопки панели инструментов имеют следующее назначение.

- New Model (1) — Открыть новое (пустое) окно модели.
- Open Model (2) — Открыть существующий mdl-файл.
- Save Model (3) — Сохранить mdl-файл на диске.
- Print Model (4) — Вывод на печать блок-диаграммы модели.
- Cut (5) — Вырезать выделенную часть модели в буфер промежуточного хранения.
- Copy (6) — Скопировать выделенную часть модели в буфер промежуточного хранения.
- Paste (7) — Вставить в окно модели содержимое буфера промежуточного хранения.
- Undo (8) — Отменить предыдущую операцию редактирования.
- Redo (9) — Восстановить результат отмененной операции редактирования.

- Library Browser (10) — Открыть окно обозревателя библиотек.
- Toggle Model Browser (11) — Открыть окно обозревателя модели.
- Go to parent system (12) — Переход из подсистемы в систему высшего уровня иерархии (“родительскую систему”). Команда доступна только, если открыта подсистема.
- Debug (13) — Запуск отладчика модели.
- Start/Pause/Continue Simulation (14) — Запуск модели на исполнение (команда Start); после запуска модели на изображении кнопки выводится символ  , и ей соответствует уже команда Pause (Приостановить моделирование); для возобновления моделирования следует щелкнуть по той же кнопке, поскольку в режиме паузы ей соответствует команда Continue (Продолжить).
- Stop (15) — Закончить моделирование. Кнопка становится доступной после начала моделирования, а также после выполнения команды Pause.
- Normal/Accelerator (16) — Обычный/Ускоренный режим расчета. Инструмент доступен, если установлено приложение Simulink Performance Tool.

В нижней части окна модели находится строка состояния, в которой отображаются краткие комментарии к кнопкам панели инструментов, а также к пунктам меню, когда указатель мыши находится над соответствующим элементом интерфейса. Это же текстовое поле используется и для индикации состояния Simulink: Ready (Готов) или Running (Выполнение). В строке состояния отображается также масштаб отображения блок-диаграммы (в процентах, исходное значение равно 100%), индикатор степени завершенности сеанса моделирования (появляется после запуска модели), текущее значения модельного времени (выводится также только после запуска модели), используемый алгоритм расчета состояний модели (метод решения).

2.2.6. Основные приемы подготовки и редактирования модели

2.2.6.1. Добавление текстовых надписей

Для повышения наглядности модели удобно использовать текстовые надписи. Для создания надписи нужно указать мышью место надписи и дважды щелкнуть левой клавишей мыши. После этого появится прямоугольная рамка с курсором ввода. Аналогичным образом можно изменить и подписи к блоками моделей.. На рисунке 40 показаны текстовая надпись и изменение надписи в блоке передаточной функции. Следует иметь в

виду, что рассматриваемая версия программы (Simulink 4) не адаптирована к использованию кириллических шрифтов и применение их может иметь самые разные последствия: - отображение надписей в нечитаемом виде, обрезание надписей, сообщения об ошибках, а также невозможность открыть модель после ее сохранения. Поэтому применение надписей на русском языке для текущей версии Simulink крайне нежелательно.

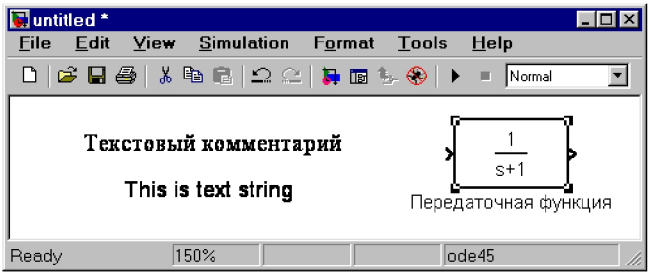


Рисунок 40. Текстовая надпись и изменение надписи в Transfer Function

2.2.6.2. Выделение объектов

Для выполнения какого-либо действия с элементом модели (блоком, соединительной линией, надписью) этот элемент необходимо сначала выделить.

Выделение объектов проще всего осуществляется мышью. Для этого необходимо установить курсор мыши на нужном объекте и щелкнуть левой клавишей мыши. Произойдет выделение объекта. Об этом будут свидетельствовать маркеры по углам объекта (см. рисунок 40). Можно также выделить несколько объектов. Для этого надо установить курсор мыши вблизи группы объектов, нажать левую клавишу мыши и, не отпуская ее, начать перемещать мышь. Появится пунктирная рамка, размеры которой будут изменяться при перемещении мыши. Все охваченные рамкой объекты становятся выделенными. Выделить все объекты также можно, используя команду Edit/Select All. После выделения объекта его можно копировать или перемещать в буфер промежуточного хранения, извлекать из буфера, а также удалять, используя стандартные приемы работы в Windows-программах.

2.2.6.3. Копирование и перемещение объектов в буфер промежуточного хранения

Для копирования объекта в буфер его необходимо предварительно выделить, а затем выполнить команду Edit/Copy или воспользоваться инструментом на панели инструментов.

Для вырезания объекта в буфер его необходимо предварительно выделить, а затем выполнить команду Edit/Cut или воспользоваться инстру-

ментом на панели инструментов. При выполнении данных операций следует иметь в виду, что объекты помещаются в собственный буфер MATLAB и недоступны из других приложений. Использование команды Edit/Copy model to Clipboard позволяет поместить графическое изображение модели в буфер Windows и, соответственно, делает его доступным для остальных программ.

Копирование можно выполнить и таким образом: нажать правую клавишу мыши, и не отпуская ее, переместить объект. При этом будет создана копия объекта, которую можно переместить в необходимое место.

2.2.6.4. Вставка объектов из буфера промежуточного хранения

Для вставки объекта из буфера необходимо предварительно указать место вставки, щелкнув левой клавишей мыши в предполагаемом месте вставки, а затем выполнить команду Edit/Paste или воспользоваться инструментом на панели инструментов.

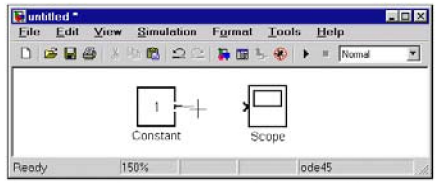


Рисунок 41. Начало создания соединения

2.2.6.5. Удаление объектов

Для удаления объекта его необходимо предварительно выделить, а затем выполнить команду Edit/Clear или воспользоваться клавишей Delete на клавиатуре. Следует учесть, что команда Clear удаляет блок без помещения его в буфер обмена. Однако эту операцию можно отменить командой меню File/Undo.

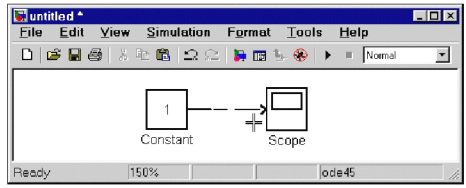


Рисунок 42. Завершение создания соединения

2.2.6.6. Соединение блоков

Для соединения блоков необходимо сначала установить курсор мыши на выходной порт одного из блоков. Курсор при этом превратится в большой крест из тонких линий (рисунок 41). Держа нажатой левую кноп-

ку мыши, нужно переместить курсор ко входному порту нужного блока. Курсор мыши примет вид креста из тонких сдвоенных линий (рисунок 42). После создания линии необходимо отпустить левую клавишу мыши. Свидетельством того, что соединение создано, будет жирная стрелка у входного порта блока. Выделение линии производится точно так же, как и выделение блока – одинарным щелчком левой клавиши мыши. Черные маркеры, расположенные в узлах соединительной линии, будут говорить о том, что линия выделена.

Создание петли линии соединения выполняется так же, как перемещение блока. Линия соединения выделяется, и затем нужная часть линии перемещается. Рисунок 43 поясняет этот процесс.

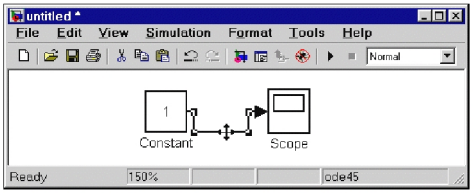


Рисунок 43. Создание петли в соединительной линии.

Удаление соединений выполняется так же, как и любых других объектов.

2.2.6.7. Изменение размеров блоков

Для изменения размера блока он выделяется, после чего курсор мыши надо установить на один из маркеров по углам блока. После превращения курсора в двустороннюю стрелку, необходимо нажать левую клавишу мыши и растянуть (или сжать) изображения блока. На рисунке 44 показан этот процесс. Размеры надписей блока при этом не изменяются.

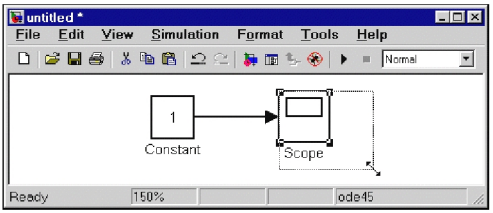


Рисунок 44. Изменение размера блока

2.2.6.8. Перемещение блоков

Любой блок модели можно переместить, выделив его и передвинув, держа нажатой левую клавишу мыши. Если ко входам и выходам блока подведены соединительные линии, то они не разрываются, а лишь сокращаются или увеличиваются в длине. В соединение можно также вставить

блок, имеющий один вход и один выход. Для этого его нужно расположить в требуемом месте соединительной линии.

2.2.6.9. Использование команд Undo и Redo

В процессе освоения программы пользователь может совершать действия, кажущиеся ему необратимыми (например, случайное удаление части модели, копирование и т.д.). В этом случае следует воспользоваться командой Undo — отмена последней операции. Команду можно вызвать с помощью кнопки  в панели инструментов окна модели или из меню Edit. Для восстановления отмененной операции служит команда Redo (инструмент ).

2.2.6.10. Форматирования объектов

В меню Format (так же, как и в контекстном меню, вызываемом нажатием правой клавиши мыши на объекте) находится набор команд форматирования блоков. Команды форматирования разделяются на несколько групп:

1. Изменение отображения надписей:

- Font — Форматирование шрифта надписей и текстовых блоков.
- Text alignment — Выравнивание текста в текстовых надписях.
- Flip name — Перемещение подписи блока.
- Show/Hide name — Отображение или скрытие подписи блока.

2.Изменение цветов отображения блоков:

- Foreground color — Выбор цвета линий для выделенных блоков.
- Background color — Выбор цвета фона выделенных блоков.
- Screen color — Выбор цвета фона для всего окна модели.

3. Изменение положения блока и его вида:

- Flip block – Зеркальное отображение относительно вертикальной оси симметрии.
- Rotate block – Поворот блока на 900 по часовой стрелке.
- Show drop shadow — Показ тени от блока.
- Show port labels — Показ меток портов.

4. Прочие установки:

- Library link display — Показ связей с библиотеками.
- Sample time colors — Выбор цвета блока индикации времени.
- Wide nonscalar lines — Увеличение/уменьшение ширины нескалярных линий.

- Signal dimensions — Показ размерности сигналов.
- Port data types — Показ данных о типе портов.
- Storage class — Класс памяти. Параметр, устанавливаемый при работе Real-Time Workshop.
- Execution order — Вывод порядкового номера блока в последовательности исполнения.

2.2.6.11. Установка параметров расчета и его выполнение

Перед выполнением расчетов необходимо предварительно задать параметры расчета. Задание параметров расчета выполняется в панели управления меню Simulation/Parameters. Вид панели управления приведен на рисунке 45.



Рисунок 45. Панель управления

Окно настройки параметров расчета имеет 4 вкладки:

- Solver (Расчет) — Установка параметров расчета модели.
- Workspace I/O (Ввод/вывод данных в рабочую область) — Установка параметров обмена данными с рабочей областью MATLAB.
- Diagnostics (Диагностика) — Выбор параметров диагностического режима.
- Advanced (Дополнительно) — Установка дополнительных параметров.

Установка параметров расчета модели выполняется с помощью элементов управления, размещенных на вкладке Solver. Эти элементы разделены на три группы (рисунок 45): Simulation time (Интервал моделирования или, иными словами, время расчета), Solver options (Параметры расчета), Output options (Параметры вывода).

2.2.6.12. Установка параметров расчета модели

Simulation time (Интервал моделирования или время расчета). Время расчета задается указанием начального (Start time) и конечного (Stop time)

значений времени расчета. Начальное время, как правило, задается равным нулю. Величина конечного времени задается пользователем, исходя из условий решаемой задачи.

Solver options (Параметры расчета). При выборе параметров расчета необходимо указать способ моделирования (Type) и метод расчета нового состояния системы. Для параметра Type доступны два варианта - с фиксированным (Fixed-step) или с переменным (Variable-step) шагом. Как правило, Variable-step используется для моделирования непрерывных систем, а Fixed-step - для дискретных.

Список методов расчета нового состояния системы содержит несколько вариантов. Первый вариант (discrete) используется для расчета дискретных систем. Остальные методы используются для расчета непрерывных систем. Эти методы различны для переменного (Variable-step) и для фиксированного (Fixed-step) шага времени, но, по сути, представляют собой процедуры решения систем дифференциальных уравнений. Подробное описание каждого из методов расчета состояний системы приведено во встроенной справочной системе MATLAB.

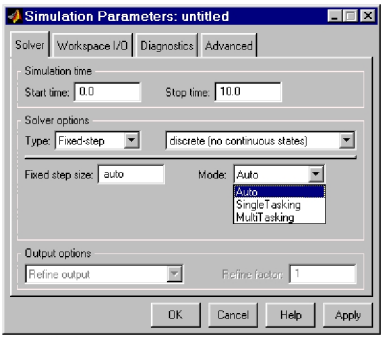


Рисунок 46. Вкладка Solver при выборе фиксированного шага расчета

Ниже двух раскрывающихся списков Type находится область, содержимое которой меняется в зависимости от выбранного способа изменения модельного времени. При выборе Fixed-step в данной области появляется текстовое поле Fixed-step size (величина фиксированного шага), позволяющее указывать величину шага моделирования (см. рисунок 46). Величина шага моделирования по умолчанию устанавливается системой автоматически (auto). Требуемая величина шага может быть введена вместо значения auto либо в форме числа, либо в виде вычисляемого выражения (то же самое относится и ко всем параметрам, устанавливаемым системой автоматически).

При выборе Fixed-step необходимо также задать режим расчета (Mode). Для параметра Mode доступны три варианта.

- MultiTasking (Многозадачный) – необходимо использовать, если в модели присутствуют параллельно работающие подсистемы, и результат работы модели зависит от временных параметров этих подсистем. Режим позволяет выявить несоответствие скорости и дискретности сигналов, пересылаемых блоками друг другу.
- SingleTasking (Однозадачный) - используется для тех моделей, в которых недостаточно строгая синхронизация работы отдельных составляющих не влияет на конечный результат моделирования.
- Auto (Автоматический выбор режима) - позволяет Simulink автоматически устанавливать режим MultiTasking для тех моделей, в которых используются блоки с различными скоростями передачи сигналов и режим SingleTasking для моделей, в которых содержатся блоки, оперирующие одинаковыми скоростями.

При выборе Variable-step в области появляются поля для установки трех параметров.

- Max step size - максимальный шаг расчета. По умолчанию он устанавливается автоматически (auto) и его значение в этом случае равно (StzopTime — StartTime)/50. Довольно часто это значение оказывается слишком большим, и наблюдаемые графики представляют собой ломаные (а не плавные) линии. В этом случае величину максимального шага расчета необходимо задавать явным образом.
- Min step size - минимальный шаг расчета.
- Initial step size - начальное значение шага моделирования.

При моделировании непрерывных систем с использованием переменного шага необходимо указать точность вычислений: относительную (Relative tolerance) и абсолютную (Absolute tolerance). По умолчанию они равны соответственно 10^{-3} и auto.

Output options (Параметры вывода). В нижней части вкладки Solver задаются настройки параметров вывода выходных сигналов моделируемой системы (Output options). Для данного параметра возможен выбор одного из трех вариантов:

Refine output (Скорректированный вывод) – позволяет изменять дискретность регистрации модельного времени и тех сигналов, которые сохраняются в рабочей области MATLAB с помощью блока To Workspace. Установка величины дискретности выполняется в строке редактирования Refine factor, расположенной справа. По умолчанию значение Refine

factor равно 1, это означает, что регистрация производится с шагом D t = 1 (то есть для каждого значения модельного времени:). Если задать Refine factor равным 2, это означает, что будет регистрироваться каждое второе значение сигналов, 3 - каждое третье т. д. Параметр Refine factor может принимать только целые положительные значения

Produce additional output (Дополнительный вывод) — обеспечивает дополнительную регистрацию параметров модели в заданные моменты времени; их значения вводятся в строке редактирования (в этом случае она называется Output times) в виде списка, заключенного в квадратные скобки. При использовании этого варианта базовый шаг регистрации (D t) равен 1. Значения времени в списке Output times могут быть дробными числами и иметь любую точность.

Produce specified output only (Формировать только заданный вывод) — устанавливает вывод параметров модели только в заданные моменты времени, которые указываются в поле Output times (Моменты времени вывода).

2.2.6.13. Установка параметров обмена с рабочей областью

Элементы, позволяющие управлять вводом и выводом в рабочую область MATLAB промежуточных данных и результатов моделирования, расположены на вкладке Workspace I/O (рисунок 47).

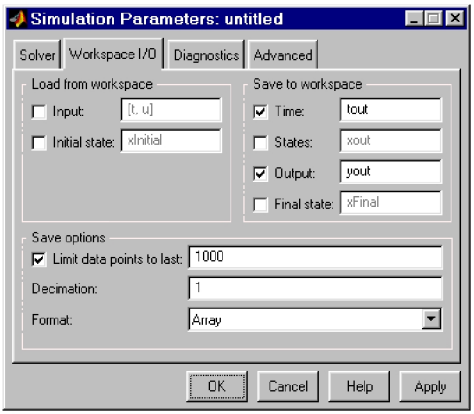


Рисунок 47. Окно установки параметров обмена с рабочей областью

Вкладка Workspace I/O диалогового окна установки параметров моделирования

Элементы вкладки разделены на 3 поля, которые описаны далее.

- Load from workspace (Загрузить из рабочей области). Если флажок Input (Входные данные) установлен, то в расположенном справа текстовом поле можно ввести формат данных, ко-

торые будут считываться из рабочей области MATLAB. Установка флажка Initial State (Начальное состояние) позволяет ввести в связанном с ним текстовом поле имя переменной, содержащей параметры начального состояния модели. Данные, указанные в полях Input и Initial State, передаются в исполняемую модель посредством одного или более блоков In (из раздела библиотеки Sources).

- Save to workspace (Записать в рабочую область) – Позволяет установить режим вывода значений сигналов в рабочую область MATLAB и задать их имена.
- Save options (Параметры записи) – Задает количество строк при передаче переменных в рабочую область. Если флажок Limit rows to last установлен, то в поле ввода можно указать количество передаваемых строк (отсчет строк производится от момента завершения расчета). Если флажок не установлен, то передаются все данные. Параметр Decimation (Исключение) задает шаг записи переменных в рабочую область (аналогично параметру Refine factor вкладки Solver). Параметр Format (формат данных) задает формат передаваемых в рабочую область данных. Доступные форматы Array (Массив), Structure (Структура), Structure With Time (Структура с дополнительным полем – "время").

2.2.6.14. Установка параметров диагностирования модели

Вкладка Diagnostics (рисунок 48) позволяет изменять перечень диагностических сообщений, выводимых Simulink в командном окне MATLAB, а также устанавливать дополнительные параметры диагностики модели.

Сообщения об ошибках или проблемных ситуациях, обнаруженных Simulink в ходе моделирования и требующих вмешательства разработчика, выводятся в командном окне MATLAB. Исходный перечень таких ситуаций и вид реакции на них приведен в списке на вкладке Diagnostics. Разработчик может указать вид реакции на каждое из них, используя группу переключателей в поле Action (они становятся доступны, если в списке выбрано одно из событий):

- None — игнорировать,
- Warning — выдать предупреждение и продолжить моделирование,
- Error — выдать сообщение об ошибке и остановить сеанс моделирования.

Выбранный вид реакции отображается в списке рядом с наименованием события.

2.2.6.15. Выполнение расчета

Запуск расчета выполняется с помощью выбора пункта меню Simulation/Start. или инструмента ▶ на панели инструментов. Процесс расчета можно завершить досрочно, выбрав пункт меню Simulation/Stop или инструмент ■. Расчет также можно остановить (Simulation/Pause) и затем продолжить (Simulation/Continue).

2.2.6.16. Завершение работы

Для завершения работы необходимо сохранить модель в файле, закрыть окно модели, окно обозревателя библиотек, а также основное окно пакета MATLAB.

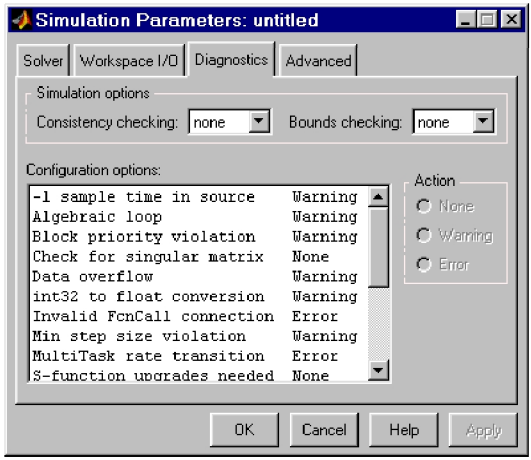


Рисунок 48. Вкладка Diagnostics окна установки параметров моделирования

2.3. Основные сведения о работе в LabVIEW

2.3.1. Вход в программу и выход из нее

Программа LabVIEW находится в среде Windows, где работа осуществляется, как правило, при помощи мыши.

Вход в программу LabVIEW осуществляется быстрым двойным щелчком левой клавиши мыши (ЛКМ) на пиктограмме LabVIEW, которую пользователь располагает, как правило, на рабочем столе. На экране появляются две совмещенные панели, расположенные каскадом. Одна из

них имеет серый фон рабочего пространства, другая — белый (рисунок 49). Для развертывания панелей на две половины экрана нужно одновременно нажать на клавиатуре Ctrl+T. После этой команды пустые панели будут расположены на экране слева и справа (возможен вариант сверху и снизу).

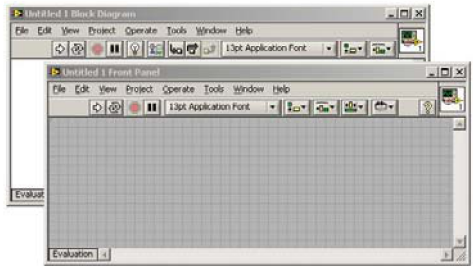


Рисунок 49. Положение панелей после вызова LabVIEW

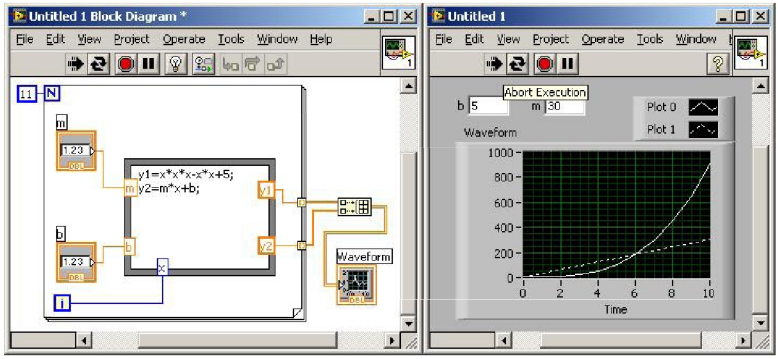


Рисунок 50. Рабочее состояние панелей LabView

Выход из программы осуществляется командой: File (Файл) Close (Закрыть). Если был создан новый файл или в вызванном файле были произведены изменения, то программа предложит сохранить новый файл или сохранить изменения в вызванном файле. Сохранение измененного файла происходит под прежним именем. Для нового файла нужно в строке названия файла указать его уникальное имя без расширения (расширение vi будет приписано программой). Новый файл будет сохранен в текущем каталоге, который перед нажатием клавиши «ОК» для сохранения файла может быть изменен на каталог удобный для пользователя.

После процедуры сохранения или несохранения файла выходим на рабочий стол с изображением окна LabVIEW с предложением трех альтернативных вариантов: Quit (Выход), Open VI (Открыть ВИ) и New VI (Новый ВИ). При выборе первой команды выходим из LabVIEW, при выборе второй команды перемещаемся в каталог LabVIEW для поиска нуж-

ного файла, при выборе третьей команды появляются совмещенные панель управления и функциональная панель для создания нового файла (ВИ — это аббревиатура виртуального инструмента).

Сохранить файл, не покидая панели, можно на любом этапе работы со схемой виртуального прибора при помощи команды File/Save (Файл/Сохранить), а также команды File/Save As... (Файл/Сохранить как ...)

2.3.2. Организация расположения панелей LabVIEW

2.3.2.1. Способы расположения панелей на экране

Панели соответствуют диалоговому интерфейсу пользователя с системой программирования LabVIEW. После запуска LabVIEW и команды Ctrl+T панели располагаются так, как показано на рисунке 51, а или б. Выбор вариантов осуществляется установкой команд главного меню (располагается на панели под строкой заголовка): Windows/Tile Left and Right (Окна/слева и справа) или .../ Tile Up and Down (.../ сверху и снизу).

Пунктами этого меню или клавишей в правом верхнем углу обеих панелей можно развернуть соответствующую панель на весь экран. Таким образом, по одному из вариантов (см. рисунок 51 а, б, в, г) на экране монитора можно расположить панели одного виртуального прибора.

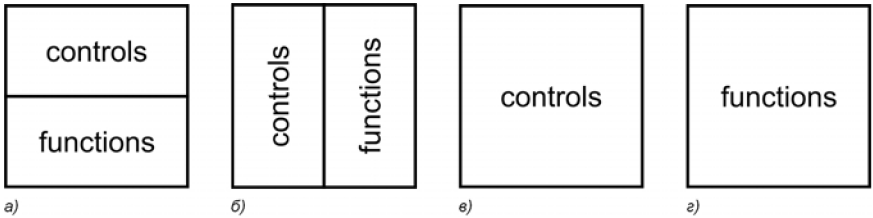


Рисунок 51. Схемы расположения панелей

Из двух вызванных панелей только одна является активной и клавиша на панели задач имеет светлый фон. Работа по «сборке» схемы виртуального прибора проводится на активной панели. Активная панель имеет строку заголовка синего цвета. Чтобы сделать другую панель активной, необходимо указать курсором мыши на нее в любом месте и щелкнуть ЛКМ, либо нажать на клавишу на панели задач. При нажатии на клавишу какого-либо окна на панели задач возможны два варианта выполнения этой команды: если окно свернуто, то оно развернется; если развернуто, но не активно, то оно станет активным. При необходимости могут быть вызваны несколько файлов с подготовленными заранее схемами или файлы из библиотеки LabVIEW. Файлы вызываются в составе своих двух панелей и изображенными на них схемами. После вызова файла появляется

только панель управления (она накладывается на панель управления предыдущего файла). Для появления второй (функциональной) панели необходимо нажать Ctrl+T, Активной по-прежнему является только одна панель из множества вызванных панелей.

2.3.2.2. Расположение нескольких панелей

На экране могут располагаться несколько панелей. Любую панель можно свернуть, т.е. поместить на панель задач. Для этого нужно на этой панели нажать левую клавишу из трех клавиш в правой части строки заголовка (с чертой внизу, символически означающей перенос панели в строку задач, расположенную внизу экрана). Мультипликацией перемещения панели с экрана на панель задач еще раз напоминают пользователю, что панель не закрыта, а свернута. Любую свернутую панель можно вновь развернуть, нажав клавишу с ее именем на панели задач. Панели можно перемещать в произвольных направлениях, поместив курсор на строку заголовка и нажимая на ЛКМ во время перемещения. Можно изменять размеры панелей, сдвигая любую из ее границ. Изменение размеров панелей и их перемещение предоставляют возможность пользователю располагать на экране сколько угодно панелей и как угодно, если это необходимо.

2.3.3. Структура файла и панелей LabVIEW

Файл LabVIEW, созданный разработчиками или пользователем, называют виртуальным инструментом (ВИ). Под виртуальным инструментом или прибором будем понимать имитатор (математическую модель) физического, в общем случае многофункционального измерительного прибора. Виртуальный прибор имитирует реальный прибор с помощью аппаратно — программных средств и зачастую выполняет измерительные функции физического прибора более точно. По замыслу разработчиков в состав виртуального инструмента входят две панели. Первая из этих панелей имитирует переднюю панель реального прибора. На этой панели, как и на передней панели реального прибора, располагаются органы управления и контролирующие приборы. Поэтому эту панель называют управляющей панелью (Controls). Вторая панель имитирует внутреннее содержание реального прибора, обеспечивающего функциональные возможности прибора. Поэтому вторую панель называют функциональной панелью (Functions).

Обе панели LabVIEW имеют одинаковую структуру (см. рисунок 49). Основным элементом каждой панели является ее рабочее пространство. Рабочим пространством панели будем называть часть пространства, на котором располагаются структурные объекты LabVIEW, входящие в состав какого-либо виртуального прибора. Остальные элементы панели яв-

ляются в основном средством «сборки» и редактирования схемы виртуального прибора. Рабочее пространство панели управления имеет фон серого цвета (рисунок 50), функциональной панели — белого цвета. На рабочем пространстве панели управления помещаются источники данных (например, цифровые элементы), приемники данных (например, те же цифровые элементы, но в режиме приема данных), графические индикаторы (виртуальные осциллографы) и управляющие элементы (например, кнопки управления).

На рабочем пространстве функциональной панели собирается схема будущего виртуального прибора. Если схема панели не умещается в видимой части рабочего пространства, то часть приборов можно разместить в невидимой части рабочего пространства (программа LabVIEW практически не ограничивает его размеры), но в этом случае пользуются линейками прокрутки.

В верхней части каждой панели находится строка заголовка с тремя управляющими клавишами в конце строки. Клавиши управляют панелью в целом и имеют, начиная слева, следующие названия: «Свернуть панель», «Развернуть панель на полный экран» и «Закрыть панель». Названия клавиш полностью соответствуют их назначению.

Ниже строки заголовка (см. рисунок 49) у каждой панели следует строка главного меню. Каждое меню содержит семь опций (шесть из них, кроме средней, имеют одинаковые названия).

Еще ниже расположены панели управляющих клавиш, содержащие по семь одинаковых клавиш.

Командами из опции Edit (Редактор) редактируют содержимое рабочего пространства панелей: удаляют выделенные объекты, копируют выделенные объекты в буфер LabVIEW (Clipboard), вставляют объекты из буфера и т.д. Команды редактора каждой панели относятся к своей панели.

Командами из опции Operate (выполнить) запускают и останавливают программу файла, с одной из панелей которого подаются указанные команды (эта панель является активной, о чем свидетельствует синий фон строки заголовка), сохраняют текущие значения независимых величин и значения величин проведенного виртуального эксперимента как значения по умолчанию при последующем использовании файла. Команды этой опции на обеих панелях относятся, естественно, к файлу в целом.

Командами из опции Windows осуществляется работа с управляющей и функциональной панелями как с окнами Windows. Здесь содержатся команды по структуре расположения панелей, одной из команд можно посмотреть содержимое буфера LabVIEW (Clipboard) и т.д.

Команды из опции Text позволяют изменять размер, цвет, шрифт алфавитно-цифровых надписей.

Командами из опции Help можно, в частности, получить оперативную информацию о конкретном объекте, на который в этот момент времени показывает указатель мыши, и многое другое для помощи пользователю.

В заключение краткого описания команд главных меню следует отметить, что многие команды меню продублированы командами с клавиатуры (сочетание клавиш указано около команд меню после открытия опции), а иногда продублированы и отдельными клавишами.

На рисунке 50 панели показаны в режиме редактирования, т.е. сборки схем. Об этом состоянии панелей можно судить по содержанию панели управляющих клавиш, расположенной ниже строки главного меню. В режиме отладки и вычислений программа LabVIEW закрывает некоторые команды главных меню панелей: Controls и Text — на панели управления и Functions и Text — на функциональной панели. Кроме этого, в режиме отладки и вычислений программа предлагает другой набор управляющих клавиш.



Рисунок 52. Главные меню и панели управляющих клавиш в режиме отладки

Клавиша «Пуск». Для нажатия клавиши необходимо поместить на нее указатель мыши и нажать левую клавишу мыши (ЛКМ). После нажатия клавиши программа, изображенная на панелях LabVIEW, запускается. Остановка выполнения программы должна быть предусмотрена самой программой. На этапе сборки схемы или при наличии в схеме ошибки изображение стрелки на клавише расколото на две части. Если при таком виде стрелки нажать на клавишу, то будет выведен на экран лист ошибок схемы данного файла. Пользователи, нажимая на клавишу с расколотой стрелкой, преследуют именно эту цель.

Клавиша изменения режима редактирования на режим отладки и наоборот. Режим отладки — это режим вычислений, которым можно управлять. Например, задать пошаговый режим выполнения программы.

Ниже в таблице перечислены возможные операции пользователя и соответствующие им режимы работы редактора LabView.

№	Операции пользователя	Режим
1	Пользоваться опциями главных меню панелей, управляющими клавишами, линейками прокрутки, строкой задач.	любой
2	Вызвать объект LabVIEW на панель управления, или функциональную панель.	любой
3	Занести имя объекта в метку.	любой
4	Изменить размеры объектов, удобно разместить их на панели, удалить лишнее.	“стрелка”
5	Внести числовые данные в цифровые источники.	“А”, “палец”
6	Создать поясняющие надписи на схемах.	“А”
7	Вызывать меню объектов ПКМ.	Любой, кроме режима “кисть”
8	Произвести раскраску объектов и фона.	“кисть”
9	Произвести пуск программы.	любой

2.3.4. Панель управления (Controls), приборы панели

Панель управления, как правило, располагается в левой части экрана. Вверху панели расположены: строка заголовка, строка главного меню и панель управляющих клавиш. В строке заголовка указано имя панели, совпадающее с именем вызванного файла. Командами из опции Controls вызываются приборы, которые располагаются на рабочем пространстве панели управления.

Одновременно с вызванным прибором на функциональную Панель выводится его терминал (вывод) с целью произвести соединение вызванного объекта с другими объектами функциональной схемы. Удалить объект, вызванный с панели управления, путем удаления его вывода на функциональной панели программа LabVIEW запрещает (в LabVIEW действует принцип: с какой панели объект вызван — с той панели и может быть удален). Удалить можно только сам объект (вместе с ним программно удаляется вывод).

При размещении объектов LabVIEW рабочее пространство смещается относительно окна, если пользователь делает попытку поместить объект за пределы видимой части (рабочее пространство можно смещать также линейками прокрутки, если они уже появились).

Панель управления является не только панелью, с которой происходит управление созданным новым виртуальным инструментом на основе элементов и объектов LabVIEW, но и является панелью, выполняющей контрольные функции. Поэтому для выполнения этих функций, кроме

управляющих элементов - кнопок, выключателей, источников данных различного типа (последние будем также называть задатчиками) на панели управления располагаются контролирующие элементы - приемники данных различного типа (в LabVIEW их называют индикаторами), в том числе графические индикаторы и другие элементы контроля.

Управляющие и контролирующие приборы вызываются из главного меню панели управления (меню View, пункт Controls Palette). Эти приборы показаны на рисунке 53, слева. На этом рисунке представлены 20 цифровых приборов различного исполнения.

Если для поиска прибора по известному имени перемещать указатель мыши при нажатой ЛКМ, то прибор, на который указывает курсор мыши, будет выделяться квадратной рамкой, а имя выделенного прибора будет отображено в нижней части массива приборов (см. рисунок 53). Так узнают имя любого прибора в массиве.

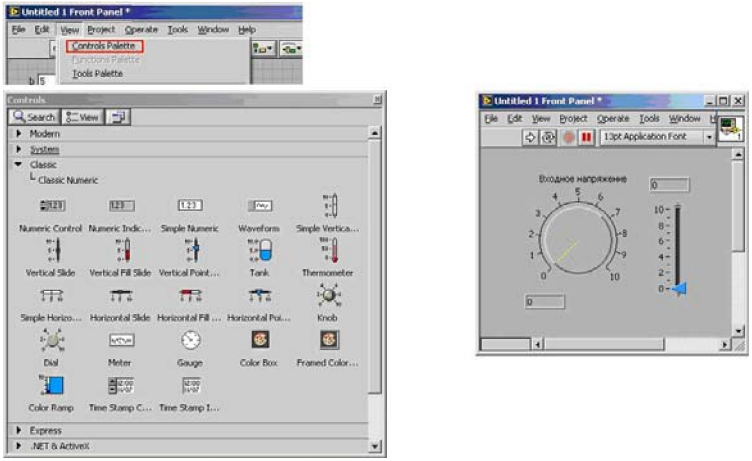


Рисунок 53. Цифровые приборы

Массивы с приборами или инструментами LabVIEW различного типа расположены в виде элементов прямоугольной матрицы. Например, массив приборов на рисунке 53 расположен в виде прямоугольной матрицы размером 5x5 (пять элементов массива — пустые). В дальнейшем, в целях экономии времени при поиске прибора, в маршруте к прибору будет указано не только имя прибора, но и его координаты как элемента матрицы. Например, элемент Knob (Круглая ручка) с координатами (4, 1) находится в 4-й строке и 1-м столбце, а путь для данного прибора будет записан так: Controls/Numeric/Knob (4, 1). Поэтому при указании координат прибора в массиве следует сразу же при входе в массив Приборов установить курсор мыши на элемент массива с указанными координатами и нажать ЛКМ. Не

отпуская ЛКМ, убедиться, что в нижней части массива отображено имя нужного прибора. Если в этом положении мыши отпустить ЛКМ, то искомый прибор будет вызван в рабочее пространство панели. Так вызван элемент Knob, изображенный на рисунке 53 справа.

Из опции Controls также вызываются (см. рисунок 53): управляющие элементы (кнопки, выключатели, световые элементы) (Boolean), строчные элементы для размещения в них текста и таблицы (String & Table), массивы и кластеры (Array & Cluster), графические индикаторы различного назначения (Graph) и другие.

2.3.5. Функциональная панель (Functions)

Структура функциональной панели такая же, как и структура панели управления.

Функциональная панель обычно находится на правой половине экрана. Она используется для сборки графической блок - схемы из виртуальных инструментов (ВИ) в форме иконок, соединенных между собой и реализующих операции обработки Данных и управления ходом выполнения программы. Иконка представляет собой графическую пиктограмму, отражающую функциональное назначение объекта. ВИ вызываются, например, по пути: Functions (Инструменты функциональной панели)/Analysis(Анализ)/Measurement (Измерение [имя прибора] (координаты в массиве).

Указанный массив изображен на рисунке 54. Инструменты массива и в этом случае можно рассматривать как элементы матрицы размером 4x4 (некоторые элементы пустые). В массиве по умолчанию обычно выделяется элемент с координатами (1, 1). Он помещен в жирную квадратную рамку и его имя отображено внизу под массивом.

После выбора и вызова необходимого инструмента соответствующая иконка появляется на функциональной панели и может служить объектом функциональной схемы.

С функциональной панели вызываются (см. рисунок 54): многослойные структуры, структуры для организации циклов в программе, формульный узел для вычислений, математические и физические константы (Structs & Constans); сумматоры, умножители и т.д. (Arithmetic); тригонометрические и логарифмические функции (Trig & Log); логические элементы сравнения (Comparison); преобразователи форматов чисел и структур (Conversion); преобразователи строк (String); преобразователи массивов и кластеров (Array & Cluster); генераторы сигналов различной формы, анализаторы спектра, фильтры, приборы преобразования Фурье и линейной алгебры (Analysis) и многие другие.

После соединения между собой выводов виртуальных инструментов, вызванных с функциональной панели, и выводов приборов, вызванных с

панели управления, получают функциональную схему нового виртуального инструмента.

Об опциях меню функциональной панели коротко, а о клавишах панели управляющих клавиш достаточно подробно было изложено в параграфе «Панель управления».

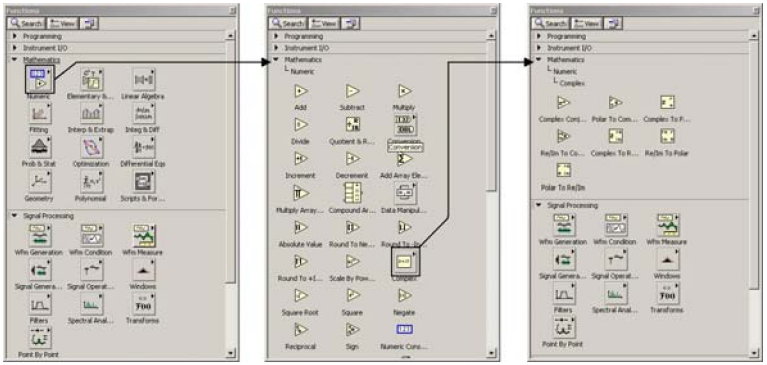


Рисунок 54. Измерительные приборы функциональной панели

2.3.6. Маркировка объекта панелей

2.3.6.1. Маркировка меткой

Рассмотрим маркировку приборов, вызываемых с панели управления. Примером может служить метка «Входное напряжение» прибора Knob (Круглая ручка) на рисунке 53 справа.

Маркировку приборов можно осуществить двумя способами: меткой и надписью.

Большинство приборов этой панели вызываются вместе с текстовым окном для метки (Label). Вызывать прибор можно в любом режиме редактирования. До первой команды после вызова прибора рамка метки в виде прямоугольника размером с букву и имеет темный фон. Рекомендуется сразу же, не переходя в режим «А» и не двигая мышь, набрать имя прибора с клавиатуры. Вне зависимости от режима редактирования и места расположения указателя мыши имя метки будет печататься в окне метки.

Если имя метки не записано сразу после вызова прибора, то метка исчезает после любого первого действия пользователя, связанного с нажатием клавиши.

К описанному способу внесения метки можно вернуться на любом этапе сборки схемы. Для этого нужно в любом режиме (кроме режима «Кисть») расположить указатель мыши на приборе или его выводе на функциональной панели и вызвать ПКМ команду из меню прибор Show/Label (Показать/метку) (рисунок 55) и с клавиатуры записать имя прибора одновременно в обе метки: метку объекта и метку его вывода.

Следует отметить, что после перехода в режим «А» и первого нажатия ЛКМ в строке управляющих клавиш (перед клавишей «Пуск») появляется дополнительная клавиша «Enter (с галочкой)». Нажатие этой клавиши после набора текста будет означать конец печати данного текста. Это обозначение конца печати в большом числе случаев является необязательным действием, так как первое действие другого режима содержит и эту команду.

2.3.6.2. Маркировка надписью

Если в режиме «А» в любом месте нажать ЛКМ, то в этом месте появится текстовое окно, в которое можно с клавиатуры вносить любые символы. Примером надписи может служить надпись «Задатчики» на рисунке 53 справа.

Иногда пользователи этой надписью помечают какой-либо прибор. Такая надпись в рамке не является элементом LabVIEW в ранге «метка» и не служит атрибутом прибора. Такая надпись в рамке требует для записи режима «А», не дублируется на другой панели, при перемещении прибора надпись в рамке остается на месте (надпись в рамке не является атрибутом прибора). Поэтому способ маркировки меткой имеет следующие преимущества по сравнению со способом маркировки надписью:

- выполняется без переключения режимов,
- имя прибора одновременно вносится в метку прибора на панели управления и в метку его вывода на функциональной панели,
- прибор и его метка являются единым объектом как на управляющей панели, так и функциональной (если прибор выделяется, то он выделяется вместе с меткой и передвигается вместе с ней даже в случае, когда метка отделена от прибора и находится далеко от него).

2.3.6.3. Удаление метки

Без прибора одну метку, имеющую имя, удалить нельзя. Для ее удаления необходимо предварительно стереть ее имя. Пустая метка исчезает после первого действия оператора, не связанного с меткой. Если метка мешает, то ее можно «спрятать» с возможностью при необходимости восстановить. Для этого необходимо устранить галочку у команды из меню прибора, вызванной ПКМ, Show/Label (с галочкой), т.е. выполнить эту команду возвратного действия и вместе с исчезновением галочки исчезнет и метка. Эту команду выполняют отдельно для метки прибора и его вывода.

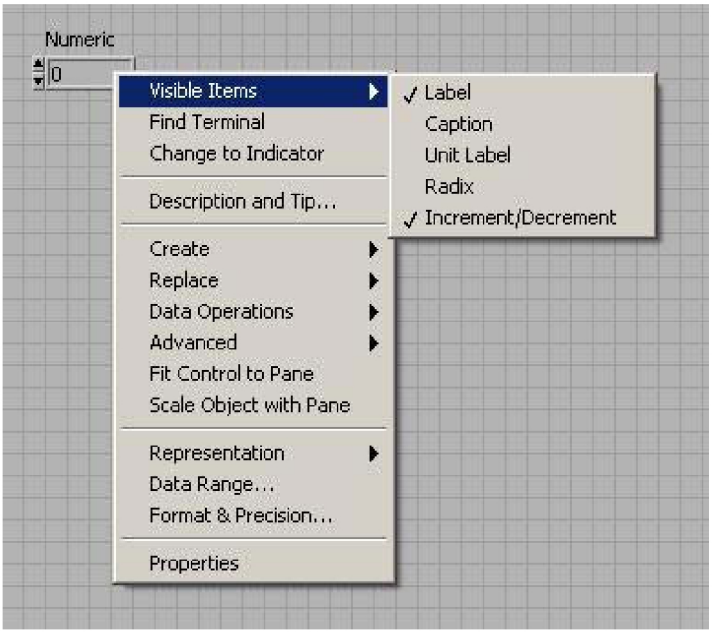


Рисунок 55. Вызов метки прибора

2.3.6.4. Особенности метки инструмента функциональной панели

Когда виртуальный инструмент вызывается с функциональной панели, то он не имеет метки. Если она необходима, ее можно вызвать и записать в нее имя указанным выше способом. Однако следует заметить, что имеются инструменты, например, генератор синусоидальной формы, метка которого из меню инструмента командой ПКМ Show/Label выводится вместе с именем, присвоенным в LabVIEW.

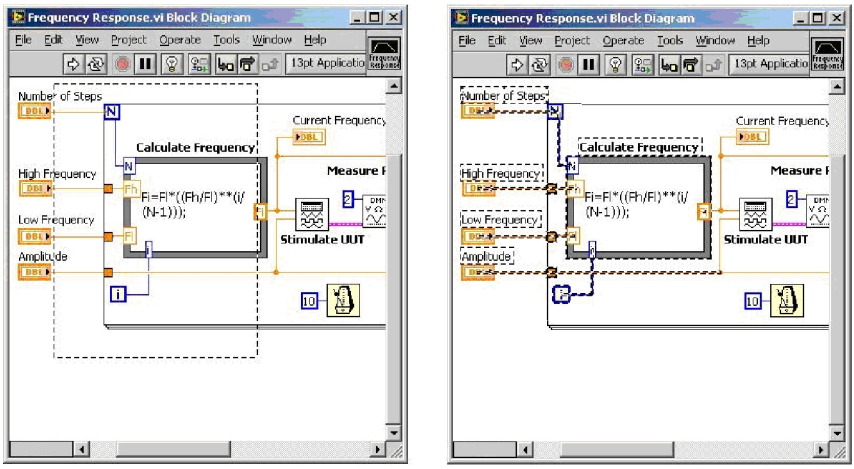
2.3.7. Выделение, перемещение и удаление объектов

Перемещение объектов осуществляется в режиме «Стрелка». Для перемещения объекта необходимо выделить объект. Чтобы выделить Объект, помещают указатель мыши на объект и щелкают ЛКМ: объект выделяется бегущей пунктирной рамкой. После этого, нажимая на ЛКМ, объект можно переместить в любое запланированное место. После отпускания ЛКМ объект фиксируется в этом месте, но выделение остается. Чтобы отменить выделение, необходимо щелкнуть ЛКМ за пределами выделенного объекта.

LabVIEW содержит приборы, которые имеют дополнительные элементы в качестве атрибутов. Например, цифровой прибор Knob содержит метку и цифровой дисплей как атрибуты (рисунок 55). Атрибуты прибо-

ров с точки зрения возможности их самостоятельного перемещения выступают в роли обычного объекта: их можно отрывать от «материнского объекта» и перемещать в любое место на панели. Однако, если выделить «материнский объект», то вместе с ним будут выделены все его атрибуты. Поэтому он перемещается вместе со своими атрибутами, причем взаимное пространственное расположение перемещаемых элементов не изменяется, где бы они не находились в исходном состоянии. Перемещать «семейство» можно, поместив указатель — стрелку мыши на любой выделенный элемент.

Система LabVIEW предоставляет возможность перемещать любую группу объектов, которая может быть помещена в прямоугольную рамку со сторонами, параллельными сторонам панели (см. рисунок 56).



а) *б)*

Рисунок 56. Выделение группы элементов: а – перед отпусканием левой кнопки мыши; б – после отпускания левой кнопки мыши

Для выделения необходимо мысленно заключить объекты, подлежащие перемещению, в прямоугольную рамку, учитывая, что будут также перемещены объекты, пересеченные рамкой. Затем поместить указатель — стрелку мыши в одну из вершин воображаемого прямоугольника, нажать ЛКМ и не отпускать ее. Если не двигать мышь, то на экране не будет заметно, как при нажатии ЛКМ запустилась программа создания прямоугольника, что одна соответствующая вершина угла будущего прямоугольника «закрепилась» на экране в точке, указанной острием стрелки мыши; другая вершина, диаметрально противоположная, «закрепилась» на острие подвижной стрелки мыши.

2.3.8. Соединение объектов LabVIEW

Программа LabVIEW позволяет соединить элементы на функциональной панели, если пользователь выполнил два необходимых условия. В любом канале передачи данных все подключенные к каналу выводы объектов должны быть согласованы: по типу самих выводов или по типу передаваемых и принимаемых данных.

Здесь детальнее остановимся только на первом условии. В цепях передачи сигналов (как и в электрических цепях передачи энергии) все выводы объектов разделяются на два типа: источники сигналов (энергии) и приемники сигналов (энергии). Между источником сигнала и источником энергии есть принципиальное различие. Источник энергии (например аккумулятор) может работать как в режиме генерирования энергии, так и в режиме потребления энергии. Источник сигнала во время работы схемы ВИ может только генерировать сигнал (на этапе редактирования схемы виртуального инструмента пользователь может изменить тип прибора с источника на приемник или наоборот).

При соединении элементов LabVIEW друг с другом в каналах связи действуют принципы аналогичные принципам теоретических основ электротехники (ТОЭ):

К каналу связи должен быть подключен только один источник данных.

К одному источнику данных может быть подключено неограниченное число приемников данных.

Соединение только одних приемников — абсурдно и поэтому программой LabVIEW признается ошибочным.

Например, программа LabVIEW не выполнит соединение, если пользователь будет пытаться соединить два источника или только два приемника.

Элементы в LabVIEW могут иметь только один вывод (Terminal) или несколько. Все приборы панели управления имеют один вывод. Подавляющее большинство инструментов функциональной панели имеют несколько выводов (исключение, например, составляют константы в массиве Functions/Structs & Constants./..., содержащие один вывод).

Вывод объекта, по которому объект передает данные внешним элементам, принято называть выходом объекта. Вывод объекта, по которому объект принимает данные от внешних элементов, принято называть входом объекта.

Если объект имеет один вывод и генерирует сигналы, то такой объект называют источником, а его вывод — выходом. Если объект имеет один вывод и принимает сигналы, то такой объект называют приемником, а его вывод — входом. По аналогии с объектом эти термины будем применять к отдельному выводу: выход — это вывод — источник, вход — это вывод

— приемник. Таким образом, выход и источник, вход и приемник в дальнейшем будем применять как синонимы при указании типа выводов.

2.3.8.1. Приборы-источники и приборы-приемники панели управления

Пользователь должен уметь определять тип любого соединяемого элемента в создаваемом им виртуальном инструменте на любом этапе сборки схемы. Рассмотрим два способа, с помощью которых можно определить тип прибора панели управления.

Первый способ определения типа прибора по меню прибора касается только приборов, вызываемых из опции Controls панели управления (рисунок 50). На рисунке 57, а приведено меню цифрового прибора — источника, а на рисунке 57, б приведено меню вывода Цифрового прибора — приемника. Перед анализом меню отметим, что в меню самого прибора панели управления (рисунок 57, а) вывод прибора называют Terminal, а сам прибор в меню его вывода на функциональной панели (рисунок 57, б) в зависимости от типа называют:

- управляющим элементом (Control), если он является источником данных, или
- управляемым элементом (Indicator), если он является приемником данных.

С помощью первой команды меню любого прибора панели управления можно изменить тип прибора с источника на приемник и наоборот. Если выполнить команду первой позиции меню (рисунок 57, а), то цифровой источник превратится в цифровой приемник. В данном случае исчезнут управляющие числом клавиши слева от цифрового прибора. При изменении типа прибора изменяется соответственно редакция его меню: некоторые команды меню изменяют свою команду на команду возвратного действия.

Программа предоставляет возможность изменять тип прибора не только из меню самого прибора, но и из меню его вывода (рисунок 57, б). Если выполнить команду первой позиции меню Change to Control (Сменить на источник), то цифровой приемник превратится в цифровой источник.

Важно отметить, что по смыслу первой команды меню самого прибора или его вывода можно определить тип прибора панели управления (источник он или приемник).

Например, по смыслу первой команды меню Change to Control (Сменить на источник) на рисунке 57, б делаем заключение, что вызвано меню прибора — приемника.

Второй способ определения типов элементов по виду его вывода касается приборов и панели управления и функциональной панели.

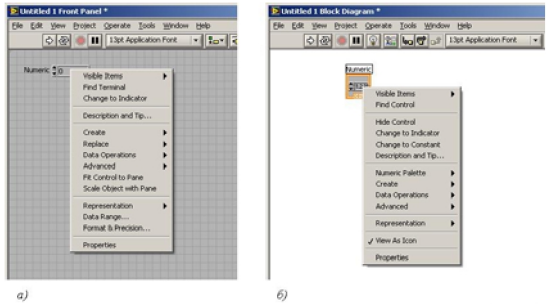


Рисунок 57. Меню прибора панели управления (а) и его вывода (б), вызываемых ПКМ

Все элементы, вызываемые с панели управления из опции Controls (Приборы панели управления), имеют один вывод. В качестве примеров на рисунке 58 приведены следующие приборы и их выводы:

а) цифровой источник (элемент «а» на панели управления), вызываемый командой Controls (Приборы панели управления)/Numeric (Цифровые приборы)/Digital Control (Цифровой источник данных);
б) цифровой приемник (элемент «б»), вызываемый командой Digital Indicator (Цифровой приемник данных) (1, 2);
в) массив как источник данных (элемент «в»), вызываемый командой .../ Array & Cluster (массив и кластер)/Array (массив) (1, 1);
г) массив как приемник данных (элемент «г»);
д) графический осциллограф в качестве приемника данных (элемент «д»), вызываемый командой /Graph (графический осциллограф)/Waveform Chart (осциллограф мгновенных значений) (1, 1).

На функциональной панели изображены выводы перечисленных приборов и обозначены теми же буквами. Выводы обозначаются прямоугольником одинакового размера с различным рисунком. Здесь важно обратить внимание на толщину линии внешнего прямоугольника: у источников эта линия жирная (элементы «а» и «в» на функциональней, панели), у приемников эта линия тонкая (элементы «б», «г» и «д»).

Таким образом, тип прибора панели управления можно установить по внешнему виду его вывода на функциональной панели: вывод прибора

источника выделен рамкой с жирной линией и является выходом, вывод прибора — приемника выделения не имеет и является входом.

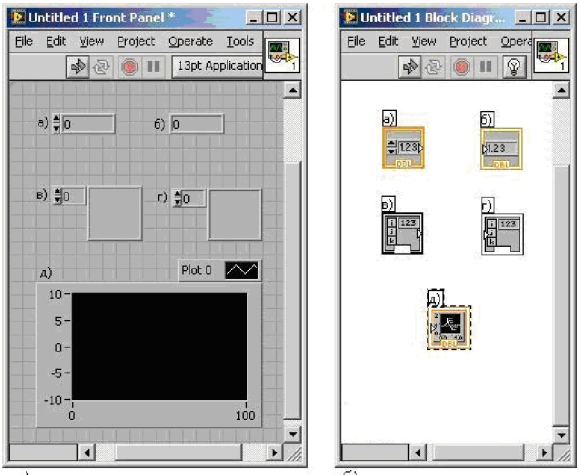


Рисунок 58. Источники и приемники данных

Для цифровых приборов имеется третий способ определения их типа. Цифровой источник (элемент «а» на панели управления на рисунке 58) внешне отличается от цифрового приемника (элемент «б»): он имеет слева две клавиши со стрелками. Нажатием на верхнюю клавишу увеличивают Показание цифрового источника на единицу, нажатием на нижнюю — уменьшают на единицу. Поэтому наличие двух клавиш со стрелками позволяет сразу же отличить цифровой источник от не имеющего клавиши цифрового приемника. Но это отличие источника от приемника касается только цифровых приборов. Действительно, массив-источник и массив-приемник (элементы «в» и «г») на панели управления не отличаются друг от друга.

Здесь уместно сказать о способе, который позволяет найти вывод конкретного прибора или, наоборот, по выводу найти место расположения самого прибора. В схеме со многими приборами и при отсутствии меток у прибора и меток у его вывода найти эту пару бывает нелегко (они расположены на разных панелях). В этом случае команда меню прибора на рисунке 57, а Find Terminal (Найти вывод на функциональной панели) выделяет бегущей пунктирной линией вывод этого прибора. Команда меню на рисунке 57, б. Find Indicator для прибора — приемника (или Find Control для прибора — источника) выделяет прибор — приемник (или прибор — источник) на панели управления.

2.3.8.2. Входы и выходы инструментов функциональной панели

Большинство инструментов функциональной панели имеют несколько входов и несколько выходов. Рассмотрим вопрос определения типа выводов виртуальных инструментов на функциональной панели. На рисунке 59 в качестве примера в верхнем ряду на функциональной панели приведены пять виртуальных инструментов, представленных иконками с функциональным рисунком, дающим представление о функциональном назначении инструмента (в меню инструмента такой вид значка инструмента называют Icon (Иконка)). В нижнем ряду, в том же порядке приведены те же пять виртуальных инструментов, представленных иконками со схемой выводов инструмента (в меню инструмента такой вид значка инструмента называют Terminals (Выводы)).

Приоритетным местом расположения входов инструмента является левая часть иконки, а выходов — правая часть. Например, инструмент «Синусоидальная функция» имеет два вывода: слева — вход, на который подается значение аргумента функции, справа — выход, на котором получают значение функции от этого значения аргумента. Отметим, что активный элемент выхода выделен жирной линией. Инструмент сравнения также имеет два вывода: слева вход, на который подается число, справа — выход, на котором получают результат сравнения в виде булевской функции. Выход выделен жирной линией. Например, сумматор имеет три вывода: два слева — входы, на которые подаются слагаемые, справа — выход, на котором получают сумму двух слагаемых. Выход выделен жирной линией. Анализатор спектра имеет два входа (слева) и два выхода, выделенных жирной линией (справа). Синусоидальный генератор имеет четыре входа и два также выделенных жирной линией выхода.

Таким образом, не только выходы приборов панели управления, расположенные на функциональной панели, но и выходы инструментов функциональной панели выделяются жирной линией. Поэтому по иконке со схемой выводов инструмента можем установить не только место расположения вывода, но и его тип (вход это или выход), т.е. можем установить элемент какого типа к нему можем подключать.

2.3.8.3. Названия выводов инструмента

При сборке схемы виртуального прибора необходимо знать функциональное назначение каждого вывода всех ВИ, входящих в состав прибора. Без этой информации собрать схему прибора практически невозможно. Функциональное назначение вывода раскрывает его название, но иконка со схемой выводов (рисунок 59) не имеет названий выводов. Ниже рассматриваются две возможности определить название каждого вывода.

Первую возможность узнать названия всех выводов инструмента предоставляет опция главного меню функциональной панели Help (Помощь).

На рисунке 59 приведено меню опции Help и окно помощи Help синусоидального генератора, вызванного командой Help/Show Help (Помощь/Показать окно помощи).

Вызванное окно помощи сразу же после вызова содержит информацию об элементе по умолчанию. Чтобы изменить содержание окна помощи, необходимо поместить указатель мыши на иконку генератора при любом виде иконки.

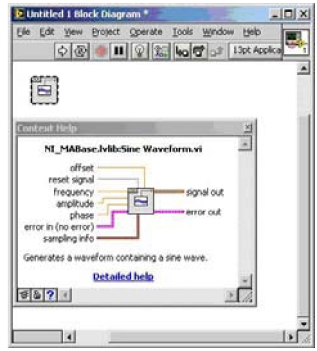


Рисунок 59. Краткое описание синусоидального генератора в окне помощи

В окне помощи на рисунке 59 указано название каждого вывода синусоидального генератора и структура их расположения на иконке. Структура выводов на иконке в окне помощи полностью соответствует структуре выводов на рисунке 58 (иконка «д» нижнего ряда).

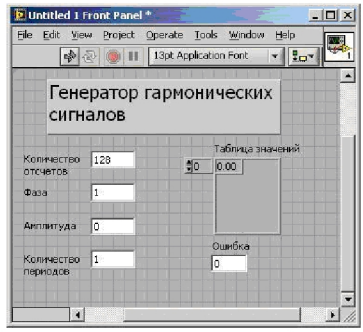


Рисунок 60.Фронтальная панель синусоидального генератора

Слева на панели расположены четыре входа управления параметрами генератора, а справа два выхода. Структура расположения выводов на панели для синусоидального генератора полностью совпадает со структурой схемы выводов на иконке генератора (см. рисунок 58, нижний ряд, элемент «д», а также над окном помощи на рисунке 59). Для других инст-

рументов структура выводов на панели может несколько отличаться от структуры схемы выводов на иконке инструмента.

Цифровые элементы четырех входов показывают значения величин по умолчанию:

Число выборок (Samples): 128.

Амплитуда сигнала (amplitude): 1,00.

Начальная фаза в градусах (phase (degrees)): 0,00.

Число циклов (периодов) (Cycles): 1,00.

На месте верхнего вывода панели синусоидального генератора, как и у многих других инструментов, имеются цифровой источник и одномерный массив. Цифровым источником можно задавать значения выборки, а в одномерном массиве просматривать значения функции источника, предварительно запустив источник клавишей «Пуск» из окна фронтальной панели. На рисунке 61 в цифровом источнике установлена выборка 0. Одномерной массив растянут за нижний угол вниз и в нем открылись другие позиции, следующие за значениями функции от выборки 0: от выборки 1, от выборки 2 и т.д. Это удобный сервис для пользователя.

Ниже выхода генератора расположен выход кода ошибок.

Названия выводов инструмента в окне помощи на рисунке 59 или на передней панели на рисунках 60 и 61 содержат емкую информацию о выводах. Во-первых, структура расположения выводов на передней панели почти в деталях совпадает со структурой выводов на иконке инструмента. Во-вторых, по названию вывода можно установить его функциональное назначение и определить тип вывода.

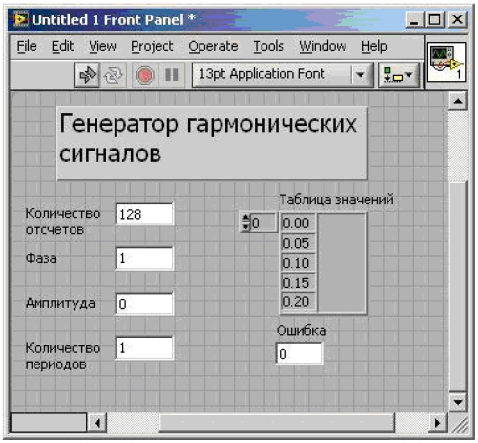


Рисунок 61. Просмотр функции генератора в зависимости от номера выборки

2.3.8.4. Соединение виртуальных инструментов

Инструменты LabVIEW соединяются между собой на функциональной панели путем соединения соответствующих выводов инструментов с помощью "соединительного провода". Под соединительным проводом будем понимать программный инструмент, имитирующий канал передачи данных. Провод, как и выводы инструментов, в режиме "Катушка" является активным элементом: к проводу можно подключиться в любом месте.

Вначале перечислим основные принципы соединения:

1. Соединение инструментов, представленных иконками, осуществляется на функциональной панели в режиме "Катушка". В этом режиме указатель мыши приобретает форму катушки. Активным элементом катушки является кончик провода катушки.
2. Участки соединительных проводов на функциональной панели могут располагаться только горизонтально или вертикально.
3. Во время прокладки пользователем трассы провода программа LabVIEW обозначает ее пунктирной линией. Если соединение выполнено правильно, то программа преобразует пунктирную линию в сплошную линию определенного цвета. Неправильное соединение остается обозначенным пунктирной линией. Оно требует устранения ошибки, точнее, согласования подключаемых элементов.
4. Сложное соединение нескольких элементов образуется совокупностью простых соединений его двух элементов.
5. Порядок соединения элементов никак не связан с направлением передачи сигналов в соединительных проводах и может выполняться в общем случае, как и в электрической цепи, в произвольной последовательности. Поэтому, выполняя разветвленное правильное соединение, на начальном этапе можно допускать наличие его "неправильной" части (она будет обозначена пунктирной линией). Например, можно начать разветвленное соединение с соединения двух приемников. После завершения разветвленного соединения все пунктирные линии преобразуются в сплошные провода, свидетельствующие, что в итоге соединение выполнено правильно.
6. Провода могут перекрещиваться без соединения, могут пересекать иконки инструментов (при этом иконки находятся на переднем плане, закрывая провода).
7. Трасса соединительного провода выбирается пользователем и с учетом пересечения 2 может быть любой.

8. Любой провод может быть удален.

Так как сложное соединение есть совокупность простых соединений его двух элементов (двух точек схемы), то ниже на простых примерах описаны основные приемы соединения в основном двух элементов.

Перед тем, как проводником будут соединены два элемента, пользователь должен проложить трассу соединительного провода по точкам, которые он указывает щелчком ЛКМ в любом месте функциональной панели. Чтобы трасса начала разворачиваться, первой точкой трассы должен быть элемент, к которому можно «подключиться» (это может быть либо вывод прибора панели управления, либо один из выводов Инструмента функциональной панели, либо соединительный провод).

В качестве примера поставим конкретную задачу: пусть необходимо выполнить соединение, изображенное на рисунке 62, б, где выход цифрового задатчика DBL соединен с входом установки начальной фазы сигнала синусоидального генератора. Рассмотрим в деталях, как прокладывается трасса в этом простом случае и как оптимальней ее проложить.

Если режим «Катушка» не установлен, переходим в него нажатием клавиши «Катушка» на панели управляющих клавиш. В этом режиме будет мигать любой вывод любого прибора и инструмента, на который в данный момент указывает кончик провода катушки-указателя мыши, до тех пор, пока указатель мыши не будет перемещен в другое место. Мигание происходит без нажатия клавиш мыши.

Поместим кончик провода катушки на DBL (см. рисунок 62, а). Так как вся площадь DBL предоставлена единственному выходу цифрового задатчика, то весь DBL начинает мигать. Щелчком ЛКМ закрепляем на DBL первую реперную точку трассы. Программа поместит точку закрепления примерно в центр DBL. Если теперь вывести катушку за пределы DBL, то последний перестанет мигать, но за кончиком провода катушки будет тянуться бегущая пунктирная линия трассы (типа бегущих огней), закрепленная в центре DBL.

Программа LabVIEW может прокладывать трассу провода только прямолинейными участками, расположенными только горизонтально или вертикально. Поэтому трасса провода между двумя соседними реперными точками в общем случае образуется двумя участками: горизонтальной и вертикальной проекциями отрезка воображаемой прямой линии, соединяющего соседние реперные точки. Будем перемещать мышь (рисунок 62, а) в направлении от DBL вправо и вниз по любой траектории. Трасса, закрепленная в двух точках: неподвижной — центре DBL и подвижной — на кончике провода катушки-курсора, вне зависимости от траектории будет разворачиваться углом. Возможны два варианта разворачивания трассы: по варианту 1, ниже отрезка, соединяющего две указанные точки, или по варианту 2, выше отрезка.

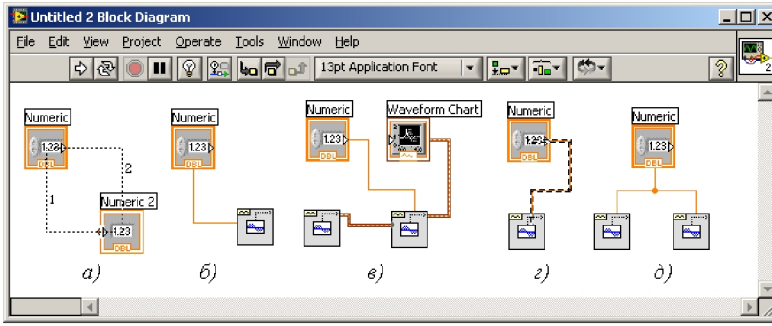


Рисунок 62. Соединение виртуальных инструментов на функциональной панели

Если щелчком ЛКМ поставить вторую реперную точку (сам угол, образованный программой, не является реперной точкой) в положении катушки, указанном на рисунке 62, а, то бегущая пунктирная линия превратится в неподвижную пунктирную линию. Это будет означать, что вторая точка закреплена, а трасса между первой реперной точкой и второй также зафиксирована. Теперь можно аналогично продолжать разворачивать трассу дальше: один ее конец закреплен во второй неподвижной реперной точке, другой «привязан» к кончику провода подвижной катушки-указателя мыши. Трасса по-прежнему будет разворачиваться углом, а разворачивающаяся трасса будет опять обозначена бегущей пунктирной линией. При необходимости незаконченную трассу можно ликвидировать щелчком ПКМ и начать процедуру прокладки трассы снова.

Нередко выбор между вариантом 1 и вариантом 2. (см. рисунок 62, а) имеет принципиальное значение. На примере рисунка 62, а рассмотрим приём, позволяющий пользователю выбирать варианты трассы между двумя точками. Вариант 1 или вариант 2 трассы соединительного провода на рисунке 62, а можно выбирать, управляя направлением выхода провода от DBL. Провод может выходить от центра элемента либо вертикально (вверх или вниз по варианту 1), либо горизонтально (влево или вправо по варианту 2). Если начинать движение катушкой — указателем мыши от DBL ближе к вертикальному направлению (под углом меньшим, чем 45 градусов), то провод будет выходить вертикально по варианту 1, если ближе к горизонтальному, то — горизонтально по варианту 2. Предположим, что выбран вариант 1. Поэтому от DBL начинаем движение катушкой вниз ближе к вертикальному направлению и разворачиваем трассу провода по варианту 1. Если от DBL начинать движение катушкой вправо, ближе к горизонтальному направлению, то будет разворачиваться трасса провода по варианту 2.

Закончим поставленную выше задачу по соединению выхода цифрового задатчика с входом установки начальной фазы синусоидального ге-

нератора (обозначен на рисунке 62, б и является третьим элементом сверху на левой стороне иконки со схемой выводов на рисунке 62, г). Развернув трассу по варианту 1, помещаем кончик провода (активный элемент) катушки на вход генератора. Вход начинает мигать при любом типе иконки. Щелчком ЛКМ закрепляем конец трассы на этом входе. При правильном соединении пунктирная линия трассы превращается в сплошную линию провода и окрашивается (см. рисунок 62, б), при неправильном — остается пунктирной и требует устранения ошибки, точнее, согласования подключаемых элементов. В данном случае элементы согласованы: результат соединения представлен на рисунке 62, б.

Таким образом, указав щелчками ЛКМ начальную и конечную точки соединения, можно произвести соединение двух любых точек схемы, а значит выполнить все без исключения соединения. Выполняя соединения в схеме ВИ, можно временно, в незаконченном соединении допускать провода, изображенные пунктиром, если окончательное соединение приводит к правильному результату.

Программа LabVIEW допускает прокладку провода как угодно: провода могут перекрещиваться, не соединяясь между собой; могут пересекать иконки объекта (при этом иконка остается на переднем плане и закрывает провод). Пример такой прокладки провода изображен на рисунке 62, в. Соединительный провод выходит из цифрового задатчика DBL вправо, пересекает правую иконку сверху вниз, огибает ее справа, перекрещивается с двумя проводами (в том числе с собой) и подключается к входу установки начальной фазы левого синусоидального генератора. Программа LabVIEW признает соединение, выполненное на рисунке 62, в, правильным. Но для другого пользователя представляет значительную трудность разобраться с таким соединением.

Можно выполнить все соединения путем указания щелчками ЛКМ начальной и конечной точки. Такое соединение дает явное преимущество во времени перед любым другим способом прокладки провода, но имеет существенный недостаток: окончание провода может быть прикрыто иконкой инструмента и не будет видно, к какому выводу инструмента он подключен. Например, если выполнить соединение на рисунке 62, б с трассой по варианту 2 (рисунок 62, а), то конец провода будет прикрыт иконкой генератора. В этом случае подключение генератора будет выполнено по схеме на рисунке 62, г, где по внешнему виду соединения нельзя сказать, к какому выводу из шести выводов генератора подключен нижний конец провода. В подобных случаях, чтобы увидеть вывод, к которому подключен провод, необходимо перейти в режим «Стрелка» и щелчком ЛКМ выделить проводник. При выделенном проводнике можно увидеть, как он действительно подключен (рисунок 62, д). Эти действия тре-

буют затраты дополнительного времени и поэтому не следует рекомендовать соединения, при которых объекты схемы закрывают провода.

Оптимальным вариантом прокладки провода следует признать такой вариант, когда выполнены два условия. Первое условие: провод не закрыт иконками, в том числе той, к которой он подключен, и по схеме соединения на функциональной панели без дополнительных процедур можно видеть, к каким выводам иконки провод подключен. О приеме, с помощью которого можно выполнить первое условие, сообщается ниже. Второе условие: на трассе провода установлено минимум реперных точек.

Рассмотрим вопрос, как выполнить первое условие, т.е. как следует проводить соединения на функциональной панели, чтобы было видно без дополнительных процедур, к какому выводу инструмента подходит каждый провод..

Все инструменты LabVIEW имеют выводы, расположенные по периферии иконки, и поэтому каждый вывод имеет, как минимум, одну сторону на внешнем контуре иконки (см. рисунок 62, г). Поэтому отводить и подводить соединительный провод рекомендуется через периферийную сторону вывода, к которому он подключается (на рисунке 62, б). В этом случае по точке входа провода в иконку нетрудно установить, к какому выводу он подключен: этому выводу принадлежит точка входа провода в иконку. Это заключение нетрудно сделать как при иконке со схемой выводов, так и при иконке с функциональным рисунком. Если для такого соединения потребуется большее количество изгибов, чем один, то цель достигается расстановкой достаточного количества реперных точек трассы, закрепляя их щелчком ЛКМ в выбранных точках изгиба.

2.3.8.5. Перемещение и удаление проводов

Перемещение или удаление проводов проводится так же, как и любого другого объекта. Нужно установить режим «Стрелка», нажав одноименную клавишу, и в этом режиме выделить удаляемое. Соединение проводов может быть разветвленным и иметь один или несколько узлов. Узел может быть образован соединением проводов или находиться в центре одного из элементов. Если остриём стрелки указать на провод, то одиночным щелчком ЛКМ выделяется прямолинейный участок провода (сегмент), двойным щелчком выделяется весь провод со всеми изгибами от центра элемента до узла (ветвь), тройным щелчком выделяются все провода разветвленного соединения. Например, на рисунке 62, е три элемента соединены проводами с общим узлом, образованным только проводами. Провод 1 и провод 2 имеют по два прямолинейных участка, провод 3 имеет три прямолинейных участка. Поместив на один сегмент остриё стрелки курсора мыши, одиночным щелчком ЛКМ выделяется только этот сегмент. Выделенный сегмент помещается в вытянутую вдоль провода пунк-

тирную бегущую рамку (см. рисунок 62, д). Двойной щелчок ЛКМ по одному из двух сегментов провода 1 выделяет ветвь 1 от узла до элемента. Аналогично для ветви 2 и ветви 3: двойной щелчок выделяет всю ветвь. Тройной щелчок ЛКМ на одном из сегментов выделяет все разветвленное соединение.

Грубое перемещение выделенных элемента схемы или группы элементов, в том числе и проводов, осуществляется мышью. Для этого необходимо нажать ЛКМ на выделенных проводах и, не отпуская клавиши, мышью переместить провода на нужное место. Для точного перемещения обходятся без мыши, а перемещением управляют четырьмя клавишами клавиатуры с четырьмя направлениями по горизонтали и вертикали.

Для удаления выделенных проводов нужно нажать на клавиатуре клавишу «Delete» или «Backspace».

Если на схеме присутствуют один провод или целая группа проводов, изображенных пунктиром, можно их удалить одновременно командой в главном меню Edit (Редактирование)/Remove Bad Wires (Удалить неправильно соединенные провода) или нажать одновременно Ctrl+B на клавиатуре. Нужно заметить, что в разветвленном соединении при одном ошибочном элементе программа может заменить все провода соединения пунктирными линиями. Прежде чем удалить провода, отмеченные пунктирной линией, целесообразно проверить схему и исправить ошибку, после чего пунктирные линии автоматически преобразуются в сплошные линии проводов, свидетельствующих о правильном соединении.

Рассмотрим простейший пример соединения элементов LabVIEW. Безусловно, программа LabVIEW предназначена в основном для обработки сигналов, построения виртуальных приборов, измеряющих параметры этих сигналов, оптимального управления физическими объектами и лишь в небольшой степени для выполнения расчетов. Тем не менее в качестве первого примера учебного пособия можно будет рассмотреть расчет простейшей электрической цепи и дать подробное описание сборки схемы. Читателю рекомендуется собрать схему на экране компьютера с использованием программы LabVIEW.

2.3.8.6. Описание сборки схемы LabVIEW

На панели управления (рисунок 63, а) находятся четыре цифровых элемента: три задатчика и один приемник. Задатчики 1, 2 и 3 задают соответственно значения параметров источника и двух резисторов. Значения цифр задатчиков устанавливает пользователь. Цифровой элемент приемник выполняет функции элемента, куда будет записан результат выполнения программы. Выводы задатчиков на функциональной панели имеют внешний прямоугольник, изображенный жирной линией, а выход приемника — тонкой линией. Кроме выводов приборов панели управления ос-

тальные элементы функциональной панели (рисунок 63, б) вызываются из меню последней. В данном случае к ним относятся сумматор и делитель, которые необходимы для выполнения арифметических действий уравнения, приведенного в решении задачи.

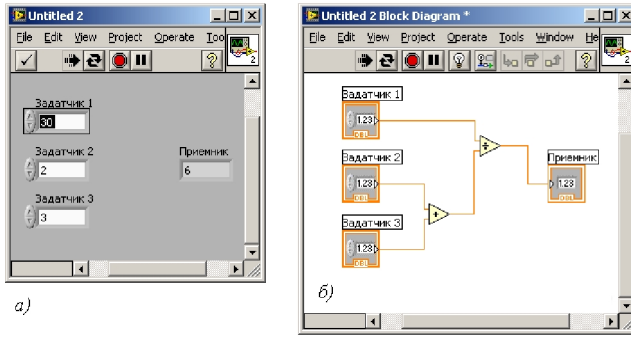


Рисунок 63. Пример соединения элементов

Соединение элементов функциональной панели должно быть выполнено в соответствии с данным уравнением.

Вначале с панели управления вызываем цифровой источник командой Controls (Элементы панели управления)/Numeric (Цифровые)/Digital Control (Цифровой источник) (1,1). Для этого помещаем указатель мыши на опцию главного меню Controls и щелкаем ЛКМ. Появляется каталог приборов, вызываемых с панели управления, из которого выбираем Numeric. В меню опции Numeric содержится массив из 20 цифровых приборов различной формы, расположенных по строкам и столбцам (см. рисунок 54, слева). В команде вызова прибора указаны его координаты (1,1) в массиве (подобные координаты будут широко применяться ниже для указания конкретного прибора в массиве приборов). Эти координаты имеет прибор первой строки и первого столбца. По умолчанию он обведен квадратной рамкой и его имя'Digital Control (Цифровой источник) записано под массивом. Помещаем указатель мыши на этот прибор и вызываем его щелчком ЛКМ (или отпускаем ЛКМ, если при входе в массив ЛКМ была нажата (такой вариант возможен)). Цифровой источник будет выведен на экран: источник — на панель управления, а его вывод (Terminal) — на функциональную панель. Сразу же после вызова, не трогая мышь, с клавиатуры записываем в метку «Задатчик 1».

С целью тиражирования цифрового элемента переходим в режим «Стрелка» нажатием одноименной клавиши на панели управляющих клавиш. Щелчком ЛКМ на цифровом элементе (не на метке) выделяем задатчик 1 и его метку. Нажав Ctrl, переходим из режима перемещения объекта в режим тиражирования и не отпускаем эту клавишу до конца процесса

тиражирования. Нажимаем ЛКМ на задатчике 1 и, не отпуская, перемещаем мышью контур будущего задатчика 2 вниз (задатчик Г остается на месте). Отпустив ЛКМ, получаем первую копию задатчика 1. Не двигая мышь, опять нажимаем ЛКМ и перемещаем мышью контур будущего задатчика 3 вниз. Отпустив ЛКМ, получаем вторую Копию задатчика 1. Сделав еще одну копию, получаем на обеих панелях четыре цифровых задатчика (на панели управления — сами элементы, на функциональной панели их выводы, точнее, выходы задатчиков для их подключения).

У первой копии имя «задатчик 1» изменяем на имя «задатчик 2». Для этого переходим в режим «А», помещаем указатель мыши в метку задатчика 2 и исправляем цифру «1» на «2». Аналогично исправляем метку в задатчике 3. Третью копию задатчика 1 (четвертый элемент) преобразуем в цифровой приемник. Для этого, указывая курсором на четвертый элемент (можно в режиме «А»), нажимаем ПКМ и, не отпуская клавиши, в появившемся меню цифрового задатчика выбираем первую команду меню Change to Indicator (Заменить на приемник) и отпускаем ПКМ. У элемента панели управления исчезнут две клавиши со стрелками, расположенные слева. Разместим сумматор и делитель в соответствии с рисунок 63, б.

Только для учебных целей, чтобы показать, где расположены выводы сумматора и делителя, сделаем ниже копии этих элементов описанным выше способом. У копий иконку с функциональным рисунком заменим иконкой со схемой выводов. Для этого ПКМ вызываем меню каждой копии и выбираем команду Show Terminals (Показать схему выводов). После выполнения команды функциональный рисунок иконки сменится схемой выводов. В своей практической деятельности пользователь может вызвать схему выводов у самих элементов функциональной схемы. В любом варианте необходимо знать, что у сумматора слева (сверху и снизу) размещены входы двух слагаемых, а справа — выход суммы; что у делителя слева верхний вход есть вход делимого, нижний — вход делителя, а справа — выход частного. При необходимости получить подобную информацию следует рекомендовать обращение к Help.

Произведем сведение элементов по схеме на рисунке 63, б, которая соответствует уравнению в решении задачи. Переходим в режим «Катушка». Помещаем кончик провода катушки на задатчик 1: он начинает мигать. Щелчком ЛКМ закрепляем начало трассы на выводе (выходе) задатчика 1 и начинаем движение мышью от него вправо. Убедившись, что трасса разворачивается вправо (возможен вариант вниз, но этот вариант не оптимален), по произвольной траектории, не нажимая клавиши мыши, помещаем кончик провода катушки на верхний вход делителя. Элемент входа начинает мигать. В этом положении указателя мыши щелчком ЛКМ закрепляем конец трассы: бегущая пунктирная трасса превращается в провод, изображенный красной сплошной линией. Первое соединение

выполнено, катушка готова выполнить другое соединение. Выходы задатчиков 2 и 3 соединяем с входами сумматора. Чтобы не прикрыть провода иконкой сумматора, может случиться так, что будет необходимо при прокладке трассы поставить одну или несколько промежуточных реперных точек между соединяемыми элементами (реперные точки можно ставить где угодно и сколько угодно). Цель будет достигнута, если провод будет подходить к выводу ВИ с периферийной стороны вывода.

И, наконец, соединяем выход делителя с цифровым приемником. Если схема собрана правильно, то на панели управляющих клавиш стрелка на клавише «Пуск» не расколота пополам. Здесь следует заметить, что схема может быть неполной, но правильной.

Нажав на клавишу «Пуск», запустите программу и посмотрите результат: I = 6,00 А. Он записывается согласно схеме соединений в цифровой приемник.

Часть 3. Исследование динамических характеристик САР частоты вращения ГТД

3.1. Назначение и принцип действия САР

Объектом регулирования является турбокомпрессор ГТД (рисунок 64), служащий для привода энергетической установки, например генератора пиковой электростанции, компрессорной установки. Гидромеханический регулятор непрямого действия предназначен для изменения и поддержания заданной частоты вращения ротора двигателя и энергетической установки (нагрузки). За регулируемый параметр принимается частота вращения ротора двигателя n, а за регулирующий фактор - расход топлива в двигателе G_T. Управляющим воздействием является изменение угла установки рычага управления двигателя (РУД) $\alpha_{РУД}$, а возмущающим воздействием - изменение момента внешней нагрузки M_H.

Регулятор частоты вращения включает в себя центробежный чувствительный элемент, приводимый во вращение через коническую зубчатую передачу от ротора двигателя, гидроусилитель, сервопоршень с золотниковым распределителем и исполнительный механизм в виде дроссельной иглы.

Рассмотрим работу САР при изменении внешней нагрузки. Пусть нагрузка, действующая на ротор двигателя 1, уменьшилась, что привело к увеличению частоты вращения n. При этом под действием центробежных сил грузиков 2 шток 3, сжимая пружину 4, переместится вниз. Ход пружины 4 снизу ограничен задающим устройством 5. Горизонтальный рычаг 6, связанный со штоком 3, повернется относительно правого его конца против часовой стрелки и приоткроет сопло-заслонку 7. Гидравлическое сопротивление сопла-заслонки 7 уменьшится и давление в полости над поршнем 8 снизится. На поршень 8 снизу действуют сила давления топлива в сливной магистрали и сила поджатия пружин 9 и 10.

Под действием избыточной силы поршень 8 переместится вверх и приоткроет сопло-заслонку 7. При движении поршня 8 вверх ослабится поджатие пружины 10, что приведет к уменьшению силы, действующей сверху на золотник 11. На золотник 11 снизу действует сила давления топлива в полости 12, которая сообщается через жиклер 13 с каналом 14 за дроссельной иглой 15. Золотник 11 под действием избыточной силы переместится вверх и соединит правую полость сервопоршня 16 с каналом за клапаном постоянного давления (КПД) , а левую полость - с каналом слива.

Сервопоршень 16 под действием перепада давления $p_{КПД} - p_{СЛ}$ переместится влево и уменьшит площадь проходного сечения дроссельной

иглы. Давление за дроссельной иглой 15 (на входе в форсунки) уменьшится, что приведет к снижению расхода топлива G_T в двигателе. При этом предполагается, что давление на входе в дроссельную иглу поддерживается постоянным $(p_T \cong \text{const})$.

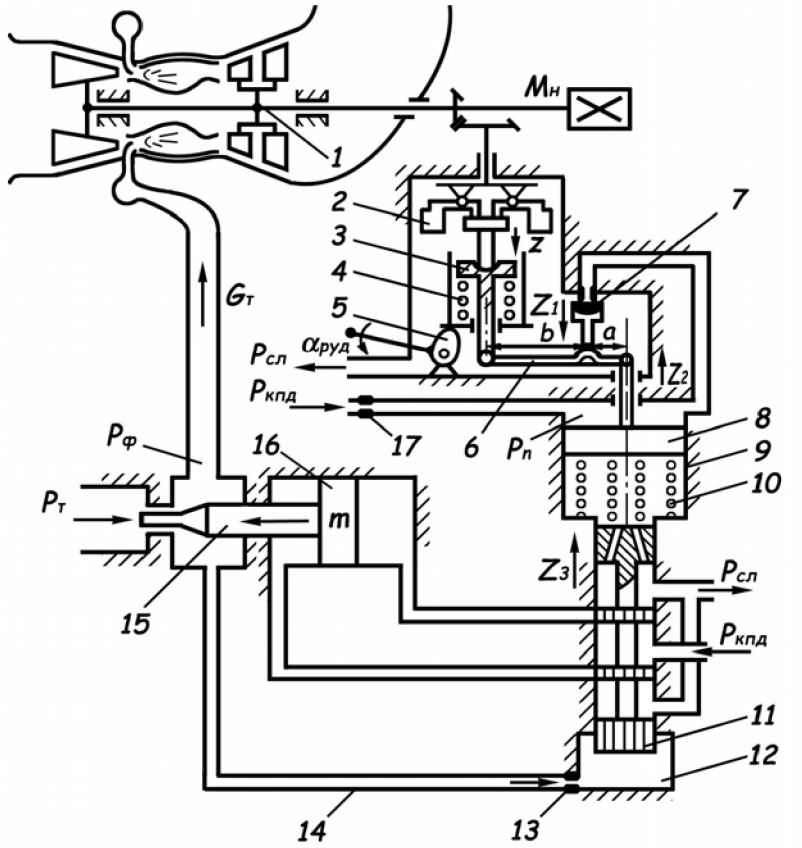


Рисунок 64. Принципиальная схема системы автоматического регулирования частоты вращения ГТД

Снижение G_T приводит к уменьшению частоты вращения n , но не до исходного уровня, а несколько выше. Это связано с тем, что в регуляторе реализована местная гидравлическая обратная связь по каналу 14. Так как на любом установившемся режиме золотник 11 должен находиться в од-

ном и том же положении, то меньшей силе давления $p_ф$, действующей на нижний торец золотника, должна соответствовать и меньшая сила противодействия пружины 10, т.е. несколько верхнее положение поршня 8. Это возможно только при некотором смещении вниз (относительно исходного режима) штока 3, т.е. при большей на величину статической ошибки частоте вращения n.

Таким образом в САР возникает погрешность $\Delta n_{ст}$, что является ее недостатком. Однако наличие местной гидравлической обратной связи улучшает качество переходного процесса в САР. Это объясняется тем, что при регулировании в момент закрытия дроссельной иглы 15 и уменьшения давления $p_ф$ (или расход топлива) уменьшается сила давления на нижний торец золотника 11, в результате еще до восстановления заданной частоты вращения начинает уменьшаться сигнал на снижение G_T . Это упреждающее действие регулятора приводит к плавному переходному процессу. В этом заключается преимущество такого статического регулятора.

Динамические свойства САР могут быть изменены без существенной переделки регулятора сменой пружин 9, 10 изменением гидравлического сопротивления жиклера 13 и характеристик сопла-заслонки 7, соотношением плеч горизонтального рычага 6, профилировкой дроссельной иглы 15, а также изменением давления $p_{КПД}$.

3.2. Вывод дифференциальных уравнений звеньев

При выводе дифференциальных уравнений звеньев за положительные направления координат принимаются такие, которые соответствуют направлению движения элементов регулятора при увеличении частоты вращения ротора двигателя. Кроме того, принимается ряд упрощающих дополнений, исходя из низкочастотной расчетной модели элементов САР.

3.2.1. Уравнения объектов регулирования

При выводе уравнений трубокомпрессора ГТД как объекта регулирования (см. рисунок 64) принимаются следующие основные допущения: влияние объемов по воздушно-газовому тракту двигателя на его динамические свойства незначительно; преобразование энергии в процессе горения происходит мгновенно, потери мощности на привод агрегатов двигателя малы по сравнению с мощностью, развиваемой турбиной; изменение параметров установившегося режима - малое. В соответствии с принятыми допущениями уравнение движения ротора двигателя имеет вид

$$\frac{\pi}{30} I \frac{dn}{dt} = M_T(n, G_T) - M_к(n) - M_H , \qquad (9)$$

где I – момент инерции ротора двигателя совместно с нагрузкой; $M_T(n, G_T)$ – момент развиваемой турбиной; $M_к(n)$, M_H – момент противодействия компрессора и нагрузки.

Уравнение (9) является нелинейным. При малых отклонениях параметров возможна линеаризация нелинейных зависимостей разложением их в ряд Тейлора и удержанием первых членов ряда:

$$M_T(n, G_T) = (M_T)_0 + \left(\frac{\partial M_т}{\partial n}\right)_0 \Delta n + \left(\frac{\partial M_T}{\partial G_T}\right)_0 \Delta G_T;$$
$$M_к(n, G_T) = (M_к)_0 + \left(\frac{\partial M_к}{\partial n}\right)_0 \Delta n; \; M_H = (M_H)_0 + \Delta M_H, \tag{10}$$

где $\Delta n = n - n_0$, $\Delta G_T = G_T - (G_T)_0$ – отклонения частоты вращения и расхода топлива относительно установившихся их значений; ΔM_H – приращение момента нагрузки. Частные производные, входящие в уравнения, определяются по углам наклона касательных к соответствующим моментам характеристикам в точках: $n_0, (M_T)_0, (M_к)_0, (M_H)_0, (G_T)_0$. Индекс “0” параметров указывает на их принадлежность к базисным (установившимся) значениям.

Имея в виду , что на установившемся режиме справедливо равенство $(M_T)_0 - (M_к)_0 - (M_H)_0 = 0$, можно записать уравнение (9) с учетом равенств (10) в виде

$$\frac{\pi}{30} I \frac{d\Delta n}{dt} + \left[\left(\frac{\partial M_к}{\partial n}\right)_0 - \left(\frac{\partial M_T}{\partial n}\right)_0\right]\Delta n = \left(\frac{\partial M_T}{\partial G_T}\right)_0 \Delta G_T - \Delta M_H \tag{11}$$

Для общности анализа вводятся безразмерные параметры:

$$\delta n = \frac{\Delta n}{n_0}; \; \delta G_T = \frac{\Delta G_T}{(G_T)_0}; \; \delta M_H = \frac{\Delta M_H}{(M_H)_0}.$$

С учетом введенных безразмерных параметров уравнение (11) перепишется так:

$$\frac{\pi}{30} I \frac{d\delta n}{dt} + \left[\left(\frac{\partial M_к}{\partial n}\right)_0 - \left(\frac{\partial M_T}{\partial n}\right)_0\right]\delta n = \frac{G_T}{n_0}\left(\frac{\partial M_T}{\partial G_T}\right)_0 \delta G_T - \frac{(M_H)_0}{n_0}\delta M_H$$

или в стандартной форме:

$$T_1 \frac{d\delta n}{dt} + \delta n = k_1 \delta G_T - k_2 \delta M_H \; , \tag{12}$$

где $T_1 = \dfrac{\dfrac{\pi}{30} \cdot I}{\left(\dfrac{\partial M_к}{\partial n}\right)_0 - \left(\dfrac{\partial M_T}{\partial n}\right)_0}$ постоянная времени двигателя;

$k_1 = \dfrac{\dfrac{(G_T)_0}{n_0}\left(\dfrac{\partial M_T}{\partial G_T}\right)}{\left(\dfrac{\partial M_к}{\partial n}\right)_0 - \left(\dfrac{\partial M_T}{\partial n}\right)_0}$ коэффициент усиления двигателя по расходу топлива; $k_2 = \dfrac{(M_н)_0}{n_0\left[\left(\dfrac{\partial M_к}{\partial n}\right)_0 - \left(\dfrac{\partial M_T}{\partial n}\right)_0\right]}$ коэффициент двигателя по возмущающему воздействию.

Выражение (12) является уравнением ГТД как объекта регулирования.

3.2.2. Уравнение центробежного чувствительного элемента

При выводе уравнения чувствительного элемента предполагается, что инерционные силы центробежных грузиков малы, трение в подвижных элементах отсутствует, отклонение центра тяжести грузиков от оси вращения при изменении частоты вращения пренебрежимо мало. С учетом принятых допущений уравнение баланса сил, действующих на шток 3 чувствительного элемента (см. рисунок 65), запишется в виде

$$F_ц - F_{пр4} = 0,$$

где $F_ц = 2\alpha m_{пр} r\omega^2$ – осевая составляющая центробежных сил грузиков; $F_{пр4} = \gamma_{пр4}\left(z + \beta\alpha_{РУД}\right)$ – сила противодействия пружины; $m_{пр}$ – приведенная к центру тяжести масса грузиков; r – расстояние центра тяжести грузиков от оси вращения; $\omega = \dfrac{\pi n}{30}$ – угловая частота вращения; α – коэффициент приведения центробежной силы грузиков к ее осевой составляющей; $\gamma_{пр4}$ – жесткость пружины 4; z – координата штока 3; β – коэффициент, связывающий угол поворота $\alpha_{РУД}$ с перемещением основания пружины 4.

Рассматривая малые отклонения параметров относительно установившихся их значений, можно записать

$$\left(F_ц\right)_0 + \Delta F_ц - \left(F_{пр4}\right)_0 - \Delta F_{пр4} = 0 \qquad (13)$$

или

$$\Delta F_ц - \Delta F_{пр4} = 0\,,\ \left(F_ц\right)_0 - \left(F_{пр4}\right)_0 = 0\,,$$

где $\left(F_ц\right)_0 = \dfrac{\pi^2 \alpha m_{от} r}{450} \cdot n_0^2$; $\left(F_{пр4}\right)_0 = \gamma_{пр4}[z_0 + \beta(\alpha_{РУД})_0]$;

$\Delta F_ц = \left(\dfrac{dF_ц}{dn}\right)_0$;

$\Delta n = 2\dfrac{\pi^2 \alpha m_{от} r}{450} \cdot n_0 \Delta n$ – приращение осевой составляющей центробежных сил; $\Delta F_{пр4} = \gamma_{пр4}\left(\Delta z + \beta \cdot \Delta\alpha_{РУД}\right)$ – приращение силы поджатия пружины 4. После подстановки выражений для $\Delta F_ц$ и $\Delta F_{пр4}$ уравнение (13) имеет вид

$$2\frac{\pi^2 \alpha m_{от} r}{450} \cdot n_0 \Delta n - \gamma_{пр4} \Delta z - \gamma_{пр4} \beta \cdot \Delta\alpha_{РУД} = 0.$$

Переходя в последнем уравнении к безразмерным параметрам с учетом $\left(F_ц\right)_0 = \left(F_{пр4}\right)_0$, можно получить уравнение чувствительного элемента

$$\delta z = k_3 \delta n - k_4 \alpha_{РУД}\,, \qquad (14)$$

где

$\delta z = \dfrac{\Delta z}{z_0}$; $\delta\alpha_{РУД} = \dfrac{\Delta\alpha_{РУД}}{\left(\alpha_{РУД}\right)_0}$; $k_3 = 2\left[1 + \dfrac{\beta\left(\alpha_{РУД}\right)_0}{z_0}\right]$ – коэффициент усиления по регулируемому параметру; $k_4 = 1 + \dfrac{\beta\left(\alpha_{РУД}\right)_0}{z_0}$ – коэффициент усиления по управляющему воздействию.

3.2.3. Уравнение горизонтального рычага

При выводе уравнения рычага 6 предполагается, что инерционные силы пренебрежимо малы. Выходной координатой рычага является перемещение заслонки z_1, а выходными координатами – перемещение концов рычага z и z_2. Суммарное отклонение координаты определяется равенством

$$\Delta z = \Delta z_1' - \Delta z_1'', \tag{15}$$

где $\Delta z_1'' = \dfrac{b}{a+b}\Delta z_2$ – перемещение заслонки при отклонении поршня 8;

$\Delta z_1' = \dfrac{a}{a+b}\Delta z_1$ – перемещение заслонки при отклонении штока 3; a, b – правое и левое плечи рычага 6.

Вводя базисные значения $(z_1)_0$, $(z_2)_0$ и учитывая выражение для $\Delta z_1'$ и $\Delta z_1''$, можно переписать уравнение (15) в безразмерных параметрах:

$$\delta z = k_5 \delta z_1 - k_6 \delta z_2, \tag{16}$$

где $\delta z_1 = \dfrac{\Delta z_1}{(z_1)_0}$; $\delta z_2 = \dfrac{\Delta z_2}{(z_2)_0}$. $k_5 = \dfrac{a(z_1)_0}{(a+b)(z_1)_0}$; $k_6 = \dfrac{b(z_2)_0}{(a+b)(z_1)_0}$; – коэффициенты усиления горизонтального рычага .

3.2.4. Уравнение первого каскада гидроусилителя

При выводе уравнения предполагается, что инерционные силы, силы трения и гидродинамические силы малы по сравнению с силой давления. С учетом принятых допущений составляется уравнение баланса расхода жидкости в полости над поршнем

$$Q_{ж17} + Q_n - Q_c = 0 \tag{17}$$

и уравнение баланса сил, действующих на поршень 8,

$$F_{пр9} - F_p = 0, \tag{18}$$

где $Q_{ж17} = \mu_{ж17} S_{ж17} \sqrt{\dfrac{2}{\rho}(p_{жидк} - p_n)}$ – объемный расход жидкости через жиклер 17, $Q_n = S_n \dfrac{dz_2}{dt}$ – расход жидкости, обусловленный движением поршня; $Q_c = \mu_c \pi d_c z_c \sqrt{\dfrac{2}{\rho}(p_n - p_{сл})}$ - расход жидкости через сопло-заслонку; $F_{пр9} = (F_{пр9})_0 - \gamma_{пр9}\Delta z_2$ – сила противодействия пружины 9; $F_p = S_n(p_n - p_{сл})$ – сила давления топлива, действующая на поршень 8 сверху; $\mu_{ж17}$ – коэффициент расхода; $S_{ж17}$ – площадь проходно-

го сечения жиклера 17; ρ - плотность жидкости; p_n – давление в полости над поршнем 8; S_n – площадь поршня 8; μ_c – коэффициент расхода сопла; d_c - диаметр сопла; $\left(F_{пр9}\right)_0$ – усилие первоначальной затяжки пружины. Уравнение (17) в отклонениях параметров перепишется в виде

$$\Delta Q_{ж17} + \Delta Q_n - \Delta Q_c = 0 .$$

Принимая для всех отклонений расходов одно базовое значение $\left(Q_{ж17}\right)_0$, можно преобразовать последнее равенство к следующей безразмерной форме:

$$\delta Q_{ж17} + \delta Q_n - \delta Q_c = 0 , \qquad (19)$$

где $\delta Q_{ж17} = \dfrac{\Delta Q_{ж17}}{\left(Q_{ж17}\right)_0}$; $\delta Q_n = \dfrac{\Delta Q_n}{\left(Q_{ж17}\right)_0}$; $\delta Q_c = \dfrac{\Delta Q_c}{\left(Q_{ж17}\right)_0}$.

Для связи приращений расходов с приращениями давления в полости над поршнем и приращением хода заслонки проводится линеаризация расходных характеристик для $Q_{ж17}$ и ΔQ_c. Для этого вначале логарифмируется выражение для $Q_{ж17}$:

$$\ln Q_{ж17} = \ln \mu_{ж17} S_{ж17} + \frac{1}{2}\left[\ln\frac{2}{\rho} + \ln\left(p_{жидк} - p_n\right)\right].$$

С учетом того, что $\mu_{ж17} S_{ж17} = \text{const}$; $\rho = \text{const}$; $p_{КПД} = \text{const}$, проводится дифференцированиие последнего выражения:

$$\frac{dQ_{ж17}}{Q_{ж17}} = -\frac{1}{2}\cdot\frac{dp_n}{p_{жидк} - p_n} .$$

Переходя от производных к малым приращениям $d \to \Delta$, можно получить $\dfrac{\Delta Q_{ж17}}{\left(Q_{ж17}\right)_0} = -\dfrac{1}{2}\cdot\dfrac{\Delta p_n}{p_{жидк} - \left(p_n\right)_0}\cdot\delta p_n$,

или в безразмерных параметрах

$$\delta Q_{ж17} = -\frac{1}{2}\frac{\left(p_n\right)_0}{p_{жидк} - \left(p_n\right)_0}\delta p_n, \text{ где } \delta p_n = \frac{\Delta p_n}{\left(p_n\right)_0} . \qquad (20)$$

Проводя такие же преобразования для Q_c с учетом того, что $\mu_c d_c = \text{const}$; $p_{сл} = \text{const}$; $(Q_{ж17})_0 = (Q_c)_0$, можно получить

$$\delta Q_n = \delta z_1 + \frac{1}{2}\frac{(p_n)_0}{(p_ц)_0 - p_n}\delta p_n, \text{ где } \delta z_1 = \frac{\Delta z_1}{(z_1)_0}. \quad (21)$$

Имея в виду, что $\Delta Q_n = S_n \frac{d\Delta z_2}{dt}$, можно выразить приращение расхода, обусловленного движением поршня, в безразмерных параметрах:

$$\delta Q_c = \frac{S_n (z_2)_0}{(Q_{ж17})_0}\cdot\frac{d\delta z_2}{dt}, \text{ где } \delta z_2 = \frac{\Delta z_2}{(z_2)_0}. \quad (22)$$

Выражения (20)…(22) для приращений $\delta Q_{ж17}$, δQ_n, и δQ_c подставляются в равенство (19), которое затем преобразовывается к виду

$$\frac{S_n (z_2)_0}{(Q_{ж17})_0}\cdot\frac{d\delta z_2}{dt} - \frac{1}{2}\left[\frac{(p_n)_0}{p_{жидк} - (p_n)_0} + \frac{(p_n)_0}{(p_n)_0 - p_o}\right]\cdot\delta p_n = \delta z_1. \quad (23)$$

Уравнение баланса сил (18) записывается в отклонениях параметров:

$$-\gamma_{пр9}\Delta z_2 - S_n \Delta p_n = 0.$$

или в безразмерной форме

$$\delta p_n = -\frac{\gamma_{пр9}(z_2)_0}{S_n (p_n)_0}\cdot\delta z_2. \quad (24)$$

Из совместного решения уравнений (23) и (24) можно получить уравнение первого каскада гидроусилителя:

$$T_2\frac{d\delta z_2}{dt} + \delta z_2 = k_7 \delta z_1, \quad (25)$$

где $T_2 = \frac{2S_n^2[p_{жидк} - (p_n)_0][(p_n)_0 - p_{сл}]}{(Q_{ж17})_0 (p_{жидк} - p_{сл})\gamma_{пр9}}$ – постоянная времени; k_7 – коэффициент усиления первого каскада усилителя.

3.2.5. Уравнение золотникового распределителя второго каскада гидроусилителя

При выводе уравнения предполагается: инерционные силы, силы трения и гидродинамические силы, действующие на кромки золотника, пренебрежимо малы по сравнению с силами давления пружины; движение

жидкости через жиклер 13 - ламинарное. С учетом принятых допущений уравнение баланса сил, действующих на золотник имеет вид [9]

$$F_з - F_{пр} = 0, \tag{26}$$

где $F_з = S_з\left(p_з - p_{сл}\right)$ – сила, обусловленная разностью давлений по торцам золотника; $F_{пр10} = \left(F_{пр10}\right)_0 - \gamma_{пр10}\left(\Delta z_3 - \Delta z_2\right)$ – сила противодействия пружины 10; $S_з$ – площадь торца золотника; $\gamma_{пр10}$ – жесткость пружины 10; $p_з$ - давление в полости 12. Подставляя выражения для сил $F_з$ и $F_{пр10}$ в равенство (26) и выделяя составляющие по отклонениям, можно получить $S_з\Delta p_з - \gamma_{пр10}\Delta z_3 + \gamma_{пр10}\Delta z_2 = 0$. Или в безразмерных параметрах:

$$\delta z_3 = \frac{z_{20}}{z_{30}}\delta z_2 + \frac{S_з\left(p_з\right)_0}{\gamma_{пр10}\left(z_3\right)_0} - \delta p_3, \tag{27}$$

где $\delta z_з = \dfrac{\Delta z_з}{\left(z_з\right)_0}$; $\delta p_з = \dfrac{\Delta p_з}{\left(p_з\right)_0}$.

Уравнение баланса расхода жидкости в полости 12, связанной с нижним торцем золотника 11, записывается так:

$$Q_{ж13} - Q_з = 0, \tag{28}$$

где $Q_{ж13} = \dfrac{1}{R_{ж13}}\left(p_ф - p_2\right)$ – расход жидкости через жиклер 13; $Q_з = S_з\dfrac{dz_з}{dt}$ – расход жидкости, обусловленный движением золотника; $R_{ж13}$ – гидравлическое сопротивление жиклера 13: $p_ф$ – давление на входе в форсунки (на выходе из дроссельной иглы). Подставляя выражения для $Q_{ж13}$, $Q_з$ в уравнение (28) и переходя к малым приращениям, можно определить

$$\frac{1}{R_{ж13}}\Delta p_ф - \frac{1}{R_{ж13}}\Delta p_з - S_з\frac{d\Delta z_з}{dt} = 0$$

или в безразмерных параметрах

$$\delta p_з = \delta p_ф - \frac{S_з\left(z_з\right)_0 R_{ж13}}{\left(p_ф\right)_0}\cdot\frac{d\delta z_з}{dt}, \text{ где } \delta p_ф = \frac{\Delta p_ф}{\left(p_ф\right)_0}. \tag{29}$$

Из совместного решения уравнений (27) и (29) определится уравнение золотникового распределителя:

$$T_з \frac{d\delta z_з}{dt} + \delta z_з = k_8 \delta z_2 + k_9 \delta p_ф, \qquad (30)$$

где $T_з = \frac{S_з^2 R_{ж13}}{\gamma_{пр10}}$ – постоянная времени, $k_8 = \frac{(z_2)_0}{(z_3)_0}$, $k_9 = \frac{S_з (p_ф)_0}{\gamma_{пр10} (z_3)_0}$ – коэффициенты усиления.

3.2.6. Уравнение сервопоршня второго каскада гидроусилителя

При выводе уравнения предполагается, что инерционные силы, силы трения и гидродинамические силы на дроссельной игле малы по сравнению с силами давления. При принятых допущениях для описания динамики сервопоршня достаточно использовать уравнение баланса расхода жидкости [10,11]

$$Q_1 - Q_2 = 0, \qquad (31)$$

где $Q_1 = \mu_з \pi d_з \Delta z_з \sqrt{\frac{2}{\rho}(p_{жидк} - p'_n)}$ – расход жидкости через окно золотника в правую поршневую полость, $Q_2 = \mu_з \pi d_з \Delta z_з \sqrt{\frac{2}{\rho}(p''_n - p_{сл})}$ – расход жидкости из левой поршневой полости на слив, $\mu_з$ – коэффициент расхода, $d_з$ – диаметр золотника, p'_n, p''_n – давления в правой и левой полостях.

Так как на поршень, кроме сил давления, не действуют другие силы, то справедливо равенство

$$p''_n = \frac{S'_n}{S''_n} \cdot p'_n \qquad (32)$$

где S'_n, S''_n – площадь торцев поршня с правой и левой сторон. Тогда из совместного решения уравнений (31) и (32) с учетом выражений для Q_1 и Q_2 можно получить $p'_n = \frac{S''_n}{S'_n + S''_n}(p_{жидк} + p_{сл})$.

После подстановки полученного выражения для p'_n в формулу для Q_1 с учетом того, что $Q_1 = S'_n \dfrac{dm}{dt}$, можно определить

$$S'_n \frac{dm}{dt} = \mu_з \pi d_з \Delta z_з \sqrt{\frac{2S'_n}{\rho\left(S'_n + S''_n\right)} \cdot \left(p_{жидк} + \frac{S''_n}{S'_n} \cdot p_{сл} \right)}.$$

Переходя в последнем выражении к малым приращениям параметров, определяют уравнение сервопоршня 16:

$$\frac{S'_n}{\mu_з \pi d_з \sqrt{\dfrac{2S'_n}{\rho\left(S'_n + S''_n\right)} \left(p_{жидк} + \dfrac{S''_n}{S'_n} \cdot p_{сл} \right)}} \cdot \frac{dm}{dt} = \Delta z_з,$$

или в безразмерных параметрах:

$$T_4 \frac{d\delta m}{dt} = \delta z_3 \qquad (33)$$

где $\delta m = \dfrac{\Delta m}{m_0}$; $T_4 = \dfrac{m_0 S'_n}{\left(z_з\right)_0 \mu_з \pi d_з \sqrt{\dfrac{2S'_n}{\rho\left(S'_n + S''_n\right)} \cdot \left(p_{жидк} + \dfrac{S''_n}{S'_n} \cdot p_{сл} \right)}}$ –

постоянная времени сервопоршня.

3.2.7. Уравнение дроссельной иглы

Уравнение дроссельной иглы, связывающее массовый расход топлива с перемещением дроссельной иглы, определяется зависимостью

$$G_T = \mu_Д S_Д \sqrt{2\rho(p_T - p_ф)},$$

где $\mu_Д$ – коэффициент расхода; $S_Д = S_Д(m)$ – площадь проходного сечения; p_T – давление на входе в дроссельную иглу. Нелинейная расходная характеристика дроссельной иглы линеаризуется разложением в ряд Тейлора:

$$\delta G_T = \delta S_Д - \frac{1}{2}\cdot\frac{(p_ф)_0}{(p_T - (p_ф)_0)}\delta p_ф, \text{ где } \delta S_Д = \frac{\delta S_Д}{(S_Д)_0}. \qquad (34)$$

Относительное приращение площади проходного сечения дроссельной иглы $\delta S_Д$ связано с относительным его перемещением зависимостью

$$\delta S_Д = \left(\frac{dS_Д}{dm}\right)_0 \frac{m}{(S_Д)_0}\delta m. \qquad (35)$$

Из совместного решения уравнений (34) и (35) можно определить линеаризованное уравнение дроссельной иглы:

$$\delta G_T = k_{10}\delta m - k_{11}\delta p_ф, \qquad (36)$$

где $k_{10} = \left(\frac{dS_Д}{dm}\right)_0 \frac{m}{(S_Д)_0}$; $k_{11} = \frac{1}{2}\cdot\frac{(p_{тм})_0}{(p_T - (p_{тм})_0)}$ – коэффициент передачи дроссельной иглы.

3.2.8. Уравнение топливных форсунок

При выводе уравнения принимается допущение о том, что давление в камере сгорания постоянно. Расход топлива через форсунки определяется выражением $\delta G_T = \mu_ф S_ф \sqrt{2\rho(p_ф - p_к)}$, где $\mu_ф$ - коэффициент расхода; $S_ф$ - суммарная площадь проходного сечения форсунок; $p_к$ – давление в камере сгорания. С учетом того, что $p_к = \text{const}$; $S_ф = \text{const}$; $\mu_ф = \text{const}$, производится линеаризация расходной характеристики форсунок:

$$\delta G_T = k_{12}\delta p_ф, \qquad (37)$$

где $k_{12} = \frac{(p_ф)}{2[(p_ф)_0 - p_к]}$ - коэффициент передачи форсунок.

Уравнения звеньев САР (12), (14), (16), (25), (30), (33), (36) и (37) сводятся в систему уравнений:

$$
\begin{cases}
T_1 \dfrac{d\delta n}{dt} + \delta n = k_1 \delta G_T - k_2 \delta M_н \\
\delta z = k_3 \delta n - k_4 \alpha_{РУД} \\
\delta z_1 = k_5 \delta z - k_6 \delta z_2 \\
T_2 \dfrac{d\delta z_2}{dt} + \delta z_2 = k_7 \delta z_1 \\
T_з \dfrac{d\delta z_з}{dt} + \delta z_з = k_8 \delta z_2 + k_9 \delta p_ф \\
T_4 \dfrac{d\delta m}{dt} = \delta z_3 \\
\delta G_T = k_{10} \delta m - k_{11} \delta p_ф; \quad \delta G_T = k_{12} \delta p_ф.
\end{cases} \tag{38}
$$

Система уравнений (38) содержит 10 переменных (δn, δG_T, δm, $\delta M_н$, δz, $\alpha_{РУД}$, δz_1, δz_2, δz_3, $\delta p_ф$), т.е. за исключением управляющего $\alpha_{РУД}$ и возмущающего $\delta M_н$ воздействий число переменных равно числу уравнений. Система дифференциальных уравнений записывается в операторной форме:

$$
\begin{cases}
(T_1 s + 1)\delta \tilde{n} = k_1 \delta \tilde{G}_T - k_2 \delta \tilde{M}_н \\
\delta \tilde{z}_1 = k_5 \delta \tilde{z} - k_6 \delta \tilde{z}_2 \\
(T_2 s + 1)\delta \tilde{z}_2 = k_7 \delta \tilde{z}_1 \\
(T_3 s + 1)\delta \tilde{z}_3 = k_1 \delta \tilde{z}_2 + k_2 \delta \tilde{p}_ф \\
T_4 s\, \delta \tilde{m} = \delta \tilde{z}_3 \\
\delta \tilde{G}_T = -k_{10} \delta \tilde{m} - k_{11} \delta \tilde{p}_ф \\
\delta \tilde{G}_T = k_{12} \delta \tilde{p}_ф.
\end{cases} \tag{39}
$$

Для упрощения построения структурной схемы и определения передаточных функций САР из системы операторных уравнений (39) исключается параметр $\delta p_ф$ как входящий в простые зависимости. С учетом этого система уравнений (39) приводится к форме, удобной для построения структурной схемы САР:

$$
\begin{cases}
\delta\tilde{n} = \dfrac{k_1}{T_1 s + 1}\left(\delta\tilde{G}_T - \dfrac{k_2}{k_1}\,\delta\tilde{M}_н\right) \\
\delta\tilde{z} = k_3\delta\tilde{n} - k_4\delta\tilde{\alpha}_{РУД}; \quad \delta\tilde{z}_1 = k_5\delta\tilde{z} - k_6\delta\tilde{z}_2 \\
\delta\tilde{z}_2 = \dfrac{k_7}{T_2 s + 1}\delta\tilde{z}_1; \quad \delta\tilde{z}_3 = \dfrac{k_8}{T_3 s + 1}\left(\delta\tilde{z}_2 + \dfrac{k_9}{k_8 k_{12}}\cdot\delta\tilde{G}_T\right) \\
\delta\tilde{m} = \dfrac{1}{T_4 s}\delta\tilde{z}_3; \quad \delta\tilde{G}_T = -\dfrac{k_{10}}{1 + \dfrac{k_{11}}{k_{12}}}\cdot
\end{cases}
\tag{40}
$$

3.3. Построение структурной схемы и определение передаточных функций САР

Структурная схема САР (рисунок 65) , соответствующая системе преобразованных операторных уравнений (40), включает два контура с местной обратной связью (I и II) и контур с основной обратной связью по частоте вращения $\delta\tilde{n}$. По структурной схеме легко прослеживается взаимодействие звеньев в системе регулирования двигателя.

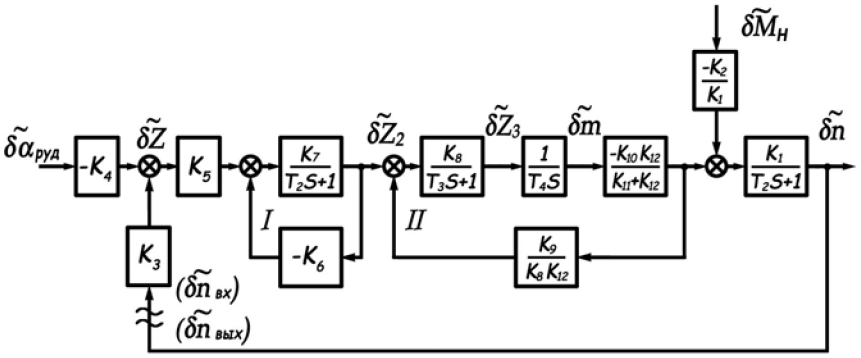


Рисунок 65. Структурная схема САР частоты вращения ГТД

Для определения передаточной функции САР в разомкнутом состоянии в структурной схеме условно размыкается основная обратная связь и вводятся входной $\delta\tilde{n}_{вх}$ и выходной $\delta\tilde{n}_{вых}$ параметры разомкнутой системы. Тогда передаточная функция разомкнутой САР определяется как от-

ношение $W_{\text{раз}}(s) = -\dfrac{\delta\tilde{n}_{вых}}{\delta\tilde{n}_{вх}}$. При этом предполагается: $\delta\tilde{\alpha}_{РУД} = 0$, $\delta\tilde{M}_{н} = 0$.

Выражение для $W_{\text{раз}}(s)$ определяется как произведение

$$W_{раз}(s) = -\frac{k_1 k_3 k_5}{T_1 s + 1} W_1(s) W_2(s), \qquad (41)$$

где $W_1(s) = -\dfrac{k_7}{T_2 s + 1 + k_6 k_7}$ и

$W_2(s) = -\dfrac{k_8 k_{10} k_{12}}{(k_{11} + k_{12})\left[(T_3 s + 1) T_4 s + \dfrac{k_9 k_{10}}{k_{11} + k_{12}}\right]}$ – передаточные функции I и II контуров САР с местными обратными связями (см. рисунок 65).

В результате подстановки формул для $W_1(s)$, $W_2(s)$ в выражение (41) и преобразования можно получить

$$W_{\text{раз}}(s) = \frac{d_0}{c_0 s^4 + c_1 s^3 + c_2 s^2 + c_4}, \qquad (42)$$

где

$$d_0 = \frac{k_1 k_3 k_5 k_7 k_8 k_{10} k_{12}}{k_{11} + k_{12}},$$

$$c_0 = T_1 T_2 T_3 T_4,$$

$$c_1 = T_1 T_2 T_4 + \left[T_2 + T_1(1 + k_6 k_7)\right] T_3 T_4,$$

$$c_2 = \frac{k_9 k_{10}}{k_{11} + k_{12}} T_2 + T_1(1 + k_6 k_7) T_3 T_4 + \left[T_2 + T_1(1 + k_6 k_7)\right] T_4,$$

$$c_3 = \frac{k_9 k_{10}}{k_{11} + k_{12}} \cdot \left[T_2 + T_1(1 + k_6 k_7)\right] + (1 + k_6 k_7) T_4,$$

$$c_4 = \frac{k_9 k_{10}(1 + k_6 k_7)}{k_{11} + k_{12}}.$$

Передаточная функция замкнутой САР по управляющему воздействию $\delta\tilde{\alpha}_{РУД}$ (при $\delta\tilde{M}_{н} = 0$) определяется по формуле

$$W_{замк}(s)=\frac{\delta\tilde{n}}{\delta\tilde{\alpha}_{РУД}}=\frac{k_1k_4k_5W_1(s)W_2(s)}{(T_1s+1)\left[1+\dfrac{k_1k_3k_5W_1(s)W_2(s)}{T_1s+1}\right]}.$$

После подстановки выражений для $W_1(s)$, $W_2(s)$ и преобразований можно определить

$$W_{замк}(s)=\frac{b_0}{a_0s^4+a_1s^3+a_2s^2+a_3s+a_4}, \qquad (43)$$

где $b_0=\dfrac{k_1k_4k_5k_7k_8k_{10}k_{12}}{k_{11}+k_{12}}$, $a_0=c_0$, $a_1=c_1$, $a_2=c_2$, $a_3=c_3$,

$$a_4=\frac{1}{k_{11}+k_{12}}\cdot\left[k_1k_3k_5k_7k_8k_{10}k_{12}+k_9k_{10}(1+k_6k_7)\right].$$

Передаточная функция замкнутой САР по возмущающему воздействию $\delta\tilde{M}_н$ (при $\delta\tilde{\alpha}_{РУД}=0$) определяется по формуле

$$F(s)=\frac{\delta\tilde{n}}{\delta\tilde{M}_н}=\frac{-k_2}{(T_1s+1)\cdot\left[1+\dfrac{k_1k_3k_5W_1(s)W_2(s)}{T_1s+1}\right]}.$$

В результате подстановки выражений для $W_1(s)$, $W_2(s)$ и преобразований можно получить

$$F(s)=-\frac{f_0s^3+f_1s^2+f_2s+f_3}{a_0s^4+a_1s^3+a_2s^2+a_3s+a_4}, \qquad (44)$$

где $f_0=k_0T_2T_3T_4$, $f_1=k_2\left[(1+k_6k_7)T_3T_4+T_2T_4\right]$,

$f_2=k_2\left[(1+k_6k_7)\cdot T_4+\dfrac{k_9k_{10}}{k_{11}+k_{12}}\cdot T_2\right]$, $f_3=\dfrac{k_2k_9k_{10}(1+k_6k_7)}{k_{11}+k_{12}}$.

$a_0\ldots a_4$ совпадают с соответствующими значениями коэффициентов знаменателя передаточной функции $W_{зам}(s)$.

Собственные операторы разомкнутой и замкнутой САР имеют вид

$$D_{раз}(s)=c_0s^4+c_1s^3+c_2s^2+c_3s+c_4, \qquad (45)$$

$$D_{зам}(s)=a_0s^4+a_1s^3+a_2s^2+a_3s+a_4. \qquad (46)$$

3.4. Анализ устойчивости САР

Вначале строится *D*-разбиение в плоскости заданного параметра. Пусть таким параметром является коэффициент усиления k_8, который входит в выражение для a_4 собственного оператора (46). Величины остальных коэффициентов считаются заданными. Решается уравнение $D_{зам}(s)=0$ или

$$a_0 s^4 + a_1 s^3 + a_2 s^2 + a_3 s + \frac{1}{k_{11}+k_{12}} \times$$
$$\times \left[k_1 k_3 k_5 k_7 k_8 k_{10} k_{12} + k_9 k_{10}\left(1+k_6 k_7\right)\right] = 0$$

относительно коэффициента k_8:

$$k_8 = -\frac{k_{11}+k_{12}}{k_1 k_3 k_5 k_7 k_{10} k_{12}} \cdot \left[a_0 s^4 + a_1 s^3 + a_2 s^2 + a_3 s + \frac{k_9 k_{10}\left(1+k_6 k_7\right)}{k_{11}+k_{12}}\right].$$

Выражение для k_8 приводится к стандартной (для введения в микро-ЭВМ) форме:

$$k_8 = \frac{\beta_0 s^4 + \beta_1 s^3 + \beta_2 s^2 + \beta_3 s + \beta_4}{\alpha_0}, \qquad (47)$$

где $\beta_0 = a_0$, $\beta_1 = a_1$, $\beta_2 = a_2$, $\beta_3 = a_3$, $\beta_4 = \frac{k_9 k_{10}\left(1+k_6 k_7\right)}{k_{11}+k_{12}}$,

$\alpha_0 = \frac{k_1 k_3 k_5 k_7 k_{10} k_{12}}{k_{11}+k_{12}}$.

В выражение для коэффициентов уравнения (47) подставляются численные значения параметров САР:

$k_1 = 1$, $k_5 = 0{,}5$, $k_{10} = 1$, $T_2 = 0{,}1$ *сек*,
$k_2 = 1$, $k_6 = 0{,}7$, $k_{11} = 1$, $T_3 = 0{,}2$ *сек*,
$k_3 = 2$, $k_7 = 1$, $k_{12} = 1$, $T_4 = 0{,}1$ *сек*.
$k_4 = 1$, $k_9 = 0{,}6$, $T_1 = 1$ *сек*,

После подстановки численных значений получают: $\beta_0 = 0{,}002$; $\beta_1 = 0{,}046$; $\beta_2 = 0{,}244$; $\beta_3 = 0{,}71$; $\beta_4 = 0{,}48$; $\alpha_0 = -0{,}5$.

Далее определяют действительную и мнимую составляющие частотной функции k_8 для ряда значений частот. Наибольшую частоту колебаний принимают $\omega_{нб} \approx \dfrac{10}{T_{\min}} \approx 10^{-1}$. Шаг по частоте принимают равным $0{,}5\ с^{-1}$. В результате расчета и построения (рисунок 66) получают кривую *D*-разбиения для положительных значений частот. Зеркальным отображением кривой относительно действительной оси дополняют *D*-разбиения для отрицательных частот колебаний. Кривая *D*-разбиения заштриховывается с левой стороны по мере возрастания частоты колебаний ω. Воспользовавшись правилом подсчета корней характеристического уравнения для каждой из выделенных областей *D*-разбиения, определяют область (I), соответствующую наибольшему числу корней с отрицательной вещественной частью, т.е. более вероятную область устойчивости САР.

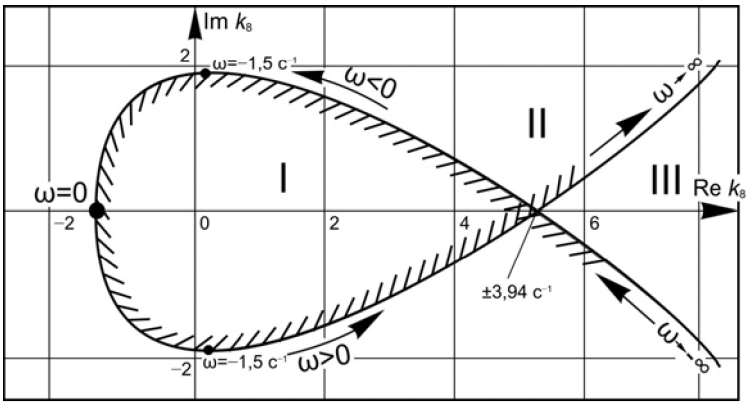


Рисунок 66. Кривая D-разбиения относительно параметра k8

Для проверки устойчивости САР в области (I) задаются величиной $\mathrm{Re}(k_8)$, взятой из этой области, например Re k_8 = 1, и записывают характеристический полином или собственный оператор замкнутой САР в форме (46) с числовым значением коэффициентов:

$$D_{зам}(s) = 0{,}002s^4 + 0{,}046s^3 + 0{,}244s^2 + 0{,}71s + 1{,}01 .$$

Для проверки устойчивости САР по критерию Рауса-Гурвица составляется квадратная матрица Гурвица из коэффициентов $a_0 \ldots a_n$.

$$\Delta = \begin{vmatrix} 0{,}046 & 0{,}71 & 0 & 0 \\ 0{,}002 & 0{,}244 & 1{,}01 & 0 \\ 0 & 0{,}046 & 0{,}71 & 0 \\ 0 & 0{,}002 & 0{,}244 & 1{,}01 \end{vmatrix}.$$

При $a_0 = 0{,}002 > 0$ анализируются знаки диагональных миноров:

$$\Delta_1 = 0{,}46 > 0,$$

$$\Delta_2 = 0{,}046 \cdot 0{,}244 - 0{,}002 \cdot 0{,}71 = 0{,}11 > 0,$$

$$\Delta_3 = 0{,}046 \cdot \left(0{,}244 \cdot 0{,}71 - 0{,}046 \cdot 1{,}01\right) \cdot 0{,}002 \times$$

$$\times \left(0{,}71 \cdot 0{,}71 - 0 \cdot 0{,}046\right) = 0{,}0048 > 0,$$

$$\Delta_4 = \Delta_3 \cdot 1{,}01 = 0{,}004848 > 0.$$

Все диагональные миноры положительные, следовательно САР устойчива и область (I) *D*-разбиения является областью устойчивости САР. Максимальное допустимое значение коэффициента k_8 равно 5,58.

Проверка устойчивости САР по одному из критериев является достаточной, однако для овладения навыками оценки устойчивости САР по другим критериям анализируется устойчивость системы по частотным критериям Михайлова и Найквиста.

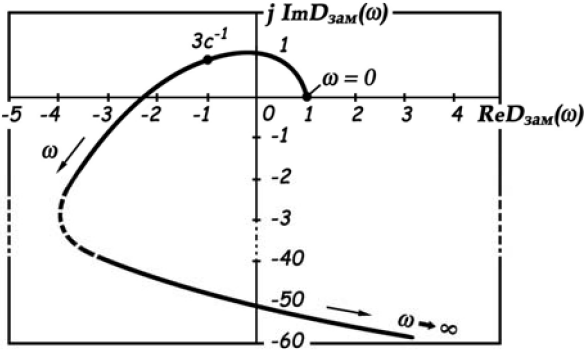


Рисунок 67. Годограф Михайлова замкнутой САР частоты вращения ГТД с характеристическим уравнением четвертого порядка

Оценка устойчивости замкнутой САР по критерию Михайлова производится построением годографа Михайлова по собственному оператору САР (46) с соответствующими числовыми значениями коэффициентов $a_0 \ldots a_4$. Наибольшую частоту $\omega_{нб}$ и шаг по частоте $\Delta\omega$ выбирают рав-

ными $\omega_{нб}$ и $\Delta\omega$, принятыми при построении D-разбиения. В результате расчета и построения на комплексной плоскости получают годограф Михайлова (рисунок 67), который охватывает в положительном направлении четыре квадранта, следовательно, замкнутая САР с характеристическим полиномом четвертого порядка устойчива.

Для проверки устойчивости по критерию Найквиста анализируется АФЧХ разомкнутой системы. Передаточная функция разомкнутой САР (42) при принятых значениях коэффициентов имеет вид

$$W_{\text{раз}}(s) = \frac{0{,}5}{0{,}002s^4 + 0{,}046s^3 + 0{,}244s^2 + 0{,}71s + 0{,}51}. \qquad (47)$$

Вначале определяется устойчивость разомкнутой системы. Для этого используются собственный оператор (45) разомкнутой САР с числовыми значениями коэффициентов:

$$D_{\text{раз}}(s) = 0{,}002s^4 + 0{,}046s^3 + 0{,}244s^2 + 0{,}71s + 0{,}51.$$

Используя критерий Рауса-Гурвица, можно показать, что разомкнутая система устойчива. Затем, воспользовавшись программой RADIS , рассчитывается по выражению (47) и строится АФЧХ разомкнутой САР. Из представленного на рисунке 67 графика следует, что АФЧХ разомкнутой САР не охватывает точку с координатой $(-1; 0)$, следовательно, замкнутая САР будет устойчива.

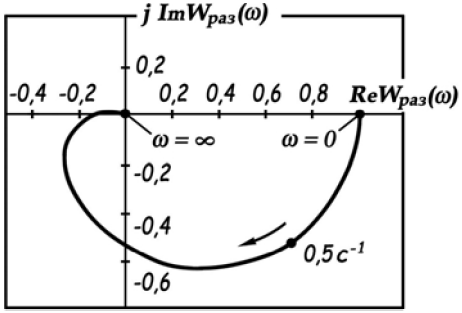


Рисунок 68. Амплитудно-фазочастотная характеристика разомкнутой САР частоты вращения ГТД

3.5. Оценка качества регулирования САР

Качество регулирования САР определяется по показателям качества переходного процесса при ступенчатом управляющем и возмущающем воздействиях.

При заданных исходных данных передаточные функции замкнутой САР при управляющем и возмущающем воздействиях соответственно имеют вид

$$W_{\text{зам}}(s)=\frac{0{,}195k_8}{0{,}002s^4+0{,}046s^3+0{,}244s^2+0{,}71s+0{,}51+0{,}5k_8};$$

$$F(s)=\frac{-0{,}002s^3-0{,}042s^2-0{,}19s-0{,}51}{0{,}002s^4+0{,}046s^3+0{,}244s^2+0{,}71s+0{,}51+0{,}5k_8}. \quad (48)$$

Задаваясь тремя значениями коэффициента k_8 из области устойчивости D-разбиения (см. рисунок 66), например $k_8=0{,}5;\ \ 1;\ \ 2$ определяют переходные характеристики при ступенчатом управляющем $\delta\alpha_{РУД}=1(t)$ и ступенчатом возмущающем $\delta M_н=1(t)$ воздействиях. Переходные характеристики (рисунок 69) рассчитываются по выражениям (3.41). Шаг интегрирования принимают равным $\Delta\tau=0{,}5T_{\min}=0{,}05$ с, время интегрирования $\tau_{\text{инт}}=5T_{\max}=5$ с, а шаг выдачи результатов $\tau=0{,}25$ с.

Из анализа графических зависимостей следует, что увеличение коэффициента усиления звена в прямой цепи регулирования САР приводит к колебательному переходному процессу и в тоже время к снижению статической погрешности поддержания заданной частоты вращения. Изменяя коэффициент k_8, можно добиться приемлемых показателей качества регулирования. Для реальных АР частоты вращения ГТД коэффициент усиления $k_8=0{,}5\ldots1$. Так, например, при $k_8=1$ будут следующие показатели качества регулирования.

При управляющем воздействии (см. рисунок 69, а):

- $\delta_{max}^{упр}=7{,}5\%$ – максимальное перерегулирование;
- $\tau_{рег}=2{,}1$ с – время регулирования (при допуске ± 5% от $\delta_{уст}$);
- $N=1$ – число колебаний за время переходного процесса;
- $\omega_c\approx2{,}1\ \text{с}^{-1}$ – угловая частота собственных колебаний.

При возмущающем воздействии (см. рисунок 69, б):

- $\delta_{max}^{возм} = 0{,}53$ – максимальное относительное отклонение частоты вращения ГТД при относительном возмущении $\delta M_н = 1$;
- $\delta n_{ст} = -0{,}505$ – статическая ошибка регулирования САР при $\delta M_н = 1$;
- $N = 1$ – число колебаний за время переходного процесса;
- $\omega_c \approx 2{,}1\ с^{-1}$ – угловая частота собственных колебаний.

Указанные показатели качества регулирования получены в результате обработки табличных данных по переходным характеристикам САР.

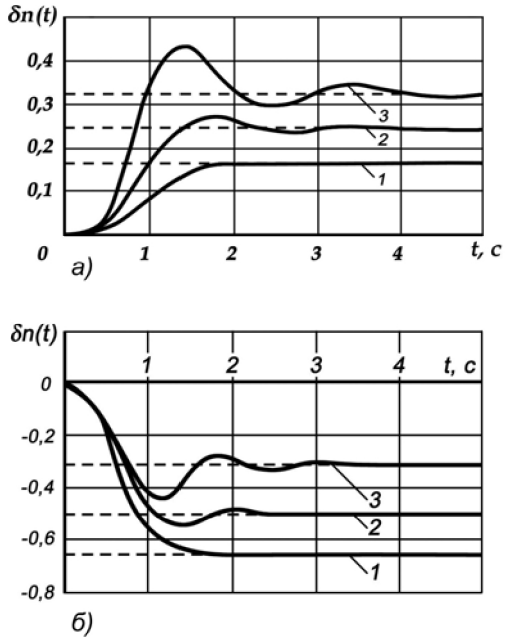


Рисунок 69. Переходные характеристики САР частоты вращения ГТД при ступенчатом управляющем воздействии $\delta\alpha_{руд} = 1(t)$ *(а) и ступенчатом возмущающем воздействии* $\delta M_н = 1(t)$ *(б) и различных значениях коэффициента* k_8*: 1.* $k_8 = 0.5$*; 2.* $k_8 = 1.0$*; 3.* $k_8 = 2.0$

Часть 4. Лабораторный практикум

4.1. Моделирование процессов управления в линейных технических системах

4.1.1. Передаточная функция звена управления. Исследование временных характеристик систем автоматического управления

Цель работы: определить понятие передаточной функции звена САУ. Исследовать временные характеристики различных типов звеньев, определение влияния параметров системы на временные характеристики САУ.

Теоретические сведения

Система автоматического управления (САУ) – система, состоящая из объекта управления и устройства управления, в котором автоматически выполняется заданный процесс.

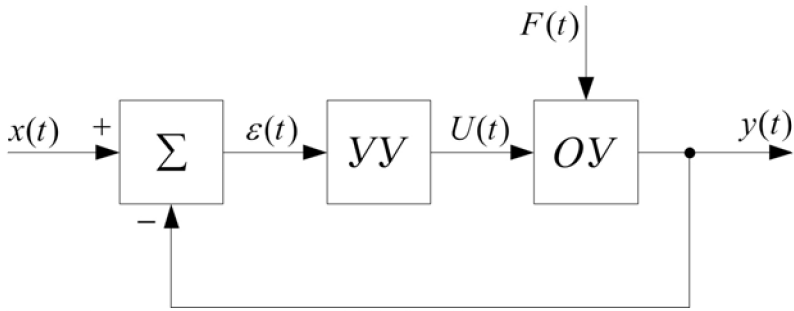


Рисунок 70. Структурная схема САУ, где УУ – устройство управления (регулятор); ОУ – объект управления (объект регулирования); $x(t)$ *– входное воздействие;* $\varepsilon(t)$ *– ошибка системы;* $U(t)$ *– управляющее воздействие;* $F(t)$ *– возмущающее воздействие;* $y(t)$ *– выход системы*

Для расчета различных САУ они обычно разбиваются на динамические звенья. Под динамическим звеном понимают устройство любого физического вида и конструктивного оформления, но описываемое определенным дифференциальным уравнением.

Передаточной функцией САУ называют отношение изображения выходной величины к изображению входной величины:

$$W(s) = \frac{y(s)}{x(s)}. \tag{49}$$

В следующей таблице приведены передаточные функции девяти разновидностей так называемых типовых динамических звеньев [12]. Под типовым звеном понимают такое звено, которое описывается дифференциальным уравнением не выше второго порядка.

№	Тип звена	Передаточная функция
1	Усилительное	$W(s)=k$
2	Идеальное дифференцирующее	$W(s)=ks$
3	Реальное дифференцирующее	$W(s)=\frac{ks}{1+Ts}$
4	Идеальное интегрирующее	$W(s)=\frac{k}{s}$
5	Реальное интегрирующее	$W(s)=\frac{k}{s(1+Ts)}$
6	Апериодическое звено 1-го порядка	$W(s)=\frac{k}{1+Ts}$
7	Апериодическое звено 2-го порядка	$W(s)=\frac{k}{1+T_1 s+T_2^2 s^2}$
8	Колебательное	$W(s)=\frac{k}{1+2aTs+Ts^2}$, где a - коэффициент затухания
9	Консервативное	$W(s)=\frac{k}{1+T^2 s^2}$

Динамические свойства звена могут быть определены по его переходной и импульсной (весовой) характеристикам.

Переходная характеристика $h(t)$ представляет собой процесс на выходе звена, возникающий при подаче на его вход скачкообразного воздействия при величине скачка, равной единице, пример вида переходной характеристики показан на рисунке 71:

$$h(t)=L^{-}\left\{\frac{W(s)}{s}\right\}. \qquad (50)$$

С помощью переходной характеристики находят показатели качества системы:

1. Время установления (отрезок времени, за который переходная характеристика достигла первый раз своего установившегося значения) – t_y, установившееся значение выходной величины $h_{\text{уст}}$.

2. Время регулирования или время переходного процесса t_{nn} (время, по истечении которого отклонения управляющей величины относительно установившегося значения становится и остаётся по абсолютной величине меньше наперед заданной величины 2δ, где $\delta = (1 \div 5)\%\ h_{\text{уст}}$.

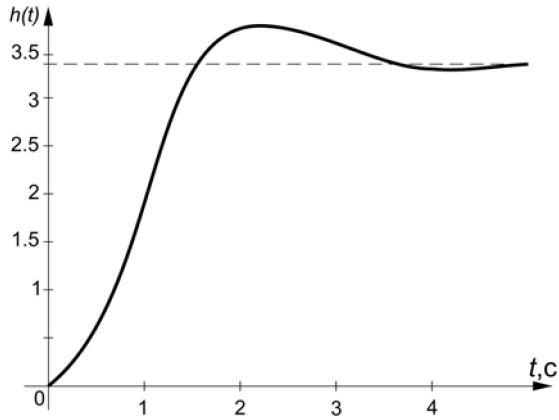


Рисунок 71. Переходная характеристика типового звена

Перерегулирование (характеризует размах системы).

Склонность системы к колебаниям, а следовательно и запас устойчивости, могут быть охарактеризованы максимальным значением регулируемой величины $h_{\max}$, или так называемым перерегулированием:

$$\delta h_{\max} = \frac{h_{\max} - h_{\text{уст}}}{h_{\text{уст}}} \cdot 100\% .$$

Импульсная (весовая) характеристика $K(t)$ представляет собой реакцию звена на единичную импульсную функцию, поданную на его вход. Единичная импульсная функция, или дельта-функция (функция Дирака) тождественно равна нулю повсюду, кроме точки $t = 0$, где она стремится к бесконечности:

$$h(t) = L^{-}\{W(s)\} = \frac{dh(t)}{dt} . \qquad (51)$$

Импульсная функция представляет собой распространенный вид входного воздействия и в автоматических системах, например, кратко-

временный удар нагрузки на валу двигателя, кратковременный ток короткого замыкания генератора, отключаемый плавкими предохранителями, и т.п.

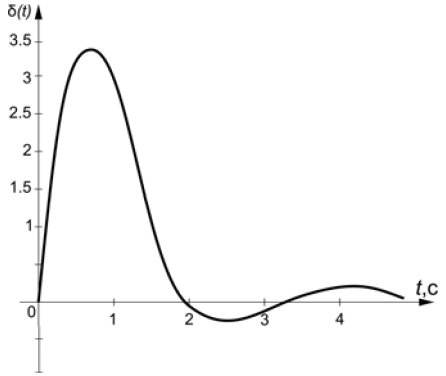
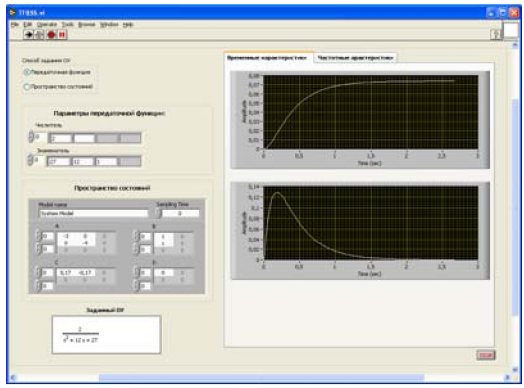


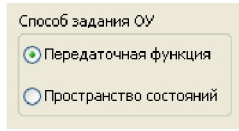
Рисунок 72. Импульсная характеристика звена

Программа выполнения работы:

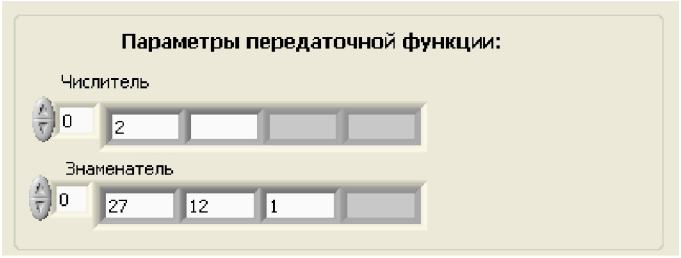
Исходный файл для выполнения работы *L01-03_Исследование передаточной функции и вект-матр модели.vi*.



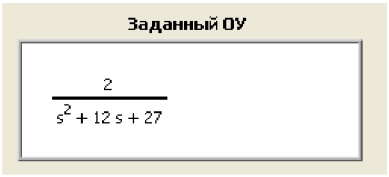
В группе «Способ задание ОУ» выбрать «Передаточная функция»:



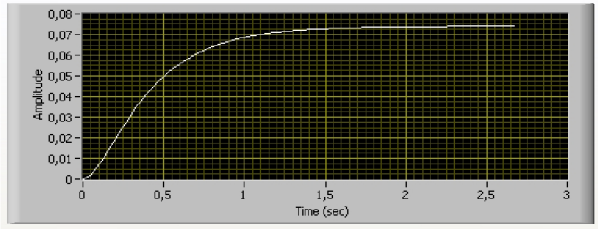
В группе «Параметры передаточной функции» задать коэффициенты при степенях s числителя и знаменателя исследуемой передаточной функции:



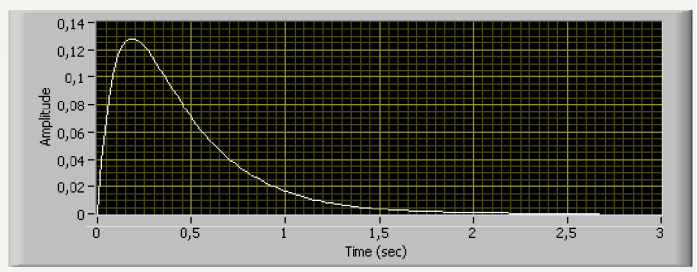
Вид исходной передаточной функции можно увидеть в группе «Заданный ОУ»:



При запуске программы на выполнение, перейдя на закладку «Временные характеристики», можно получить переходную характеристику:



и импульсную характеристику заданного ОУ:



По полученным характеристикам рассчитать показатели качества системы (t_y, t_{nn}, $\delta h_{\max}$).

Сравните результаты с рассчитанными и построенными вами.

4.1.2. Исследование частотных характеристик систем автоматического управления

Цель работы: Исследовать частотные характеристики различных типов звеньев, определение влияния параметров системы на частотные характеристики САУ.

Теоретические сведения.

К частотным характеристиками динамического звена относятся амплитудно-фазочастотная (АФЧХ) и логарифмическая амплитудная (ЛАХ) и фазовая частотные характеристики (ЛФХ).

Комплексная передаточная функция $W(j\omega)$:

$$W(j\omega) = U(\omega) + jV(\omega) = N(\omega)\cdot e^{j\Psi(\omega)}, \qquad (52)$$

$$M(\omega) = \sqrt{U(\omega)^2 + V(\omega)^2}\ ,\ \Psi(\omega) = arctg\frac{V(\omega)}{U(\omega)},$$

где $U(\omega)$ - вещественная часть, $V(\omega)$ - мнимая часть АФЧХ.

Амлитудно-фазовая частотная характеристика представляет собой геометрическое место концов векторов (годограф), соответствующих комплексной передаточной функции $W(j\omega)$ при изменении частоты от 0 до ∞ (рисунок 73).

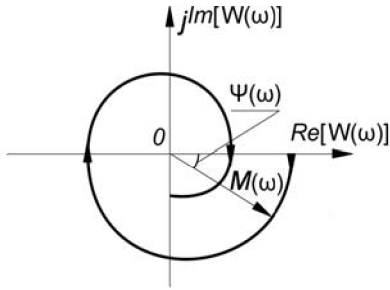


Рисунок 73. Амплитудно-фазовая частотная характеристика САР

АЧХ – это кривая зависимости модуля $W(\omega)$ от частоты, показывающая, как пропускает звено сигнал различной частоты. **ФЧХ** – кривая зависимости $\Psi(\omega)$ от частоты, показывающая фазовые сдвиги, вносимые звеном на различных частотах.

При построении частотных характеристик сложных систем алгоритм усложняется, поэтому наиболее просто вычерчивать частотные характеристики в логарифмическом масштабе. Прологарифмируем выражение комплексной передаточной функции (52) :

$$\ln(W(j\omega)) = \ln W(\omega) + j\Psi(\omega). \quad (53)$$

ЛАЧХ – кривая зависимости логарифма модуля $\ln W(\omega)$ комплексной передаточной функции от частоты, отложенной в логарифмическом масштабе по оси абсцисс. Для построения ЛАХ находится величина (выражаемая в децибелах)

$$L(\omega) = 20\lg W(\omega). \quad (54)$$

ЛФЧХ – зависимость аргумента $\Psi(\omega)$ комплексной передаточной функции от частоты, отложенной в логарифмическом масштабе по оси абсцисс.

С помощью частотных характеристик проводят анализ устойчивости методами Михайлова и Найквиста, а также синтез САУ.

Общее условие устойчивости: чтобы непрерывная система была устойчива, необходимо и достаточно, чтобы вещественные части корней характеристического уравнения лежали в левой полуплоскости комплексной плоскости, т.е. были отрицательными.

Критерий Михайлова.

Рассмотрим характеристический полином:

$$D(s) = a_0 s^n + a_1 s^{n-1} + \ldots + a_{n-1} s + a_n. \quad (55)$$

Подставим в этот полином значение $s = j\omega$. При этом получим характеристический комплекс

$$D(j\omega) = X(\omega) + jY(\omega) = N(\omega) e^{j\varphi(\omega)}, \quad (56)$$

где вещественная часть будет содержать члены с четными степенями ω:

$$X(\omega) = a_n - a_{n-2}\omega^2 + \ldots, \quad (57)$$

а мнимая – с нечетными степенями ω:

$$Y(\omega) = a_{n-1}\omega - a_{n-3}\omega^3 + \ldots. \quad (58)$$

1-я формулировка: система управления будет устойчива, если полное приращение фазы или аргумента $\varphi(\omega)$ при изменении ω от 0 до ∞ равно $n\frac{\pi}{2}$, где n - степень полинома $D(s)$. Если полное приращение аргумента $\varphi(\omega)$ окажется меньше $n\frac{\pi}{2}$, то система неустойчива.

Если значение частоты ω менять непрерывно от нуля до бесконечности, то вектор с модулем $N(j\omega)$ будет изменяться по величине и направлению, описывая своим концом некоторую кривую (годограф), которая называется кривой Михайлова (рисунок 74).

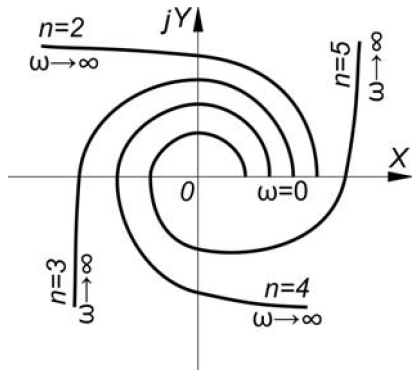


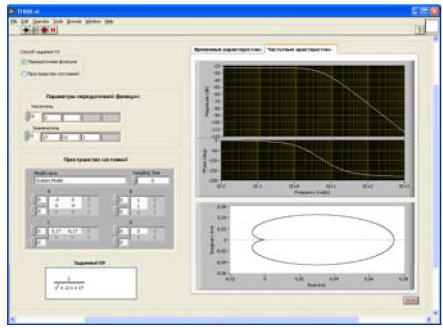
Рисунок 74. Годографы Михайлова устойчивых САР

2-я формулировка: для устойчивой системы годограф Михайлова проходит последовательно n квадрантов.

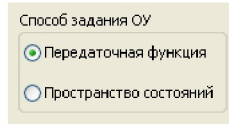
3-я формулировка: чтобы система управления была устойчива, корни уравнений $X(\omega)=0$ (57) и $Y(\omega)=0$ (58) должны чередоваться последовательно [12].

Программа выполнения работы:

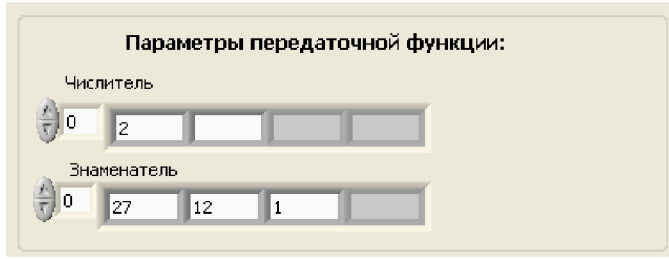
1. Исходный файл для выполнения работы *L01-03_Исследование передаточной функции и вект-матр модели.vi*.



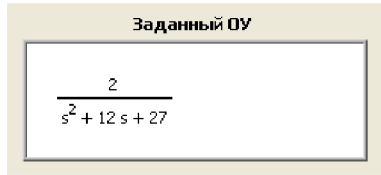
2. В группе «Способ задание ОУ» выбрать «Передаточная функция»:



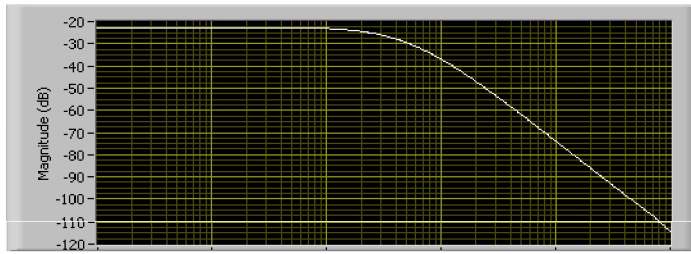
3. В группе «Параметры передаточной функции» задать коэффициенты при степенях s числителя и знаменателя исследуемой передаточной функции:



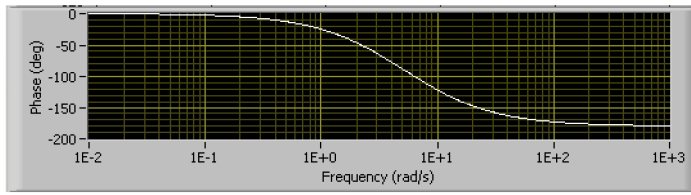
Вид исходной передаточной функции можно увидеть в группе «Заданный ОУ»:



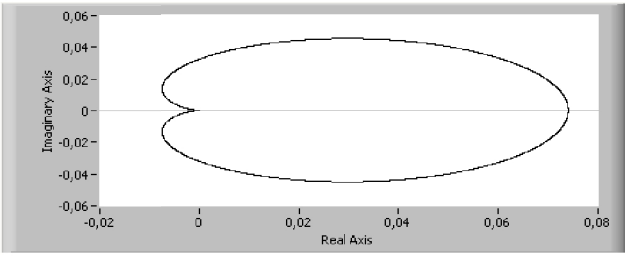
4. При запуске программы на выполнение, перейдя на закладку «Частотные характеристики», можно получить логарифмическую амплитудно-частотную характеристику:



логарифмическую фазочастотную характеристику:



амплитудно-фазочастотную характеристику заданного ОУ:



4.1.3. Моделирование динамических процессов в САР частоты вращения двигателя с использованием программного комплекса МВТУ

Цель работы: изучение методов моделирования динамических процессов, определения устойчивости и качества переходных характеристик САР; приобретение навыков работы с программным комплексом МВТУ на ПЭВМ.

Содержание работы

Ознакомление со схемой, принципом действия и математической моделью изодромной САР частоты вращения ротора двигателя.

Составление структурной схемы и определение передаточных функций САР.

Построение D – разбиения в плоскости коэффициента усиления системы и анализ устойчивости САР.

Моделирование переходных процессов в САР на ПЭВМ с использованием программного комплекса МВТУ.

Теоретические основы

Схема и принцип действия САР. Система автоматического регулирования включает в себя объект регулирования - газотурбинный двигатель 1 и изодромный регулятор частоты вращения непрямого действия (рисунок 75). Регулятор состоит из центробежного чувствительного элемента 2, элемента сравнения - пружины 3, штока 4, задающего механизма 5, горизонтального рычага 6, золотникового распределителя 7, поршневого сервомотора 8, катаракта изодромной обратной связи 9 с пружиной 10 и исполнительного механизма - дроссельной иглы 11.

Регулируемым параметром САР является частота вращения n ротора двигателя 1, а регулирующим воздействием – изменение расхода топлива G_T в камеру сгорания. Управляющим воздействием является поворот рычага управления двигателя $\alpha_{РУД}$, а возмущающим воздействием – изменение давления заторможенного потока воздуха на входе в двигатель $p_в^*$.

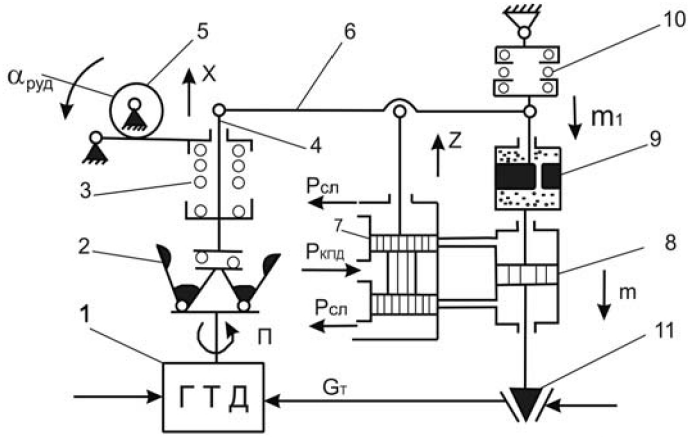


Рисунок 75. Изодромная САР частоты вращения ротора двигателя

На любом установившемся режиме работы САР соблюдается равенство осевой составляющей центробежных сил грузиков 2 и силы противодействия пружины 3. Нарушение этого равенства приводит к отклонению штока 4 и началу действия регулятора. Пусть давление $p_в^*$ снизилось, что привело к увеличению частоты вращения n. При этом шток 4 под действием избыточной силы грузиков 2 переместится вверх, увлекая связанные с ним рычаг 6 и золотник 7. Верхняя полость сервопоршня 8 соединяется с каналом на выходе из клапана постоянного давления (КПД), а нижняя полость - со сливом. Под действием перепада давления $p_{КПД} - p_{сл}$ сервопоршень 8 переместится вниз и уменьшит проходное сечение дроссельной иглы 11. При постоянном перепаде давления на дроссельной игле, поддерживаемом специальным клапаном (на схеме не показан), расход топлива G_T уменьшится, что приведет к восстановлению частоты вращения n.

В начале переходного процесса жидкость в катаракте 9 не успевает перетечь через жиклер в поршне из нижней полости в верхнюю полость. Поэтому при перемещении сервопоршня 8 вниз золотник 7 также перемещается вниз к нейтральному положению. Окна золотника 7 прикрываются, что приводит к замедлению скорости движения вниз сервопоршня 8 и соответственно к замедлению скорости снижения расхода топлива в двигатель, то есть в начальный момент переходного процесса регулятор действует как статический регулятор с жесткой обратной связью (рисунок 76), для которого характерны плавность переходного процесса (достоинство) и наличие статической ошибки регулирования (недостаток). В конце переходного процесса в результате перетечки жидкости через жиклер в

поршне катаракта 9 рычаг 6 возвращается пружиной 10 в исходное состояние, независимо от положения сервопоршня 8. При этом разрывается обратная связь и регулятор действует как астатический регулятор, для которого характерны колебательный переходный процесс (недостаток) и отсутствие статической ошибки регулирования (преимущество).

Таким образом, в изодромном регуляторе реализованы положительные качества статического и астатического регуляторов.

Уравнения звеньев САР. Исследование динамических характеристик САР начинается с разбивки ее на звенья, принятия определенных упрощающих допущений и составления дифференциальных уравнений звеньев [1, 2]. При выводе уравнений звеньев за положительное направление движения элементов принято такое, которое соответствует действию регулятора при увеличении частоты вращения. Система дифференциальных уравнений звеньев изодромной САР записывается в следующем виде:

$$T_1 \frac{d\delta n}{dt} + \delta n = k_1 \delta G_T - k_2 \delta p_B^* \qquad (59)$$

- для двигателя как объекта регулирования;

$$T_2 \frac{d\delta x}{dt} + \delta x = k_3 \delta n - k_4 \delta \alpha_{РУД} \qquad (60)$$

- для центробежного чувствительного элемента;

$$\delta z = k_5 \delta x - k_6 \delta m_1 \qquad (61)$$

- для горизонтального рычага 6;

$$T_3 \frac{d\delta m_1}{dt} + \delta m_1 = T_3 \frac{d\delta m}{dt} \qquad (62)$$

- для катаракта 9 с пружиной 10;

$$T_4 \frac{d\delta m}{dt} = \delta z \qquad (63)$$

- для сервопоршеня 8 с золотниковым распределителем 7;

$$\delta G_T = -k_7 \delta m \qquad (64)$$

- для дроссельной иглы 11.

В уравнениях (59)...(64) приняты следующие обозначения:

$$\delta n = \frac{\Delta n}{n_0}; \quad \delta G_T = \frac{\Delta G_T}{(G_T)_0}; \quad \delta p_B^* = \frac{\Delta p_B^*}{(p_B^*)_0}; \quad \delta x = \frac{\Delta x}{x_0};$$

$$\delta m = \frac{\Delta m}{m_0}; \quad \delta z = \frac{\Delta z}{z_0}; \quad \delta m_1 = \frac{\Delta m_1}{(m_1)_0}; \quad \delta \alpha_{РУД} = \frac{\Delta \alpha_{РУД}}{(\alpha_{РУД})_0}$$

относительные приращения соответствующих параметров; нижний индекс “0” у параметров означает их принадлежность к базовым величинам; $k_1, k_2, k_3, k_4, k_5, k_6, k_7$ – соответствующие коэффициенты передачи звеньев; T_1, T_2, T_4 – постоянные времени двигателя, чувствительного элемента и сервопоршня с золотниковым распределителем; $T_3 = \dfrac{R_Ж F_n^2}{C_{ПР}}$ – постоянная времени катаракта 9 с пружиной 10; $R_Ж$ – гидравлическое сопротивление жиклера, $F_П$ – площадь поршня катаракта; $C_{ПР}$ – жесткость пружины 10.

Система дифференциальных уравнений для астатической и статической САР получается как частные случаи уравнений для изодромной САР. При этом в уравнениях для астатической САР: $T_3 = 0 \left(R_Ж = 0, \delta m_1 = 0\right)$, а для статической САР: $T_3 = \infty \left(R_Ж = \infty, \delta m_1 = \delta m\right)$.

Структурная схема и передаточные функции САР. При исследовании динамических свойств САР составляется ее структурная схема. Для этого система дифференциальных уравнений приводится к операторной форме:

$$\begin{aligned}
&\left(T_1 s + 1\right)\delta\tilde{n} = k_1 \delta\tilde{G}_T - k_2 \delta\tilde{p}_B^*;\\
&\left(T_2 s + 1\right)\delta\tilde{x} = k_3 \delta\tilde{n} - k_4 \delta\tilde{\alpha}_{РУД};\\
&\delta\tilde{z} = k_5 \delta\tilde{x} - k_6 \delta\tilde{m}_1;\\
&\left(T_3 s + 1\right)\delta\tilde{m}_1 = T_3 s \delta\tilde{m};\\
&T_4 s \delta\tilde{m} = \delta\tilde{z};\\
&\delta\tilde{G}_T = -k_7 \delta\tilde{m}.
\end{aligned} \qquad (65)$$

Волнистая черточка над параметрами в уравнениях (65) означает то, что они учитываются в изображениях по Лапласу, а $s = \dfrac{d}{dt}$ – переменная в преобразовании Лапласа.

Структурная схема изодромной САР представляет собой соединение звеньев (рисунок 76), передаточные функции которых получены в соответствии с уравнениями (65). Структурные схемы астатической $\left(T_3 = 0\right)$ и статической $\left(T_3 = \infty\right)$ САР получаются как частные случаи структурной схемы изодромной САР.

Исследование динамических характеристик систем облегчается при использовании передаточных функций САР, которые представляют собой отношение изображения по Лапласу выходной величины к изображению по Лапласу входной величины при нулевых начальных условиях.

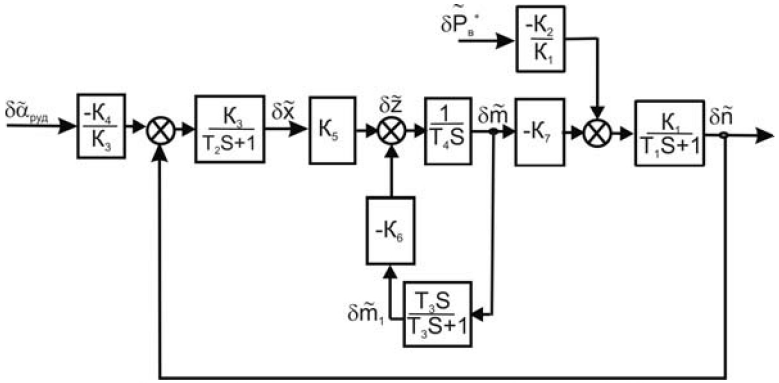


Рисунок 76. Структурная схема изодромной САР

Передаточные функции САР могут быть получены в результате преобразования структурной схемы или непосредственно из решения системы уравнений в операторной форме (65). Передаточная функция по управляющему воздействию

$$W(s) = \delta\tilde{n} / \delta\tilde{\alpha}_{РУД} \text{ при } \delta\tilde{p}_B^* = 0$$

замкнутой изодромной САР определяется зависимостью

$$W(s) = \frac{b_0 s + b_1}{a_0 s^4 + a_1 s^3 + a_2 s^2 + a_3 s + a_4},$$

где

$$b_0 = k_4 k_5 k_7 T_3; \quad b_1 = k_4 k_5 k_7;$$

$$a_0 = T_1 T_2 T_3 T_4; \quad a_1 = T_1 T_0 (T_4 + k_6 T_3) + T_3 T_4 (T_1 + T_2);$$

$$a_2 = T_3 T_4 (T_1 + T_2)(T_4 + k_6 T_3); \quad a_3 = T_4 + k_6 T_3 + k_1 k_3 k_5 k_7 T_3;$$

$$a_4 = k_1 k_3 k_5 k_7.$$

Передаточная функция изодромной САР по возмущающему воздействию $F(s) = \dfrac{\delta\tilde{n}}{\delta\tilde{p}_B^*}$ при $\delta\tilde{\alpha}_{РУД} = 0$ имеет вид

$$F(s) = \frac{c_0 s^3 + c_1 s^2 + c_2 s}{a_0 s^4 + a_1 s^3 + a_2 s^2 + a_3 s + a_4},$$

где $c_0 = k_2 T_2 T_3 T_4; c_1 = k_2 \left[T_3 T_4 + T_2 \left(T_4 + k_6 T_3 \right) \right]; c_2 = k_2 \left(T_4 + k_6 T_3 \right)$.

Исследование устойчивости САР. При исследовании устойчивости САР рассматривается собственный оператор системы $D(s) = a_0 s^n + a_1 s^{n-1} + \ldots + a_{n-1} s + a_n$, входящий в знаменатели передаточных функций $W(s)$ и $F(s)$.

Для устойчивости САР необходимо и достаточно, чтобы вещественные части корней уравнений $D(s) = 0$ были отрицательны. Ввиду трудности поиска корней уравнения высокого порядка разработаны критерии устойчивости, которые по заданным коэффициентам $a_0 \ldots a_n$ позволяют определить устойчивость системы. Например, для устойчивости САР по алгебраическому критерию устойчивости Рауса-Гурвица необходимо и достаточно, чтобы при $a_0 > 0$ все диагональные миноры определителя, составленного из коэффициентов собственного оператора по определенному правилу, были положительны. Для системы с уравнением третьего порядка $(n = 3)$ условия устойчивости записываются в виде неравенств:

$$a_0 > 0; \quad a_1 > 0; \quad a_1 a_2 - a_0 a_3 > 0. \qquad (66)$$

Если хотя бы один из диагональных миноров будет отрицателен, то САР неустойчива, если равен нулю, то САР находится на границе устойчивости. Разработчиков САР часто интересует область изменения какого-либо параметра, в которой система устойчива. Выделить такую область устойчивости системы можно, если воспользоваться методом D-разбиения, а для несложных САР – неравенствами (66). Рассмотрим определение области устойчивости по коэффициенту усиления исполнительного механизма k_7 астатической САР, для которой $T_3 = 0$ и собственный оператор имеет вид

$$D(s) = a_0 s^3 + a_1 s^2 + a_2 s + a_3,$$

где $a_0 = T_1 T_2 T_4; \quad a_1 = T_4 \left(T_1 + T_2 \right); \quad a_2 = T_4; \quad a_3 = k_1 k_3 k_5 k_7$.

Так как $a_0 > 0; \; a_1 > 0$, для устойчивости САР необходимо выполнение неравенства $a_1 a_2 - a_0 a_3 > 0$ или $T_4^2 \left(T_1 + T_2 \right) - k_1 k_3 k_5 k_7 T_1 T_2 T_4 > 0$. Из последнего неравенства следует, что система устойчива, если

$$k_7 < \frac{T_4 \left(T_1 + T_2 \right)}{k_1 k_3 k_5 T_1 T_2}.$$

Моделирование переходных процессов в САР

Исследование переходных характеристик изодромной САР проводится на ПВЭМ. Для решения задачи на ПЭВМ необходимо:

- составить на основе дифференциальных уравнений изодромной САР операторные уравнения с числовыми значениями коэффициентов;
- составить структурную схему САР;
- набрать изодромную модель САР с использованием ПК МВТУ [5] (см. рисунок 77);
- задаваясь ступенчатым управляющим воздействием, зарегистрировать переходный процесс в устойчивой статической, астатической и изодромной САР (рисунок 78);
- определить основные показатели качества переходного процесса в изодромной САР при ступенчатом возмущающем воздействии $\delta\tilde{p}_B^* = 0{,}1[1(t)]$ и различных значениях постоянной времени катаракта $T_3 = 0;\ 0.5\ \text{с};\ \infty$, соответствующих статической, астатической и изодромной САР (при значении коэффициента $k_7 = \dfrac{(k_7)_{гр}}{2}$, где $(k_7)_{гр} = \dfrac{T_4(T_1 + T_2)}{k_1 k_3 k_5 T_1 T_2}$ – коэффициент, соответствующий границе устойчивости САР);

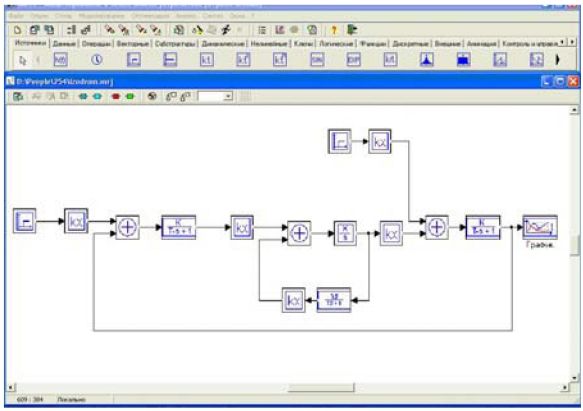


Рисунок 77. Окно программы МВТУ со структурной схемой изодромной САР

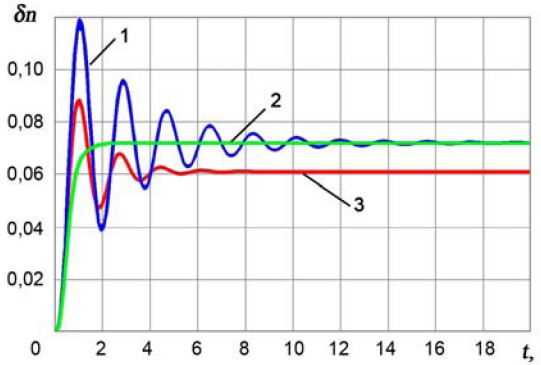


Рисунок 78. Переходные процессы в устойчивой САР при управляющем воздействии: 1 – астатическая САР; 2 – изодромная САР; 3 – статическая САР.

- в результате анализа переходных характеристик определить основные показатели качества регулирования САР: τ_p – время регулирования; $\delta n_{\max}$ – максимальное отклонение регулируемого параметра; f – частота колебаний, N – число колебаний за время переходного процесса; δn_{CT} – статическая ошибка регулирования;
- задаваясь ступенчатым управляющим воздействием, зарегистрировать переходный процесс в неустойчивой САР (см. рисунок 80);

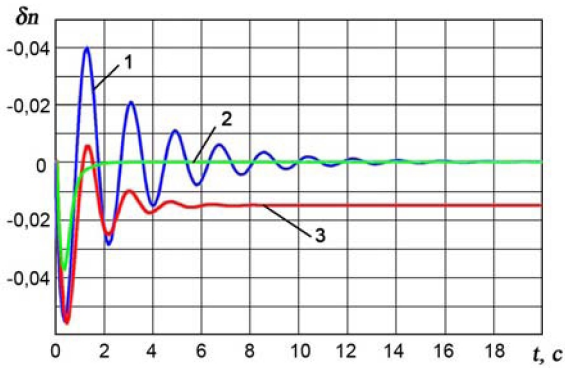


Рисунок 79. Переходные процессы в устойчивой САР при возмущающем воздействии: 1 – астатическая САР; 2 – изодромная САР; 3 – статическая САР.

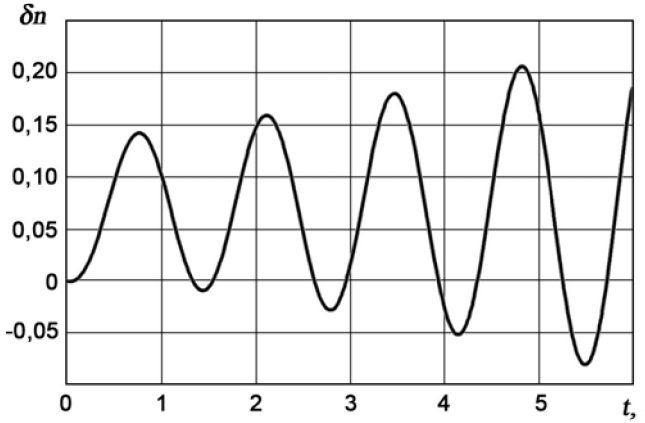


Рисунок 80. Переходные процессы в неустойчивой САР при управляющем воздействии

- задаваясь ступенчатым управляющим воздействием и ступенчатым возмущающим воздействием с задержкой 10 с, зарегистрировать переходный процесс в устойчивой изодромной САР (см. рисунок 81);

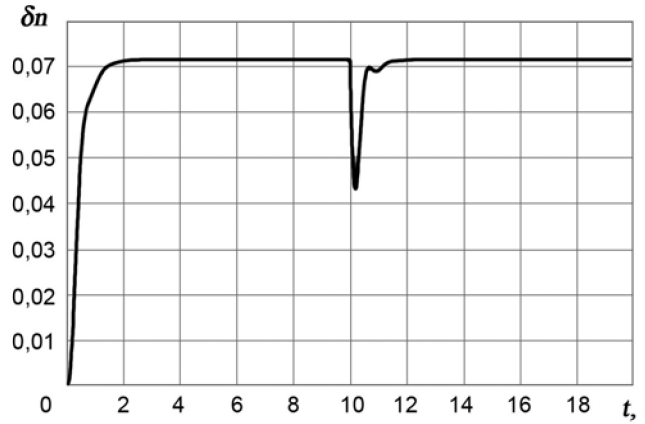


Рисунок 81. Переходные процессы в устойчивой САР при управляющем и возмущающем воздействиях

По полученным результатам делаются выводы о влиянии структуры и параметров САР на статическую погрешность, о влиянии коэффициента усиления на устойчивость САР, о влиянии постоянной времени изодромной обратной связи $T_з$ на основные показатели качества регулирования.

4.1.4. Система управления скоростью автомобиля с использованием пропорционального регулятора

Цель работы: проектирование пропорционального регулятора скорости автомобиля.

Теоретические основы

Рассмотрим поступательное движение автомобиля по наклонной плоскости, как изображено на рисунке 82.

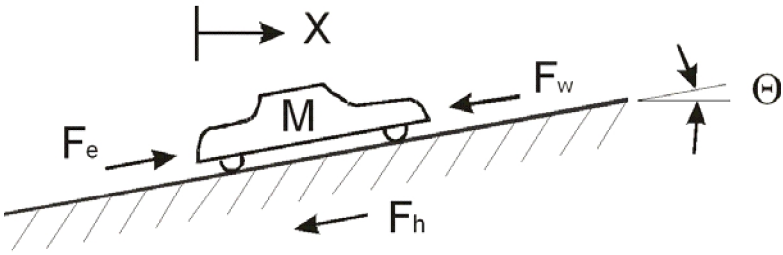


Рисунок 82. Автомобиль на наклонной плоскости

В число внешних сил, приложенных к телу, включены следующие силы: сила тяги двигателя (передаваемая через колёса) или торможения F_e (в последнем случае величина F_e отрицательна), аэродинамическая сила включающая силу, обусловленную ветровым воздействием F_w, и проекцию силу тяжести на продольную ось автомобиля F_h. Уравнение движения автомобиля в соответствии со вторым законом Ньютона можно записать в виде

$$m\frac{d^2x}{dt^2} = F_e - F_w - F_h,$$

где m – масса автомобиля, x – перемещение, F_e – величина силы, для которой заданы максимальное и минимальное значения – максимальная сила тяги двигателя и максимальная сила торможения соответственно.

Положим, что выполняется соотношение

$$-2000\ \text{Н} \le F_e \le 1000\ \text{Н}.$$

Аэродинамическая сила (сила лобового сопротивления) прямо пропорциональна коэффициенту лобового сопротивления C_D, фронтальной площади автомобиля A и скоростному напору P, который определяется:

$$P = \frac{\rho V^2}{2},$$

где ρ – плотность воздуха, V – скорость, включающая скорость движения автомобиля и скорость ветра V_w.

Предположим, что задано соотношение

$$\frac{C_D A \rho}{2} = 0.001,$$

и собственное движение воздушной среды (ветер) описывается уравнением

$$V_w = 20\sin(0.01t),$$

так что аэродинамическая сила определяется как (при условии, что ветер дует против движения):

$$F_w = \frac{C_D A \rho}{2} V^2 = 0.001(\dot{x} + 20\sin(0.01t))^2.$$

Затем предположим, что поверхность дороги не является горизонтальной и уравнение проекции силы тяжести запишем в виде

$$F_h = mg\sin(\alpha) = 30\sin(0.0001x).$$

Для управления скоростью автомобиля используем пропорциональный регулятор:

$$F_c = K_e(\dot{x}_{зад} - \dot{x}),$$

где F_c – сила тяги (торможения) двигателя, $\dot{x}_{зад}$ – заданная величина скорости (м/с), K_e – коэффициент обратной связи.

В этом случае сила тяги автомобиля прямо пропорциональна сигналу рассогласования. Как указывалось ранее, сила тяги двигателя F_e изменяется между наибольшим и наименьшим значениями и величина $K_e = 50$.

Модель, представленная в виде структурной схемы в системе Simulink, показана на рисунке 83. Конечное время моделирования движения автомобиля зададим равным 20 с.

Входной переменной пропорционального регулятора является требуемая скорость. Настройку данного параметра можно выполнить с помощью блока Slider Gain (оперативно регулируемый коэффициент усиления) из библиотеки блока Math. Дважды нажмите левую кнопку мыши на изображение блока Slider Gain и в диалоговом окне и задайте границы диапазона и требуемое значение скорости, которое можно изменять в процессе моделирования.

Пропорциональный регулятор включает блок Sum, который вычисляет величину ошибки (разность между величиной заданной скорости, и текущим её значением) и блок Gain (имя K_e).

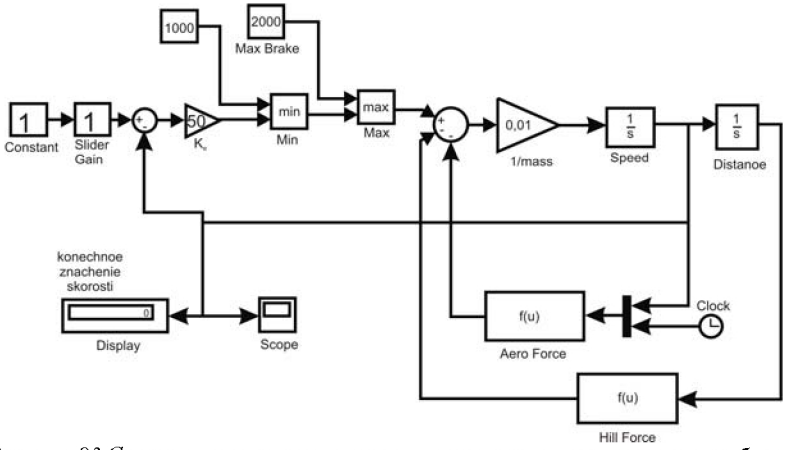


Рисунок 83.Структурная схема системы управления скоростью автомобиля с пропорциональным регулятором при моделировании в ПК Simulink

Максимальное и минимальное значения силы тяги задаются в блоках MinMax из библиотеки блоков Math (Математические функции). Блоки Constant (Постоянная величина) с именами *Max thrust* и *Max brake* соединяются с блоками MinMax.

Трансцендентные функции, описывающие уклон дороги и аэродинамическое лобовое сопротивление, задаются в блоках Fcn. В текстовом поле **Expression** диалогового окна блока Fcn с именем *AeroForce* задайте оператор

$$0.001 \cdot (u[1] + 20 \cdot \sin(0.01u[2]))^2 \cdot 2.$$

В текстовом поле Expression блока Fcn с именем Hill Force введите оператор

$$30 \cdot \sin(0.0001 \cdot u[1]).$$

Блок Display показывает значение скорости в м/с, график значений скорости автомобиля для значений моментов времени моделирования можно построить с помощью блока Scope. Данную математическую модель можно охарактеризовать как умеренную жесткую систему. Результаты моделирования представлены на рисунке 84.

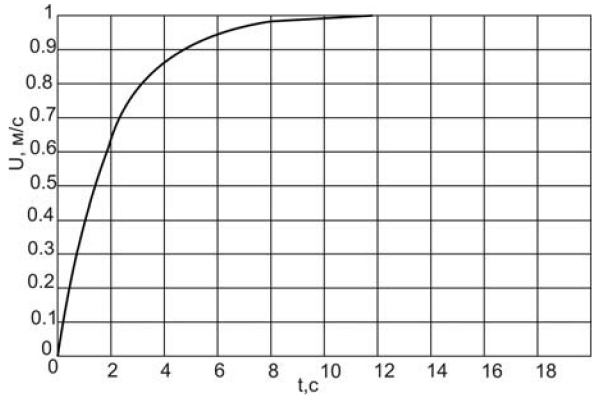


Рисунок 84. Переходная характеристика системы управления скоростью автомобиля

4.2. Моделирование процессов управления в нелинейных технических системах

4.2.1. Выбор параметров ПИД-регуляторов для систем с запаздыванием

Цель работы: приобретение навыков моделирования динамических процессов с использованием программного комплекса Simulink; выбор параметров ПИД-регуляторов;

Теоретические основы

ПИД-регулятор является одним из самых распространенных регуляторов в САР различного назначения. Преимуществом такого регулятора является возможность обеспечения устойчивости САР и качества регулирования по сравнению с другими простейшими, построенными по пропорциональному, интегральному или дифференциальному закону регулирования. Особенностью ПИД- регулятора является необходимость его настройки под заданные выходные параметры, что возможно в результате моделирования динамических процессов в САР.

Рассмотрим простую SISO (single input - single output – с одним входом и одним выходом) – систему управления, показанную на рисунке 85.

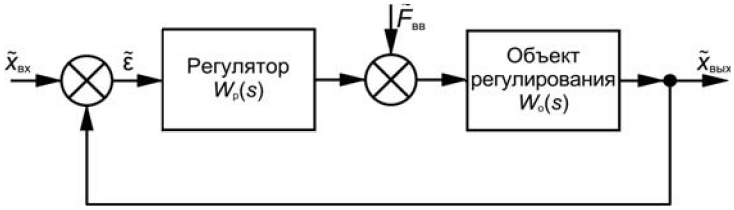


Рисунок 85. Структурная схема замкнутой САР

Передаточные функции регуляторов, построенных по пропорциональному, пропорционально – интегральному и пропорционально – интегрально – дифференциальному законам регулирования имеют вид

$$W_P(s) = K_p; \tag{67}$$

$$W_{PI}(s) = K_p\left(1+\frac{1}{T_i s}\right); \tag{68}$$

$$W_{PD}(s) = K_p\left(1+\frac{T_d s}{\tau_D s+1}\right); \tag{69}$$

$$W_{PID}(s) = K_p\left(1+\frac{1}{T_i s}+\frac{T_d s}{\tau_D s+1}\right). \tag{70}$$

Здесь s – оператор Лапласа, K_p – коэффициент усиления пропорционального регулятора, T_i – постоянная времени интегрального регулятора, T_d – постоянная времени дифференциального регулятора; τ_D – дополнительная постоянная времени.

Надо быть осторожным при использовании правил настройки ПИД – регулятора, так как имеются различные варианты задания параметров. Уравнение (70) называют стандартной формой.

Пропорциональное действие обеспечивает составляющую, которая зависит от текущего значения ошибки управления. Пропорциональный регулятор может управлять любым устойчивым объектом, но это приводит к ограниченным характеристикам и статической ошибке регулирования.

Для описания пропорционального воздействия традиционно используют также выражение «диапазон пропорциональности», определяемый формулой

$$ДП[\%] = \frac{100[\%]}{K_p}. \tag{71}$$

Интегральное действие, с другой стороны, формирует выходной сигнал регулятора, пропорциональный накопленной ошибке. В САР с интегральным регулятором статическая ошибка равна нулю. Интегральный способ, рассматриваемый в изоляции от других способов, имеет недостаток: его полюс или корень характеристического уравнения в начале координат снижает запас устойчивости САР.

Дифференцирующее действие определяется скоростью изменения ошибки управления – это быстрый способ управления. Такой способ ино-

гда называется прогнозирующим способом из-за его зависимости от тенденции изменения ошибки. Главным ограничением дифференцирующего способа, рассматриваемого в изоляции от других способов, является его тенденция формировать большие управляющие сигналы в ответ на высокочастотные сигналы ошибки. Его создание требует реализуемой передаточной функции, поэтому обычно к дифференцированию добавляется полюс, как можно заметить в уравнениях (69) и (70). В отсутствии других ограничений дополнительная постоянная времени τ_D обычно выбирается такой, что $0{,}1T_d \le \tau_D \le 0{,}2T_d$. Эта постоянная называется постоянной времени дифференцирования, чем она меньше, тем больше диапазон частот, где фильтрованное дифференцирование соответствует точному дифференцированию, с равенством в пределе:

$$\lim_{\tau_D \to 0} u_{PID}(t) = K_p e(t) + \frac{K_p}{T_r}\int_{t_0}^{t} e(\tau)d\tau + K_p T_d \frac{de(t)}{dt} + const. \qquad (72)$$

У всех промышленных ПИД – регуляторов устанавливают τ_D как фиксированную долю T_d, а не рассматривают ее как независимый параметр проектирования со своим собственным назначением. Однако впоследствии стало ясно, что постоянная времени дифференцирования является важной степенью свободы, доступной проектировщику.

Один из традиционных путей проектирования ПИД – регулятора – использование эмпирического правила настройки, основанного на измерениях, сделанных на реальном объекте. Однако еще не потеряли актуальность и классические методы настройки. Среди наиболее популярных классических методов настройки можно выделить метод колебаний Зиглера-Никольса (З-Н) и метод Коэна-Куна (К-К).

Метод колебаний З-Н применим только для устойчивых объектов. Авторы стремились получить демпфированную (апериодическую) реакцию на ступеньку для объектов, удовлетворительно описываемых моделью

$$W_0(S) = \frac{K_0 e^{-s\tau_0}}{T_0 s + 1}, \qquad (73)$$

где T_0 – постоянная времени объекта регулирования, K_0 – коэффициент усиления объекта регулирования, τ_0 – время запаздывания.

Многие объекты, особенно используемые в перерабатывающей отраслях промышленности, могут быть удовлетворительно описаны моделью (73).

По мнению Зиглера и Никольса цель проектирования ПИД-регулятора состоит в том, чтобы достичь конкретного демпфирования для переходной характеристики замкнутой системы. Более определенно цель состоит в том, чтобы получить отношение 4:1 для первого и второго максимумов на этой характеристике.

Переходная характеристика системы с ПИД-регулятором, настроенная по методу З – Н, показывает существенную чувствительность результата к отношению постоянной запаздывания к постоянной времени. Чтобы улучшить это ограничение, Коэн и Кун выполнили дополнительные исследования, чтобы найти настройки регулятора для той же модели (73), но такие, чтобы они давали меньшую зависимость от отношения постоянной запаздывания к постоянной времени.

Пусть дан объект регулирования, описываемый передаточной функцией (73). Параметры передаточной функции определяются следующим образом.

Коэффициент усиления

$$K_0 = \frac{y_\infty - y_0}{u_\infty - u_0}.$$

Постоянная времени и время запаздывания соответственно

$$T_0 = t_2 - t_1,\ \tau_0 = t_1 - t_0.$$

Переходный процесс такого объекта будет представлять собой кривую апериодического звена с запаздыванием (рисунок 86).

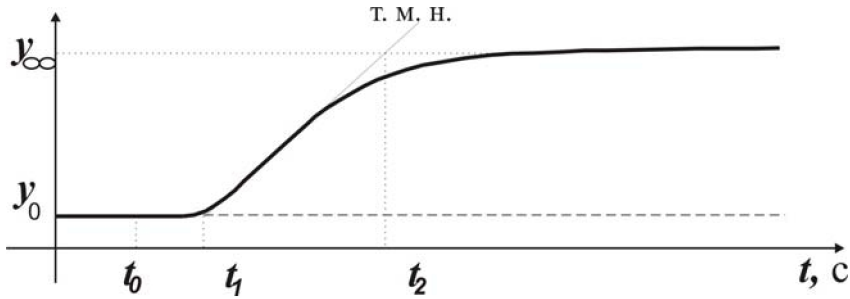


Рисунок 86. Реакция объекта регулирования на ступенчатый сигнал управления

Исходные данные для расчета настроек ПИД-регулятора нужно взять из следующей таблицы (принять $u_\infty - u_0 = 1$).

Исходные данные для расчета настроек ПИД-регулятора

Вариант	y_∞	y_0	t_1	t_0	t_2
1	4	1	2,2	1	4
2	2	1	2	1	2,5
3	2	1	3	1	3,9
4	3	1	2,1	1	3
5	4	1	2	1	3,7

Порядок выполнения работы

1) Сформировать в Simulink модели ПИД-регуляторов с объектами (рисунок 87).

2) Рассчитать настройки ПИД-регулятора по методу Зиглера-Никольса, которые можно узнать из следующей таблицы.

Настройки Зиглера-Никольса при использовании кривой отклика

Вид регулятора	Параметры регулятора		
	K_p	T_i	T_d
П	$\frac{T_0}{K_0\tau_0}$		
ПИ	$\frac{0{,}9T_0}{K_0\tau_0}$	$3\tau_0$	
ПИД	$\frac{1{,}2T_0}{K_0\tau_0}$	$2\tau_0$	$0{,}5\tau_0$

3) Рассчитать настройки ПИД-регулятора по методу Коэна – Куна при использовании кривой отклика по следующей таблице.

Настройки ПИД-регулятора по методу Коэна-Куна при использовании кривой отклика.

Вид регулятора	Параметры регулятора		
	K_p	T_i	T_d
П	$\frac{T_0}{K_0\tau_0}\left[1+\frac{\tau_0}{3T_0}\right]$		
ПИ	$\frac{T_0}{K_0\tau_0}\left[0{,}9+\frac{\tau_0}{12T_0}\right]$	$\frac{\tau_0\left[30T_0+3\tau_0\right]}{9T_0+20\tau_0}$	
ПИД	$\frac{T_0}{K_0\tau_0}\left[\frac{4}{3}+\frac{\tau_0}{4T_0}\right]$	$\frac{\tau_0\left[32T_0+6\tau_0\right]}{13T_0+8\tau_0}$	$\frac{4\tau_0T_0}{11T_0+2\tau_0}$

4) Рассчитать переходные процессы по управляющему воздействию (возмущающее воздействие принять равным нулю) для структурной схемы САР, представленной на рисунке 87.

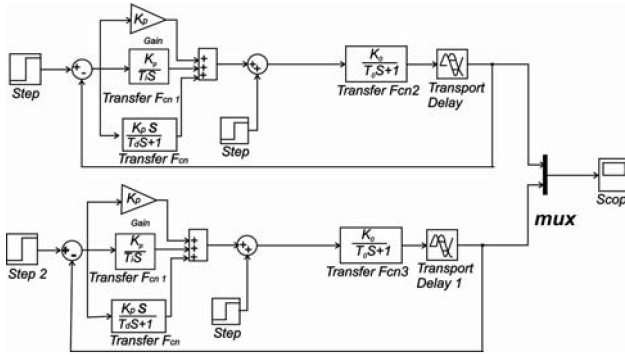


Рисунок 87. Структурная схема САР с обратной связью

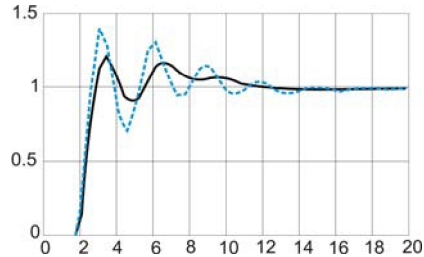


Рисунок 88. Переходные процессы в САР при управляющем воздействии для различных типов настроек. Сплошная линия – настройки методом Зиглера-Никольса, пунктирная – методом Коэна-Куна

5) Установить возмущающее воздействие с запаздыванием в 10 секунд. Рассчитать переходные процессы.

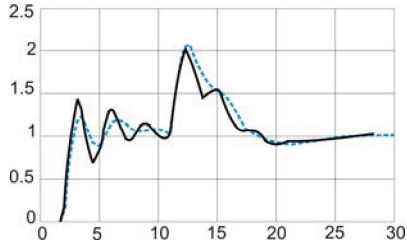


Рисунок 89. Переходные процессы в САР при управляющем и возмущающем воздействии для различных типов настроек. Сплошная линия – настройки методом Зиглера-Никольса, пунктирная – методом Коэна-Куна

Качество переходного процесса оцениваются по трем параметрам:

- колебательность,
- перерегулирование,
- время переходного процесса.

Из рассмотрения графиков, представленных на рисунке 88, видно, что регулятор, настроенный по методу Зиглера – Никольса, дает лучшее качество переходного процесса по всем трем параметрам качества. Однако при отрабатывании возмущающего воздействия (рисунок 89) регулятор, настроенный по методу Коэна – Куна, имеет меньшее перерегулирование.

4.2.2. Исследование автоколебаний в нелинейных системах

Цель работы: изучение метода гармонической линеаризации для расчета параметров автоколебаний; расчет переходных процессов в системах, содержащих нелинейный элемент.

Теоретические основы

САР является нелинейной, если включает в себя хотя бы один элемент с существенно нелинейной характеристикой, которую нельзя линеаризовать методом малых отклонений. Рассмотрим примеры нелинейных элементов. Одним из распространенных нелинейных элементов является звено релейного типа. При непрерывном изменении входной величины происходит скачкообразное изменение выходного сигнала. На рисунках приведены схемы с элементами реле и «насыщение» и графики, поясняющие их работу.

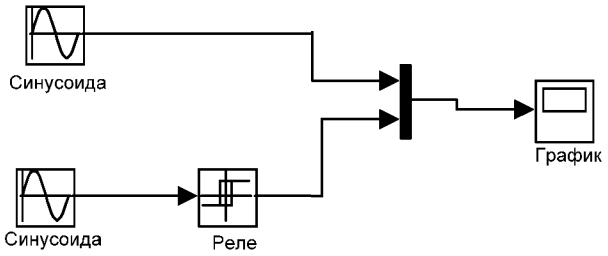


Рисунок 90. Нелинейный элемент: реле

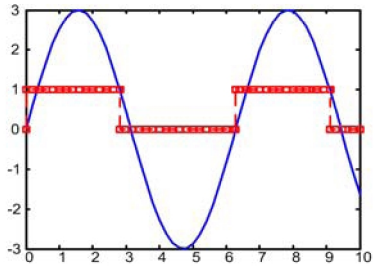


Рисунок 91. Иллюстрация влияния релейного элемента на синусоидальный сигнал

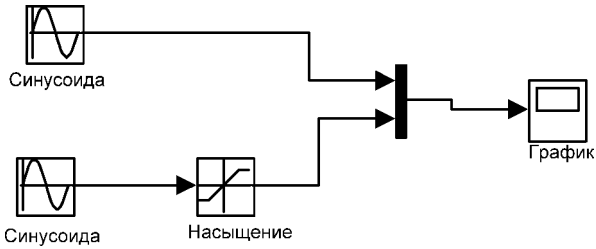


Рисунок 92. Иллюстрация влияния элемента "насыщение" на синусоидальный сигнал

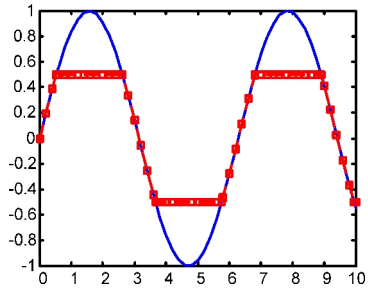


Рисунок 93. Иллюстрация влияния элемента "насыщение" на синусоидальный сигнал

Устойчивость линейной стационарной системы всегда можно исследовать с помощью критерия Рауса-Гурвица, критерия Найквиста или других методов. В отношении же нелинейных систем эти методы оказываются непригодными. Общие аналитические методы анализа устойчивости нелинейных систем еще не разработаны. В каждом конкретном случае инженер должен выбирать тот метод, который в наибольшей степени подходит к анализу рассматриваемой системы. В большинстве случаев устойчивость систем, содержащих нелинейности высокого параметра, поддается исследованию только путем имитационного моделирования.

Применение метода гармонической линеаризации для анализа возможных автоклебаний в нелинейной САР

Рассмотрим применение метода гармонической линеаризации для анализа возможных автоколебаний в нелинейной САР, структурная схема которой представлена на рисунке 94. Нелинейный элемент имеет однозначную релейную характеристику.

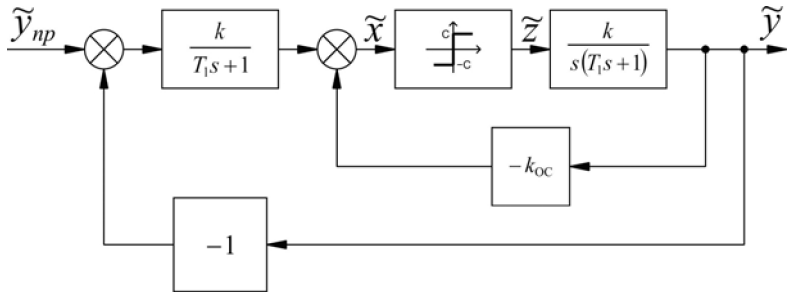


Рисунок 94. Структурная схема САР с релейным нелинейным элементом

Структурную схему на рисунке 94 можно преобразить к виду, удобному для применения метода гармонической линеаризации, т.е. выделив линейный блок и нелинейный элемент (рисунок 95).

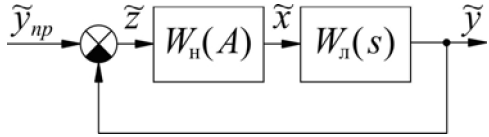


Рисунок 95. Преобразованная структурная схема нелинейной САР

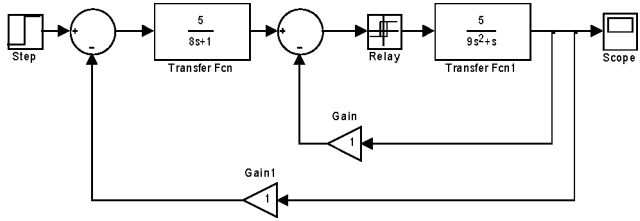


Рисунок 96. Структурная схема САР при моделировании в пакете Simulink

Передаточная функция линейной части САР определяется при предположении, что входным ее параметром является выходной сигнал $\tilde{x}$ нелинейного элемента, а выходным – входной параметр $\tilde{z}$ нелинейного элемента, а $\tilde{y}_{пр} = 0$. Тогда на основании преобразования структурной схемы линейной части САР (рисунок 95) можно определить ее передаточную функцию

$$W_л(s) = \frac{k_2 k_{ос}(T_1 s+1) + k_1 k_2}{s(T_1 s+1)(T_2 s+1)}.$$

Учитывая, что для релейного элемента $W_н(A) = q_1(A)$, определим передаточную функцию замкнутой САР :

$$W_з(s)=\frac{\left[k_2k_{ос}(T_1s+1)+k_1k_2\right]q_1(A)}{s(T_1s+1)(T_2s+1)+\left[k_2k_{ос}(T_1s+1)+k_1k_2\right]q_1(A)},$$

знаменатель которой представляет собой собственный оператор системы

$$D(s)=T_1T_2s^3+\left[1+T_1k_2k_{ос}q_1(A)\right]s+(k_1+k_{ос})k_2q_1(A).$$

Определим амплитуду A_a и частоту ω_a возможных автоколебаний алгебраическим способом. Для этого подставим в собственный оператор $D(s)$ $s=j\omega$ и выделим действительную и мнимую части

$$D(j\omega_a)=\mathrm{Re}\,D(j\omega_a)+j\,\mathrm{Im}\,D(j\omega_a)=0.$$

Здесь

$$\left.\begin{aligned}\mathrm{Re}\,D(j\omega_a)&=(k_1+k_{ос})k_2q_1(A_a)-(T_1+T_2)\omega_a^2=0\\ \mathrm{Im}\,D(j\omega_a)&=\left[1+T_1k_2k_{ос}q_1(A_a)\right]\omega_a-T_1T_2\omega_a^2=0\end{aligned}\right\}. \qquad (74)$$

Из первого уравнения (74) определим выражение для коэффициента линеаризации

$$q_1(A_a)=\frac{(T_1+T_2)\omega_a^2}{(k_1+k_{ос})k_2}, \qquad (75)$$

подставив которое во второе уравнение, находим частоту возможных автоколебаний:

$$\omega_a^2=\frac{k_1+k_{ос}}{T_1(k_1T_2-k_{ос}T_1)}. \qquad (76)$$

Имея в виду, что для релейного элемента $q_1(A)=4C/\pi A_a$, определим из (75) и (76) выражение для расчета амплитуды возможных автоколебаний:

$$A_a=\frac{4Ck_2T_1(k_1T_2-k_{ос}T_1)}{\pi(T_1+T_2)}. \qquad (77)$$

Существенно то, что амплитуда автоколебаний зависит не только от параметров системы, но еще и от величины внешних воздействий. Эта зависимость нелинейная. В данном случае при увеличении внешних воздействий амплитуда уменьшается по закону косинуса, в то время как частота не зависит от внешних воздействий.

Для проверки устойчивости режима автоколебаний определим частные производные:

$$\left.\begin{aligned}
&\frac{\partial \operatorname{Re} D_3}{\partial A_a} = -\frac{4Ck\left(k_1 + k_{oc}\right)}{\pi A_a^2} < 0;\\
&\frac{\partial \operatorname{Re} D_3}{\partial \omega_a} = -2\omega_a\left(T_1 + T_2\right) < 0;\\
&\frac{\partial \operatorname{Im} D_3}{\partial A_a} = \frac{4CT_1k_2k_{oc}\omega_a}{\pi A_a} < 0;\\
&\frac{\partial \operatorname{Im} D_3}{\partial \omega_a} = -2\mathrm{T}_1T_2\omega_a^2 < 0.
\end{aligned}\right\} \qquad (78)$$

Для реализации режима автоколебаний в нелинейной САР необходимо, чтобы выполнялось неравенство (79):

$$\frac{\partial \operatorname{Re} D_3}{\partial A_a} \cdot \frac{\partial \operatorname{Im} D_3}{\partial \omega_a} - \frac{\partial \operatorname{Re} D_3}{\partial \omega_a} \cdot \frac{\partial \operatorname{Im} D_3}{\partial A_a} > 0, \qquad (79)$$

$$k_1T_2 - k_{\mathrm{OC}}T_1 > 0.$$

Порядок выполнения работы

1. Рассчитать амплитуду и частоту автоколебаний методом гармонической линеаризации.

2. Построить структурную схему, представленную на рисунке 96, в пакете Simulink и получить переходную характеристику.

3. Сравнить значения частоты и амплитуды автоколебаний, рассчитанные методом гармонической линеаризации и моделированием в пакете Simulink.

4. Устранить автоколебания, изменяя исходные данные. Значения коэффициентов приведены в таблице.

Вариант		**1**	**2**	**3**	**4**	**5**	**6**
Коэффициент	K_1	5	1	3	10	2	1
	K_2	5	6	1	3	2	3
	T_1	8	0.08	2	5	3	0.6
	T_2	9	1	9	5	8	2
	$k_{\text{о.с.}}$	1	8	5	9	5	6
	c	2	9	9	8	8	10

4.3. Моделирование процессов управления в цифровых технических системах

4.3.1. Исследование устойчивости цифровых систем

Цель работы: исследовать устойчивость цифровой системы [12].

Теоретические сведения

Для того чтобы цифровая система была устойчива, необходимо и достаточно, чтобы корни характеристического уравнения лежали в окружности единичного радиуса.

Характеристическое уравнение: $a_0 z^k + a_1 z^{k-1} + \ldots + a_k = 0$.

Условие устойчивости: $\left| z^{r_i} \right| < 1, i = 1, \ldots, k$.

Для комплексных корней условие устойчивости: $\sqrt{U_{z_i}^2 + V_{z_i}^2} < 1$, где

U_{z_i} – действительная часть корня; V_{z_i} – мнимая часть корня.

Если передаточная функция непрерывной части содержит колебательное или консервативное звено, постоянная времени которых больше периода квантования по времени, между моментами замыкания в системе возникают высокочастотные колебания, которые расходятся (скрытая неустойчивость). Чтобы избежать этого, необходимо выполнение условия:

$$\frac{1}{T_i}\sqrt{1-\zeta_i} \le \frac{\pi}{T_0},$$

где T_i – постоянная времени, ζ_i – параметр затухания.

При выполнении предыдущего анализа устойчивости и разработке цифровой системы считается верным неравенство

$$W_p(z, \varepsilon) \le W_{\text{ПНЧ}}(z, \varepsilon).$$

4.3.2. Алгоритмы решения задачи исследования устойчивости

4.3.2.1. Непосредственное вычисление корней характеристического уравнения

Находим передаточную функцию ПНЧ: $W_{\text{пнч}}(z, \varepsilon)$.

Переходим к передаточной функции разомкнутой системы: $W_{\text{р}}(z, \varepsilon)$.

Определяем передаточную функцию замкнутой системы: $W_з(z,\varepsilon)=\dfrac{W_p(z)}{1+W_p(z)}$, когда τ=0; $W_з(z,\varepsilon)=\dfrac{W_p(z,\varepsilon)}{1+W_p(z,0)}$, когда τ≠0.

Решаем характеристическое уравнение и, используя условие устойчивости, делаем вывод об устойчивости системы.

4.3.2.2. W – преобразование.

Находим передаточную функцию ПНЧ: $W_{\text{пнч}}(z, \varepsilon)$.

Переходим к передаточной функции разомкнутой системы: $W_р(z, \varepsilon)$, и передаточной функци замкнутой системы $W_з(z, \varepsilon)$.

Используется подстановка $z=\dfrac{1+w}{1-w}$ в характеристическое уравнение замкнутой системы. Определяется характеристическое уравнение вида

$$b_0 w^n + b_1 w^{n-1} + \ldots + b_n = 0 .$$

К характеристическому уравнению применяется, например, критерий Гурвица.

4.3.2.3. Критерий Гурвица.

Для характеристического уравнения

$$a_0 p^n + a_1 p^{n-1} + \ldots + a_{n-1} p + a_n = 0$$

составим квадратную матрицу коэффициентов, содержащую n строк и n столбцов:

$$\begin{bmatrix} a_1 & a_3 & a_5 & \ldots & 0 & 0 \\ a_0 & a_2 & a_4 & \ldots & 0 & 0 \\ 0 & a_1 & a_3 & \ldots & 0 & 0 \\ 0 & a_0 & a_2 & \ldots & 0 & 0 \\ \ldots & \ldots & \ldots & \ldots & \ldots & \ldots \\ 0 & 0 & 0 & \ldots & a_{n-1} & 0 \\ 0 & 0 & 0 & \ldots & a_{n-2} & a_n \end{bmatrix}$$

Эта таблица составляется следующим образом.

По диагонали от левого верхнего до правого нижнего углов выписываются все коэффициенты по порядку от a_1 до a_n. Каждая строка дополняется коэффициентами с возрастающими индексами слева направо так,

чтобы чередовались строки с нечетными и четными индексами. В случае отсутствия данного коэффициента, а также если индекс его меньше нуля или больше n, на месте его пишется нуль.

Критерий устойчивости сводится к тому, что при $a_0 > 0$ должны быть больше нуля все n определителей Гурвица, получаемых из квадратной матрицы коэффициентов [12].

Частные случаи критерия:

1. Уравнение первого порядка $a_0 p + a_1 = 0$. Критерий Гурвица дает $a_0 > 0, a_1 > 0$.
2. Уравнение второго порядка $a_0 p^2 + a_1 p + a_2 = 0$. Критерий Гурвица требует $a_0 > 0, a_1 > 0, a_2 > 0$.
3. Уравнение третьего порядка, критерий Гурвица: $a_0 > 0, a_1 > 0, a_1 a_2 - a_0 a_3 > 0$.

4.3.2.4. Частотные методы

Определяется передаточная функция ПНЧ: $W_{\text{пнч}}(z, \varepsilon)$.

Определяется передаточная функция разомкнутой системы: $W_p(z, \varepsilon)$.

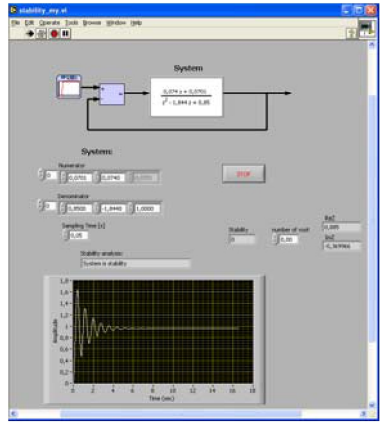
Строится АФЧХ разомкнутой системы от относительной или абсолютной псевдочастоты $W_p(j\lambda)$, $W_p(j\lambda^*)$.

Определяется число полюсов передаточной функции W_p, которые лежат за кругом единичного радиуса.

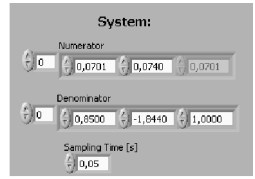
По графику АФЧХ определяется устойчивость замкнутой системы по критерию Найквиста: замкнутая система является устойчивой, если АФЧХ разомкнутой системы при изменении λ или λ^* от 0 до ∞ охватывает точку $(1, j0)$ $m/2$ раз, где m – число корней, которые лежат за кругом единичного радиуса.

Программа выполнения работы:

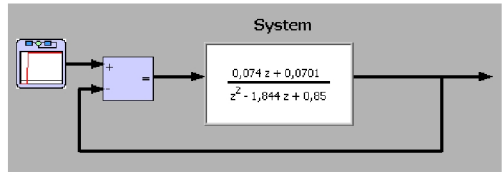
1. Исходный файл для выполнения работы *L10_Исследование устойчивости ЦС.vi*.



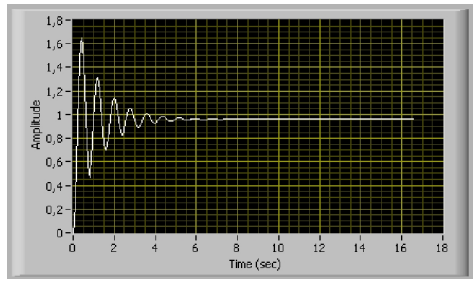
2. Введите в группе «System» исследуемую передаточную функцию и время квантования:



3. Модель системы будет иметь вид



4. По полученной переходной характеристике можно сделать вывод об устойчивости системы:





Система устойчива.

4.3.3. Дискретный ПИД-регулятор скорости движения автомобиля

Цель работы: проектирование ПИД-регулятора скорости автомобиля.

Теоретические сведения

Дискретно-непрерывные системы включают элементы как дискретных, так и непрерывных систем. Моделирование таких систем также можно произвести с использованием Simulink.

Чтобы показать построение дискретно-непрерывной системы, заменим в предыдущем примере непрерывный регулятор на цифровой пропорционально - интегрально - дифференциальный (ПИД) регулятор с периодом квантования 0.5 с.

На рисунке 97 показан непрерывный ПИД-регулятор. Он состоит из трех каналов, каждый из которых имеет входной сигнал v в виде разности между выходной переменной блока Plant и сигналом Command output. Регулятор пропорционального действия формирует выходную переменную, которая пропорциональна сигналу v и равна:

$$u_p = K_p v.$$

Интегральная составляющая ПИД-регулятор связана с точностью САУ в установившемся режиме и формирует выходную переменную в виде

$$u_i = K_i \int_0^t v dt.$$

Для интегральной составляющей ПИД-регулятор можно сделать следующее замечание. В случае медленной реакции блока Plant на изменение входной переменой, v переменная u_i может иметь значительную амплитуду (это явление называется раскачиванием). Зачастую этого можно избежать, задав ограничение в виде максимального и минимального значения для переменой u_i.

Дифференциальная составляющая ПИД-регулятор обеспечивает опережение по фазе. Выходная переменная этой составляющей пропорциональна величине скорости изменения переменной v:

$$u_d = K_d \dot{v}.$$

В дискретном ПИД-регуляторе интегральная составляющая определяется в результате численного интегрирования (блок Discrete-Time Integrator), а дифференциальная – разностной аппроксимацией производной функции (блок Derivative). Левая разностная производная функции $u_d(k)$, которая имеет первый порядок аппроксимации, в точке k равна

$$u_d(k) \approx \frac{v(k) - v(k-1)}{T}.$$

Передаточная функция в Z-преобразованиях записывается в виде

$$\frac{U_d(z)}{V(z)} = \frac{K_d}{T}\left(\frac{z-1}{z}\right).$$

На рисунке 97 показана модель системы Simulink для автомобиля с дискретным ПИД-регулятором, параметры которого имеют следующие значения: $K_p = 50$, $K_i = 0.75$, $K_d = 75$. Интегральная составляющая ПИД-регулятора состоит из блоков Discrete-Time Integrator и Gain (имя блока K_i, значение коэффициента интегральной составляющей равно 0.75). Для предотвращения нежелательного эффекта раскачивания системы, в свойствах блока Discrete-Time Integrator, при установленном флажке **Limit output** в текстовых полях **Upper saturation limit** и **Lower saturation limit** установить значения 100 и −100 соответственно. Дифференциальная составляющая регулятора построена с использованием блоков Discrete Transfer Fcn и Gain. В этом примере конечное время моделирования равняется 20 с, а параметр блока Slider Gain,определяющий величину поддерживаемой скорости, имеет значение 80 м/с. Результат моделирования показан на рисунке 99.

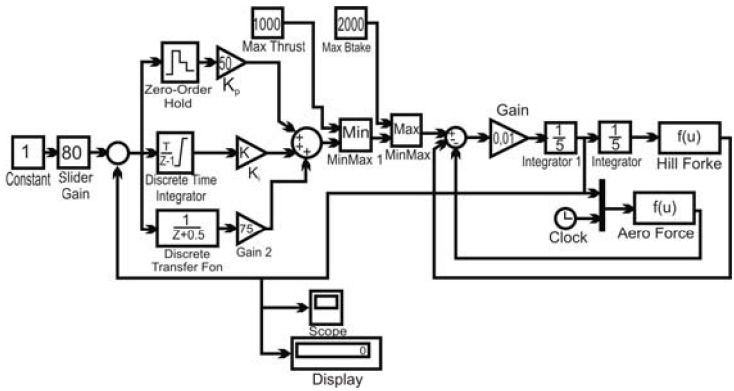


Рисунок 97. Структурная схема системы управления скоростью движения автомобиля с дискретным регулятором

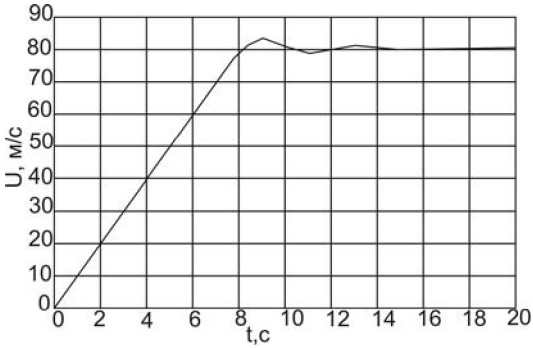


Рисунок 98. Переходная характеристика системы управления автомобилем с дискретным регулятором

Исходные данные

Вариант	K_p	K_i	K_d
1	50	0.75	75
2	100	0.9	5
3	45	10	50
4	1	0.1	150
5	50	25	100

4.3.4. Проектирование цифрового ПИД – регулятора

Цель работы: освоить алгоритм построения цифрового ПИД – регулятора.

Теоретические сведения

Аналогично непрерывным системам в цифровых используются цифровые ПИД – регуляторы со структурной схемой.

Передаточную функцию можно переписать в виде

$$W_{ПИД}(z) = K_p + \frac{K_i T_0 (z+1)}{2(z-1)} + \frac{K_д (z-1)}{T_0 z} =$$

$$= \frac{(K_i T_0^2 + 2K_д + 2K_p T_0) z^2 + (K_i T_0^2 - 2K_p T_0 - 4K_д) z + 2K_д}{2T_0 z (z-1)},$$

где T_0 – период квантования, K_i, $K_д$ и K_p – параметры интегральной, дифференциальной и пропорциональной составляющих закона регулирования.

Тогда передаточная функция разомкнутой системы с корекцией будет иметь вид

$$W_{ск}(z) = W_{ПИД}(z) \cdot W_{ПНЧ}(z) =$$

$$= \frac{(K_i T_0^2 + 2K_д + 2K_p T_0) z^2 + (K_i T_0^2 - 2K_p T_0 - 4K_д) z + 2K_д}{2T_0 z(z-1)} \times$$

$$\times W_{ПНЧ}(z),$$

где $W_{ПНЧ}(z) = \dfrac{K(z+A)}{(z-z_1)(z-z_2)}$, K, A, z_1, z_2 – цифровые значения конкретной системы.

Для того чтобы синтезировать ПИД – регулятор, необходимо найти три параметра K_i, $K_д$ и K_p.

Алгоритм решения задачи синтеза цифровой системы

Определение интегральной составляющей K_i.

Для определения K_i используем выражение для коэффициента ошибки по скорости:

$$K_v = \frac{1}{T_0} \lim_{z \to 1} (z-1) W_{ск}(z). \qquad (80)$$

K_v определяем самостоятельно (K_v = 3÷8). K_v определяется только коэффициентом K_i и параметрами управляемого процеса и зависит от $K_д$ и K_p.

Замечание: для того чтобы выражение (80) было справедливо, необходимо, чтобы функция, которая входит под знак lim, не имела полюсов на единичном круге.

Определение коэффициентов $K_д$ и K_p. Выбирая два нуля регулятора так, чтобы они компенсировали полюсы процесса, получаем:

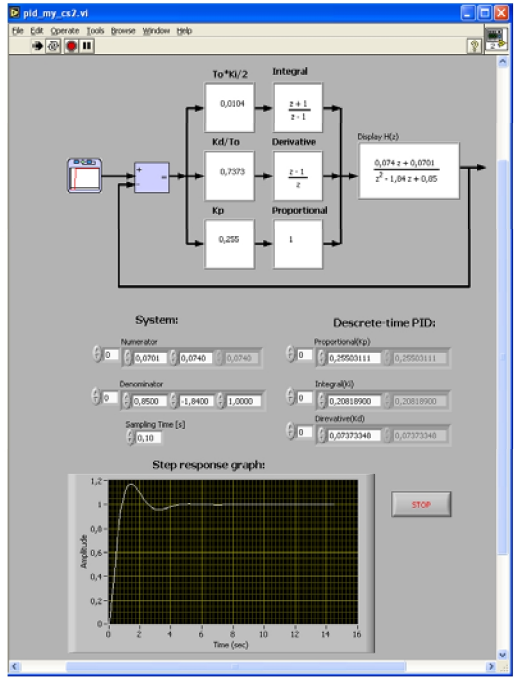
$$z^2 + \frac{K_i T_0^2 - 2K_p T_0 - 4K_д}{K_i T_0^2 + 2K_д + 2K_p T_0} z + \frac{2K_д}{K_i T_0^2 + 2K_д + 2K_p T_0} = \qquad (81)$$

$$= (z - z_1)(z - z_2) = z^2 - z(z_1 + z_2) + z_1 z_2.$$

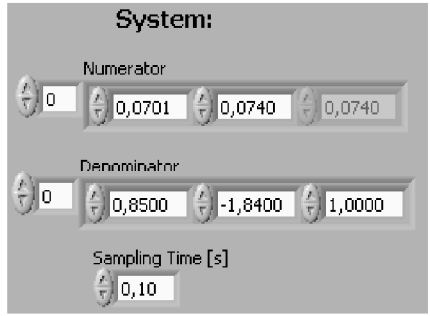
Приравнивая коэффициенты при одинаковых степенях z, получаем систему уравнений, с которой находим коэффициенты $K_д$ и K_p.

Программа выполнения работы:

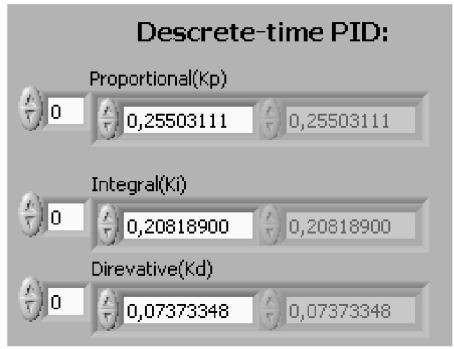
1. Исходный файл для выполнения работы *L11_Проектирование цифрового ПИД регулятора.vi*.



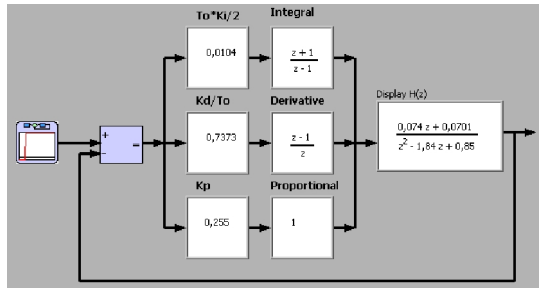
2. Введите в группе «System» исследуемую передаточную функцию и время квантования:



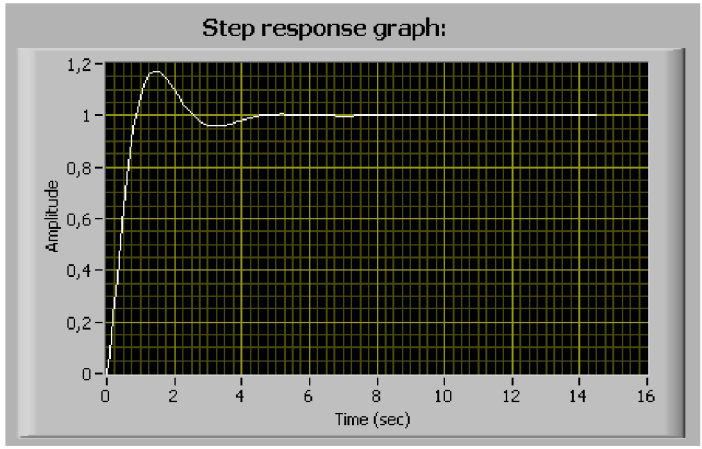
3. Используя теоретические сведенья, рассчитать коэффициенты при интегральной, дифференциальной и пропорциональной составляющих ПИД-регулятора. Результаты записать в группу «Descrete-time PID»:



4. Модель исследуемой системы с регулятором будет иметь вид



5. В результате действия регулятора переходная характеристика системы будет соответствовать заданным распределениям корней системы:



Библиографический список

1. Бесекерский В.А., Попов Е.П. Теория автоматического управления / Изд. 4-е, перераб. и доп. – СПб.: "Профессия", 2003. - 752 с. (Серия Специалист)
2. Иващенко Н.Н. Автоматическое регулирование. – М.: Машиностроение, 1978. – 736 с.
3. Попов Е.П. Теория линейных систем автоматического регулирования и управления. – М.: Наука, 1978. – 256 с.
4. Бахвалов Н.С. Численные методы (анализ, алгебра, обыкновенные дифференциальные уравнения). – М.: Наука, 1975. – 632 с.
5. Практикум пользователя пакетом прикладных программ МВТУ / Сост. О.С. Козлов. – М.: МГТУ, 2002. – 36 с.
6. Гимадиев А.Г., Конев А.Г., Прокофьев А.Б. Динамические характеристики систем автоматического регулирования: Учеб. пособие – Самара: СГАУ, 2002 - 44 с.
7. Попов Д.Н. Динамика и регулирование гидро- и пневмосистем. – М.: Машиностроение, 1977. – 424 с.
8. Автоматика двигателей летательных аппаратов: Учебное пособие / Под ред. В.П. Шорина. – Куйбышев: КуАИ, 1978. – 68 с.
9. Автоматика и регулирование авиационных двигателей и энергетических установок. Ч. 1. Теория автоматического управления. Линейные системы: Учебное пособие / А.Г. Гимадиев, и др. – Самара: СГАУ 2002, - 139 с.
10. Дьяконов В. Simulink 4. Специальный справочник. – СПб: Питер, 2002. – 528 с. ил.
11. Использование виртуальных инструментов LabVIEW Под ред. К.С. Демирчяна и В.Г. Миронова. – М.: Солон-Р, Радио и связь, Горячая линия — Телеком, 1999. — 268 с.
12. Методические указания к выполнению лабораторных работ по курсу "ТАУ" в программном пакете LabVIEW: Учеб. пособие. - Киев: НТУУ "КПИ", 2006.
13. W.A.Gardner. Introduction to random processes. New York: Macmillan, 1986.
14. R.F.Wiggington. "Evaluation of OPS-II Operation Program for the Automatic Carrier Landing System". Naval Electronic System Test and Evaluation Facility, Saint Inigoes, MD, 1971.
15. R.E.Wheeler "A Digital Control for Plant Growth Chambers". MS thesis, Auburn University, Auburn, AL, 1980.
16. J.D.Irwin. Basic Engineering Circuit Analysis, 5th ed. Upper Saddle River, NJ: Prentice Hall, 1996.

17. M.E.El-Hawary. Control System Engineering. Reston, VA: Reston Publishing Company, 1984.
18. W.A.Blackwell and L.L.Grigsby. Introductory Network Theory. Boston: PWS Engineering, 1985.
19. "Centennial Hall of Fame", IEEE Spectrum, April, 1984.

Учебное издание

Иголкин Александр Алексеевич,
Илюхин Владимир Николаевич,
Игонин Андрей Александрович,
Быстров Николай Дмитриевич,
Гимадиев Асгат Гатьятович

Моделирование процессов управления в технических системах

Учебное пособие

Редакторская обработка Т. К. Кретинина
Компьютерная верстка А. А. Игонин
Доверстка

Подписано в печать _____ г. Формат 60x84 1/16
Бумага офсетная. Печать офсетная.
Усл. печ. л. 10,5. Уч-изд. л. 10,6. Печ л.11,25.
Тираж 50 экз. Заказ ИП-34/2006

Самарский государственный
аэрокосмический университет.
Самара 443086, Московское шоссе, 34.

Изд-во Самарского государственного
аэрокосмического университета.
Самара 443086, Московское шоссе, 34.