

**ФЕДЕРАЛЬНОЕ ГОСУДАРСТВЕННОЕ БЮДЖЕТНОЕ ОБРАЗОВАТЕЛЬНОЕ
УЧРЕЖДЕНИЕ ВЫСШЕГО ОБРАЗОВАНИЯ
«ОРЕНБУРГСКИЙ ГОСУДАРСТВЕННЫЙ АГРАРНЫЙ УНИВЕРСИТЕТ»**

**МЕТОДИЧЕСКИЕ УКАЗАНИЯ ДЛЯ ОБУЧАЮЩИХСЯ
ПО ОСВОЕНИЮ ДИСЦИПЛИНЫ**

Б1.В.09 Основы теории управления

Направление подготовки (специальность) 09.03.01 Информатика и вычислительная техника

Профиль образовательной программы Автоматизированные системы обработки информации и управления

Форма обучения Очная

СОДЕРЖАНИЕ

1.	Конспект лекций	3
1.1	Лекция № 1,2 Фундаментальные принципы управления.....	3
1.2	Лекция № 3 Математические модели систем управления.....	11
1.3	Лекция №4 Типовые динамические звенья и структурные схемы.....	18
1.4	Лекция №5 Методы анализа и синтеза систем управления.....	27
1.5	Лекция №6 Качество процессов регулирования в системах управления.....	36
1.6	Лекция №7 Синтез линейных систем управления.....	43
1.7	Лекция №8 Нелинейные и цифровые системы управления.....	51
2.	Методические материалы по проведению практических занятий	64
2.1	Практическое занятие № ПЗ-1,2,3 Знакомство с интерфейсом и принципами построения моделей в программном комплексе «МВТУ».....	64
2.2	Практическое занятие № ПЗ-4,5 Исследование динамических свойств типовых динамических звеньев.....	68
2.3	Практическое занятие № ПЗ-6,7 Моделирование и исследование структурных схем вход-состояние-выход.....	87
2.4	Практическое занятие № ПЗ-8,9 Расчет устойчивости систем управления.....	91
2.5	Практическое занятие № ПЗ-10,11 Расчет качества управления	94
2.6	Практическое занятие № ПЗ-12,13,14 Моделирование СУ с использованием блока «Язык программирования» (МВТУ).....	104
2.7	Практическое занятие № ПЗ-15,16,17 Анализ систем управления с ЭВМ в качестве управляющего устройства.....	111

1. КОНСПЕКТ ЛЕКЦИЙ

1.1 Лекция №1,2 (4 часа).

Тема: «Фундаментальные принципы управления»

1.1.1 Вопросы лекции:

1. Введение в дисциплину.
2. Основные понятия систем управления (СУ).
3. Принципы управления и классификация СУ.
4. Функционально необходимые элементы типовой СУ.

1.1.2 Краткое содержание вопросов:

1. Введение в дисциплину.

Теория автоматического управления (ТАУ) появилась во второй половине 19 века сначала как теория регулирования. Широкое применение паровых машин вызвало потребность в регуляторах, то есть в специальных устройствах, поддерживающих устойчивый режим работы паровой машины. Это дало начало научным исследованиям в области управления техническими объектами. Оказалось, что результаты и выводы данной теории могут быть применимы к управлению объектами различной природы с различными принципами действия. В настоящее время сфера ее влияния расширилась на анализ динамики таких систем, как экономические, социальные и т.п. Поэтому прежнее название “Теория автоматического регулирования” заменено на более широкое - “Теория автоматического управления”.

Управление каким-либо объектом (объект управления будем обозначать ОУ) есть воздействие на него в целях достижения требуемых состояний или процессов. В качестве ОУ может служить самолет, станок, электродвигатель и т.п. Управление объектом с помощью технических средств без участия человека называется *автоматическим управлением*. Совокупность ОУ и средств автоматического управления называется *системой автоматического управления (САУ)*.

Основной задачей автоматического управления является поддержание определенного закона изменения одной или нескольких физических величин, характеризующих процессы, протекающие в ОУ, без непосредственного участия человека. Эти величины называются *управляемыми величинами*. Если в качестве ОУ рассматривается хлебопекарная

печь, то управляемой величиной будет температура, которая должна изменяться по заданной программе в соответствии с требованиями технологического процесса.

2. Основные понятия систем управления (СУ).

Система управления(СУ) организацией включает в себя совокупность всех служб организации, всех подсистем и коммуникаций между ними,а также процессов, обеспечивающих заданное функционирование:

В связи с этим управление организацией можно определить как непрерывный процесс влияния на производительность работника, группы или организации в целом для наилучших результатов с позиций достижения поставленной цели.

Для СУ компанией необходимо:

- разработать миссию компании;
- распределить функции производства и управления;
- распределить задания между работниками;
- организовать порядок и временную последовательность их взаимодействия;
- приобрести или модернизировать технологию производства;
- наладить систему стимулирования, снабжение и сбыт;
- организовать производство.

Осуществление перечисленных мероприятий требует создания системы управления (СУ) компанией, которая должна быть согласована с системой производства компании, представленной на рис. 27.



Рис. 27. Система управления организацией

СУ состоит из четырех подсистем (см. рис. 28):

- § методологии,
- § процесса,
- § структуры
- § техники управления



Рис. 28. Структура элементов системы управления организации

Методология управления включает: цели и задачи, законы и принципы, функции, средства и методы, школы управления.

Процесс управления включает: систему коммуникаций, варианты процесса управления, разработку и реализацию управленческих решений, выбор характеристик информационного обеспечения.

Структура управления включает: функциональные структуры, схемы организационных отношений, организационные структуры и систему обучения или повышения квалификации персонала.

Техника и технология управления включают: компьютерную и организационную технику, офисную мебель, сети связи, систему документооборота.

Процесс управления предусматривает согласованные действия, которые и обеспечивают в конечном счете осуществление общей цели или набора целей, стоящих перед организацией. Для координации действий должен существовать специальный орган, реализующий функцию управления, поэтому в любой организации выделяются управляющая и управляемая части. Схема взаимодействия между ними показана на рис. 29.

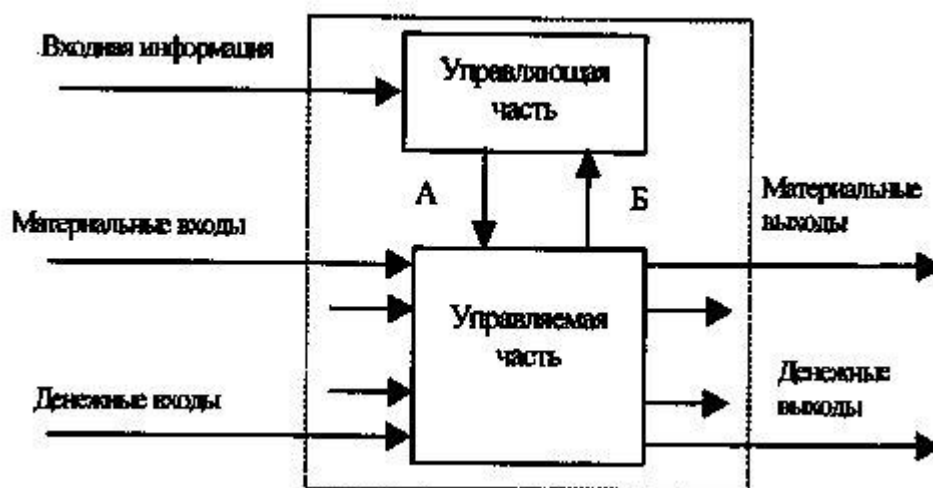


Рис. 29. Взаимодействие управляющей и управляемой частей в организации

А – управляющая информация, Б – информация об исполнении

В управляющую часть входит дирекция, менеджеры и информационные подразделения, обеспечивающие работу руководящего звена. Эту часть организации принято называть административно-управленческим аппаратом. Входным воздействием и конечным продуктом управляющей части является информация.

На этом уровне принимаются управленческие решения как результат анализа, прогнозирования, оптимизации, экономического обоснования и выбора альтернативы из множества вариантов достижения поставленной цели. Управленческое решение принимается с целью преодоления возникшей проблемы, которая представляет собой не что иное, как реальное противоречие, требующее своего разрешения.

Управляемая часть - это различные производственные и функциональные подразделения, занятые обеспечением производственного процесса. То, что поступает на вход управляемой части, и то, что является ее выходом, зависит от типа организации.

Пример. Если речь идет о деловой организации, осуществляющей управление финансами, скажем, о банке, то на его вход поступают денежные средства или их заменители (ценные бумаги, векселя, акции и т.п.). Выходом является информация по управлению финансовыми потоками и денежными средствами. Во многих случаях банк осуществляет выплату наличных денежных средств.

3. Принципы управления и классификация СУ.

Системы управления весьма разнообразны, и их целесообразно разбить на классы. Рассмотрим классификацию систем управления по трем следующим признакам: степень автоматизации функций управления; степень сложности и степень определенности.

В зависимости от степени автоматизации функций управления различают ручное, автоматизированное и автоматическое управление. При ручном управлении все функции процесса выполняются человеком — оператором. *Автоматизированным называют процесс управления, в котором часть функций выполняется человеком, другая часть — автоматическими устройствами.* При автоматическом управлении все функции выполняются автоматическими устройствами. Соответственно принято различать автоматизированные и автоматические системы управления.

По степени сложности системы управления делят на простые и сложные. Строгого определения, позволяющего четко разделить эти системы, не существует. Понятие «сложная система» возникло как отражение факта существования в реальном мире таких объектов, достаточно полное описание которых либо затруднительно, либо совсем невозможно. Интуитивно представление о сложной системе можно получить, рассмотрев свойства систем, состоящих из большого числа элементов.

Пусть система состоит из n элементов. Максимальное число направленных связей между элементами, очевидно, равно $n(n-1)$. Число комбинаций связей (по типу «связь есть», «связь отсутствует») определяется значением $2^{n(n-1)}$. Это значит, что система из трех элементов может иметь число комбинаций связей 64, система из четырех элементов — 4096, а система из десяти элементов — $1,24 \cdot 10^{37}$. Если считать (упрощенно), что состояние системы определяется наличием или отсутствием тех или иных связей в системе, то легко представить, как быстро растет число возможных состояний системы при сравнительно небольшом увеличении количества составляющих ее элементов. Сложной принято называть такую систему, которую трудно или невозможно изучать путем исследования ее всех возможных состояний.

Естественно, такую характеристику сложности нужно рассматривать лишь как ее иллюстрацию. На практике приходится учитывать качественные особенности связей, их существенность и ряд других факторов, которые могут упростить или еще более усложнить исследование системы.

Рассмотрим теперь понятие сложной системы управления. Как следует из выражения (1.4), управляющее воздействие есть функция состояния объекта управления, т. е. каждому состоянию объекта управления должно соответствовать определенное состояние управляющего органа. Это значит, что управляющий орган должен обладать не меньшим числом возможных состояний, чем объект управления. Следовательно, управляющий орган для эффективного управления должен быть такой же сложности, как и объект управления. Когда объектом управления является сложная система, управляющий орган тоже представляет

собой сложную систему. Совокупность сложного управляющего органа и сложного объекта управления называют *сложной системой управления*.

Сложные системы управления имеют следующие важные особенности:

1. Число параметров, которыми описывается сложная система, весьма велико. Многие из этих параметров не поддаются количественному описанию и измерению,

2. Цели управления не поддаются формальному описанию без существенных упрощений. Цели являются функциями времени. Система может состоять из подсистем, каждая из которых имеет собственную цель управления. В процессе управления собственные (локальные) цели подсистем нужно согласовывать с общей (глобальной) целью системы, что, как правило, является сложной задачей.

3. Трудно или даже невозможно дать строгое формальное описание сложной системы управления. Как правило, основной задачей при моделировании таких систем является поиск разумного упрощения их описания.

По степени определенности системы управления обычно разбивают на детерминированные и вероятностные (стохастические).

Детерминированной системой называют систему, в которой по ее предыдущему состоянию и некоторой дополнительной информации можно безошибочно (т. е. вполне определенно) предсказать ее последующее состояние.

В вероятностной системе на основе предыдущего состояния и дополнительной информации можно предсказать лишь множество возможных будущих состояний и определить вероятность каждого из них.

Разбиение систем на простые и сложные, детерминированные и вероятностные в определенной мере условно. По мере развития средств моделирования и исследования конкретная реальная система может перейти из одного класса в другой. В результате использования двух последних классификационных признаков все системы управления можно разделить на четыре категории: простые детерминированные; сложные детерминированные; простые вероятностные; сложные вероятностные.

К числу *простых детерминированных систем* относится, например, автопилот. Примером *сложной детерминированной системы* служит ЭВМ. Этот весьма сложный прибор, включающий большое количество элементов и имеющий огромное число возможных состояний, является все же полностью детерминированным устройством. Поведение ЭВМ определяется совокупностью программ, которые она выполняет. Отклонение от поведения, предписанного программами, означает неисправность.

Простой вероятностной системой можно назвать систему статистического контроля качества продукции предприятия по одному или нескольким параметрам, которая

предусматривает выборочную проверку заданных параметров с определенной периодичностью. *Сложной вероятностной системой* являются производственное предприятие, крупная строительная организация, отрасль промышленности и подобные им объекты.

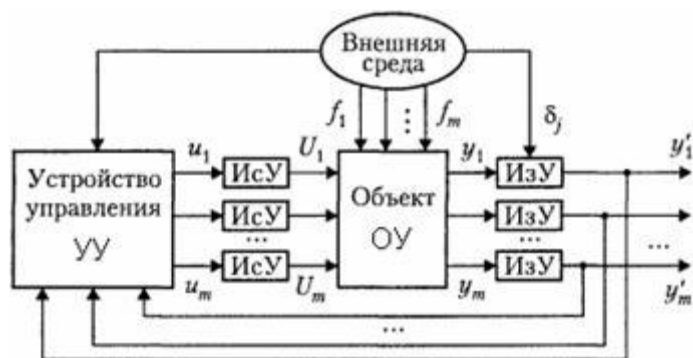
Число элементов, разнообразие связей, вероятностная природа законов функционирования делает эти системы настолько сложными, что их полное формальное описание не представляется возможным. Потребность в управлении сложными системами привела к созданию специальных методов.

В последние годы в большинстве работ, посвященных исследованию общих принципов управления, используется *методология системного анализа*. Системный анализ позволяет исследовать различные по своей природе объекты с единой точки зрения. В основу методологии системного анализа положены такие понятия, как «система», «сложная система», «иерархия систем», «модель», «цель» и др. Определение этих понятий, а также некоторые принципы системного анализа изложены в объеме, необходимом для понимания последующего материала. Однако для современного специалиста требуется более глубокое знание методологии системного анализа.

4. Функционально необходимые элементы типовой СУ.

Система автоматического управления содержит следующие компоненты, обеспечивающие ее функционирование: объект управления ОУ (управляемый процесс); исполнительные устройства ИСУ; измерительные устройства ИЗУ; устройство управления УУ.

Объектами управления технических систем служат кинематические механизмы, электрические системы, тепловые, химические и другие технологические процессы. Состояние объекта характеризуется переменными состояния, к которым относятся угловые и линейные координаты, скорости и другие механические переменные, описывающие движения кинематических механизмов; токи или напряжения электрических элементов схемы; температуры и плотности веществ в тепловых и химических процессах, и любые другие физические величины. Переменные состояния объединяются в вектор состояния.



К регулируемым, или выходным, переменным $u_j = y_j(t)$ относятся переменные ОУ, по отношению к которым формулируется основная задача управления. Выходные переменные объединяются в вектор выхода. Для кинематических механизмов вектор выхода обычно представлен декартовыми координатами рабочей точки механизма.

Входами ОУ являются управляющие органы, к которым прикладываются воздействия U_j исполнительных устройств ИСУ системы. Это входные оси кинематических механизмов, входные схемы электрических систем, нагревательные элементы и вентили тепловых и химических процессов, к которым приложены силы или моменты сил электроприводов, электрические напряжения и т. д., вызывающие движение (развитие) управляемого процесса.

Объекты с одним входом и одним выходом называются одноканальными. К многоканальным относят объекты с несколькими входами и/или выходами. Они могут иметь каналы, независимые или взаимозависимые друг от друга (многосвязные объекты).

К внешней среде системы управления относятся процессы, оказывающие влияние на поведение управляемого объекта. Среда является источником помех измерения $d_j(t)$, возмущающих воздействий $f_j(t)$, внешних задающих воздействий.

К возмущающим относят воздействия, препятствующие функционированию объекта. Это могут быть силы сопротивления или трения для кинематических механизмов, температура окружающей среды для тепловых процессов и т. д. Возмущающие воздействия объединяются в вектор возмущений.

Измерительные устройства ИЗУ (датчики) предназначены для получения информации об объекте и внешней среде (сигналов y'_j), т. е. для электрического измерения выходных переменных, переменных состояния и внешних задающих воздействий. Различают следующие типы измерительных устройств:

- датчики внутренней информации, предназначенные для измерения переменных объекта (системы управления);
- датчики внешней информации (сенсоры, средства внешнего контроля) - измерители состояния внешней среды либо положения объекта по отношению к внешним объектам.

В состав измерительных устройств часто включают также вычислительные блоки, осуществляющие первичную обработку информации.

Исполнительные устройства ИСУ - это устройства, предназначенные для усиления маломощных управляющих сигналов u_j и создания энергетических воздействий U_j на входах объекта, т. е. управляемые источники механической, электрической или тепловой энергии (электропривод, преобразователь электрической энергии в механическую, и т.п.).

Устройство управления УУ - это блок, обрабатывающий полученную с помощью измерителей текущую информацию о состоянии объекта и внешней среды и формирующий

управляющие воздействия u_j (информационные сигналы), поступающие на исполнительные устройства объекта. В функции устройства управления входит:

- идентификация объекта и среды (анализ их текущего состояния и параметров);
- генерация внутренних задающих воздействий;
- расчет управляющих воздействий u_j по предписанным формулам (алгоритмам).

1.2 Лекция №3 (2 часа).

Тема: «Математические модели систем управления»

1.2.1 Вопросы лекции:

1. Математические модели объектов и СУ.
2. Формы представления моделей.
3. Математическое описание СУ во временной и частотной областях.
4. Метод пространства состояний.

1.2.2 Краткое содержание вопросов:

1. Математические модели объектов и СУ.

Моделирование объектов и систем управления начинается с их выделения из окружающей среды, что всегда приводит к изучению принципов, т.к. в природе всё является взаимосвязанным и взаимообусловленным. Для объяснения состояния и поведения объектов и систем управления вводят математические модели. Взаимодействие системы со средой можно представить в виде системы разорванных причинно-следственных связей. В теории и расчётной практике объектами исследования оказываются три вида моделей: Системы без связей со средой. СУ- модель СУ без связей со средой Системы со связями со средой. Модели расширенных систем. На содержательном уровне объекты управления и системы управления интегрируются как устройства получения, передачи и обработки информации. С другой стороны объекты управления и системы управления можно рассматривать преобразователями сигналов этой информации. $y(t) = Q\{f(t)\}$ Объект управления или система управления характеризуется множеством переменных вместе с отношениями между ними. $Q(\dots(n), (n)) = 0$ В зависимости от классов объектов и систем управления оператор может быть линейным или нелинейным. Для линейного оператора выполняется принцип суперпозиции, однородности и аддитивности. $Q\{ * f(t)\} = * \{f(t)\}$ $Q\{f_1(t) + f_2(t)\} = Q\{f_1(t)\} + Q\{f_2(t)\}$ $Q\{i * f_i(t)\} = i Q\{f_i(t)\}$ Если же эти принципы не выполняются, то оператор является нелинейным. Класс нелинейных операторов намного шире класса линейных. Модель объекта или системы управления принадлежит тому же классу, что и описывающий их оператор преобразования. Можно выделить следующие классы моделей и операторов:

Линейные Л и нелинейные Стационарные С и нестационарные Детерминированные Д и

недетерминированные Сосредоточенные (конечномерные) К и распределённые (бесконечномерные) Эти четыре признака бинарные, поэтому можно насчитать 16 классов непрерывных систем и 16 классов дискретных. Простейший класс – 1 уровень. (Одно отрицание) ЛСКД – имеет мощный математический аппарат для анализа и синтеза СУ. – существует незначительное число общих методов аналитического исследования. В основном методы анализа и синтеза рассчитаны для частных случаев. 2-й уровень – 2 отрицания 3-й уровень – 3 отрицания 4-й уровень – 4 отрицания Системы второго и выше уровней можно исследовать только путём вычислительных экспериментов с помощью компьютерной обработке информации. Среда на входе системы моделируется автономными системами, генераторами воздействий. (t) , $1(t)$, Данная схема справедлива только для детерминированных систем. А для случайных систем справедливы случайные сигналы типа белого шума. Модели строятся для строго оговоренных взаимодействий. Линейные модели строят для малых отклонений переменных от установившихся режимов. Иногда область адекватности ограничена малыми амплитудами входных воздействий, для которых следует учитывать: зону неустойчивости, сухое трение и т.д. Границу адекватности можно изобразить на плоскости амплитуд и частот воздействий. Таким образом, модель оказывается не полностью определённой. При интерпретации моделей анализа и синтеза необходимо иметь это в виду и учитывать ограничения области адекватности.

2. Формы представления моделей.

В зависимости от характера и объёма информации об исследуемом объекте выделяют два способа построения модели : Аналитический способ Экспериментальный способ Аналитический способ Аналитический способ применяется для построения моделей объектов хорошо изученной природы. В результате идеализации физических свойств объекта можно изобразить строение модели в виде схемы. Подобные схемы являются моделями в которых информация об объекте управления представлена в наглядной форме с изображением графических образов, отображающих физическую природу, устройство и параметры объекта. С такими моделями работают электротехника, электроника и т.п. Аналитический способ моделирования в теории управления складывается из двух этапов : Построение схемы объекта Преобразование схемы в математическое описание, требуемой для исследования формы. При этом принципиальные решения производятся на первом этапе. Второй этап – это процедура преобразования форм представления модели. На этом этапе используются компьютерные программы, позволяющие автоматизировать составление уравнений по схемам. При проектировании систем управления, когда некоторые элементы не существуют в природе, аналитический метод является единственным возможным. Существует два способа построения моделей экспериментальным способом : Активный

способ. Пассивней способ. При построении модели активным способом производится активный эксперимент с объектом управления путём подачи на него типовых воздействий. При пассивном методе регистрируется поведение объекта в режиме нормальной эксплуатации. В результате обработки данных эксперимента получают данные о модели в нужной форме. Операции получения информации о модели называются идентификацией. В результате идентификации получают типа вход-выход. При идентификации используются математические модели трёх типов : Детерминированные Статистические Адаптивные Комбинированные (как совокупность первых трёх) Детерминированные математические модели описываются ОПФ вида Статистические модели описываются набором статистических параметров и функций распределения, при этом используется корреляционный, дисперсионный и регрессивный анализ. Адаптивные модели используются для объектов и систем управления с недостаточной априорной информацией об их свойствах. Очевидно, чем точнее модель, тем выше точность результатов проектирования системы, однако при сложных моделях резко возрастает трудоёмкость синтеза и проектирования системы. Поэтому используют два типа моделей объектов : Приближенные (упрощенные) на этапе синтеза и проектирования Точные на этапе анализа и наладки систем управления Таким образом, выбор того уровня сложности, который делает модель полезной, определяется использованием. Идентификация объекта или системы управления проводится на определённом уровне качества, определяемым критериями идентификации или адекватности модели или объекта.

3. Математическое описание СУ во временной и частотной областях.

Основными формами линейных непрерывных стационарных детерминированных (ЛСДК) операторов преобразования входного сигнала $x(t)$ в выходной $y(t)$ являются : Дифференциальные уравнения. Операторная передаточная функция $W(p)$. Импульсная $g(t)$ и переходная $h(t)$ характеристики. Комплексная передаточная функция $W(j)$, амплитудно-частотная характеристика $W()$, фазо-частотная характеристика $()$. Дифференциальные уравнения (1) с начальными условиями Операторная передаточная функция $W(p)$; Определим ОПФ для дифференциального уравнения (1). $L\{ \}$ равно $L\{ \}$ - полиномиальная форма , где P_j нули $W(p)$, которые получаются из $B(p) = 0$, а P_i полюса $W(p)$, которые получаются из $A(p) = 0$ Структура Q задаётся степенями $n = \deg A$ и числителя $m = \deg B$. Параметрами Q являются коэффициенты полиномов A и B . ОПФ $W(p)$ является функцией свойств системы или объекта и не зависит от вида воздействия. Поэтому $W(p)$ – это модель системы в пространстве преобразования Лапласа. Импульсная $g(t)$ и переходная $h(t)$ характеристики Переходной характеристикой называется отношение реакции системы на ступенчатое воздействие к величине этого воздействия при нулевых начальных условиях. ;

при ненулевых начальных условиях, при нулевых начальных условиях Импульсной характеристикой называется отношение реакции системы на импульсное воздействие к площади этого воздействия при нулевых начальных условиях. ; при ненулевых начальных условиях, при нулевых начальных условиях ; Временные характеристики одной системы однозначно связаны друг с другом, , Комплексная передаточная функция $W(j\omega)$, амплитудно-частотная характеристика $W(\omega)$, фазо-частотная характеристика $\varphi(\omega)$. может быть изображена на комплексной плоскости в виде годографа

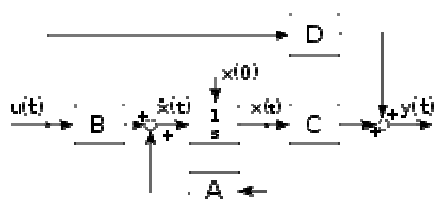
4. Метод пространства состояний.

Пространство состояний — в теории управления один из основных методов описания поведения динамической системы. Движение системы в пространстве состояний отражает изменение ее состояний.

Определение

В пространстве состояний создаётся модель динамической системы, включающая набор переменных входа, выхода и состояния, связанных между собой дифференциальными уравнениями первого порядка, которые записываются в матричной форме. В отличие от описания в виде передаточной функции и других методов частотной области, пространство состояний позволяет работать не только с линейными системами и нулевыми начальными условиями. Кроме того, в пространстве состояний относительно просто работать с MIMO-системами.

Линейные непрерывные системы



Структурная схема непрерывной линейной системы, описанной в виде переменных состояния

Для случая линейной системы с p входами, q выходами и n переменными состояниями описание имеет вид:

$$\dot{\mathbf{x}}(t) = \mathbf{A}(t)\mathbf{x}(t) + \mathbf{B}(t)\mathbf{u}(t)$$

$$\mathbf{y}(t) = \mathbf{C}(t)\mathbf{x}(t) + \mathbf{D}(t)\mathbf{u}(t)$$

где

$$\mathbf{x}(t) \in \mathbb{R}^n; \mathbf{y}(t) \in \mathbb{R}^q; \mathbf{u}(t) \in \mathbb{R}^p;$$

$$\dim[A(\cdot)] = n \times n, \dim[B(\cdot)] = n \times p, \dim[C(\cdot)] = q \times n$$

$$\dim[D(\cdot)] = q \times p, \dot{\mathbf{x}}(t) := \frac{d\mathbf{x}(t)}{dt}.$$

$\mathbf{x}(\cdot)$ — вектор состояния, элементы которого называются состояниями системы

$\mathbf{y}(\cdot)$ — вектор выхода,

$\mathbf{u}(\cdot)$ — вектор управления,

$A(\cdot)$ — матрица системы,

$B(\cdot)$ — матрица управления,

$C(\cdot)$ — матрица выхода,

$D(\cdot)$ — матрица прямой связи.

Часто матрица $D(\cdot)$ является нулевой, это означает, что в системе нет явной прямой связи.

Дискретные системы

Для дискретных систем запись уравнений в пространстве состояний основывается не на дифференциальных, а на разностных уравнениях.

$$\mathbf{x}(nT + T) = A(nT)\mathbf{x}(nT) + B(nT)\mathbf{u}(nT)$$

$$\mathbf{y}(nT) = C(nT)\mathbf{x}(nT) + D(nT)\mathbf{u}(nT)$$

Нелинейные системы

Нелинейная динамическая система n-го порядка может быть описана в виде системы из n уравнений 1-го порядка:

$$\dot{x}_1 = f_1(x_1(t); \dots, x_n(t), u_1(t), \dots, u_m(t))$$

$\vdots$

$$\dot{x}_n = f_n(x_1(t); \dots, x_n(t), u_1(t), \dots, u_m(t))$$

или в более компактной форме:

$$\dot{\mathbf{x}}(t) = \mathbf{f}(t, \mathbf{x}(t), \mathbf{u}(t))$$

$$\mathbf{y}(t) = \mathbf{h}(t, \mathbf{x}(t), \mathbf{u}(t))$$

Первое уравнение — это уравнение состояния, второе — уравнение выхода.

Линеаризация

В некоторых случаях возможна линеаризация описания динамической системы для окрестности рабочей точки $(\bar{\mathbf{x}}, \bar{\mathbf{u}})$.

В установившемся режиме ($\bar{\mathbf{u}} = const$) для рабочей точки $\bar{\mathbf{x}} = const$, справедливо следующее выражение:

$$\dot{\mathbf{x}} = \mathbf{f}(\bar{\mathbf{x}}, \bar{\mathbf{u}}) = \mathbf{0}$$

Вводя обозначения:

$$\delta \mathbf{u} = \mathbf{u} - \bar{\mathbf{u}}$$

$$\delta \mathbf{x} = \mathbf{x} - \bar{\mathbf{x}}$$

Разложение уравнения состояния $\mathbf{f}(\mathbf{x}(t), \mathbf{u}(t))$ в ряд Тейлора, ограниченное первыми двумя членами даёт следующее выражение:

$$\mathbf{f}(\mathbf{x}(t), \mathbf{u}(t)) \approx \mathbf{f}(\bar{\mathbf{x}}(t), \bar{\mathbf{u}}(t)) + \frac{\partial \mathbf{f}}{\partial \mathbf{x}} \delta \mathbf{x} + \frac{\partial \mathbf{f}}{\partial \mathbf{u}} \delta \mathbf{u}$$

При взятии частных производных вектор-функции $\mathbf{f}$ по вектору переменных состояний $\mathbf{X}$ и вектору входных воздействий $\mathbf{u}$ получаются матрицы Якоби соответствующих систем функций:

$$\frac{\partial \mathbf{f}}{\partial \mathbf{x}} = \begin{bmatrix} \frac{\partial f_1}{\partial x_1} & \dots & \frac{\partial f_1}{\partial x_n} \\ \vdots & \ddots & \vdots \\ \frac{\partial f_n}{\partial x_1} & \dots & \frac{\partial f_n}{\partial x_n} \end{bmatrix} \quad \frac{\partial \mathbf{f}}{\partial \mathbf{u}} = \begin{bmatrix} \frac{\partial f_1}{\partial u_1} & \dots & \frac{\partial f_1}{\partial u_p} \\ \vdots & \ddots & \vdots \\ \frac{\partial f_n}{\partial u_1} & \dots & \frac{\partial f_n}{\partial u_p} \end{bmatrix}$$

Аналогично для функции выхода:

$$\frac{\partial \mathbf{h}}{\partial \mathbf{x}} = \begin{bmatrix} \frac{\partial h_1}{\partial x_1} & \dots & \frac{\partial h_1}{\partial x_n} \\ \vdots & \ddots & \vdots \\ \frac{\partial h_q}{\partial x_1} & \dots & \frac{\partial h_q}{\partial x_n} \end{bmatrix} \quad \frac{\partial \mathbf{h}}{\partial \mathbf{u}} = \begin{bmatrix} \frac{\partial h_1}{\partial u_1} & \dots & \frac{\partial h_1}{\partial u_p} \\ \vdots & \ddots & \vdots \\ \frac{\partial h_q}{\partial u_1} & \dots & \frac{\partial h_q}{\partial u_p} \end{bmatrix}$$

Учитывая $\delta \dot{\mathbf{x}} = \dot{\mathbf{x}} - \dot{\bar{\mathbf{x}}} = \dot{\mathbf{x}}$, линеаризованное описание динамической системы в окрестности рабочей точки примет вид:

$$= \mathbf{A} \delta \mathbf{x} +$$

$$= \mathbf{C} \delta \mathbf{x} +$$

где

$$\mathbf{A} = \frac{\partial \mathbf{f}}{\partial \mathbf{x}} \quad \mathbf{B} = \frac{\partial \mathbf{f}}{\partial \mathbf{u}} \quad \mathbf{C} = \frac{\partial \mathbf{h}}{\partial \mathbf{x}} \quad \mathbf{D} = \frac{\partial \mathbf{h}}{\partial \mathbf{u}}$$

Примеры

Модель в пространстве состояний для маятника

Маятник является классической свободной нелинейной системой. Математически движение маятника описывается следующим соотношением:

$$ml\ddot{\theta}(t) = -mg \sin \theta(t) - kl\dot{\theta}(t)$$

где

- $\theta(t)$ — угол отклонения маятника.
- m — приведённая масса маятника
- g — ускорение свободного падения
- k — коэффициент трения в подшипнике подвеса
- l — длина подвеса маятника

В таком случае уравнения в пространстве состояний будут иметь вид:

$$\begin{aligned}\dot{x}_1(t) &= x_2(t) \\ \dot{x}_2(t) &= -\frac{g}{l} \sin x_1(t) - \frac{k}{m} x_2(t)\end{aligned}$$

где

- $x_1(t) := \theta(t)$ — угол отклонения маятника
- $x_2(t) := \dot{x}_1(t)$ — угловая скорость маятника
- $\dot{x}_2(t) := \ddot{x}_1(t)$ — угловое ускорение маятника

Запись уравнений состояния в общем виде:

$$\dot{\mathbf{x}}(t) = \begin{pmatrix} \dot{x}_1(t) \\ \dot{x}_2(t) \end{pmatrix} = \mathbf{f}(t, \mathbf{x}(t)) = \begin{pmatrix} x_2(t) \\ -\frac{g}{l} \sin x_1(t) - \frac{k}{m} x_2(t) \end{pmatrix}$$

Линеаризация модели маятника

Линеаризованная матрица системы для модели маятника в окрестности точки равновесия ($\tilde{x}_1 = 0$) имеет вид:

$$\frac{\delta f}{\delta x} = \begin{pmatrix} 0 & 1 \\ -\frac{g}{l} \cos \tilde{x}_1 & -\frac{k}{m} \end{pmatrix} = \begin{pmatrix} 0 & 1 \\ -\frac{g}{l} & -\frac{k}{m} \end{pmatrix}$$

При отсутствии трения в подвесе ($k = 0$) получим уравнение движения математического маятника:

$$\ddot{x} = -\frac{g}{l}x$$

1. 3 Лекция №4 (2 часа).

Тема: «Типовые динамические звенья и структурные схемы»

1.3.1 Вопросы лекции:

1. Математическое описание и методика определения временных и частотных характеристик типовых динамических звеньев (ТДЗ).
2. Правила преобразования структурных схем.

1.3.2 Краткое содержание вопросов:

1. Математическое описание и методика определения временных и частотных характеристик типовых динамических звеньев (ТДЗ).

Динамические свойства линейных звеньев и систем автоматического управления в целом могут быть описаны уравнениями, как показано выше, и графическими характеристиками. В теории автоматического применяются два типа таких характеристик – временные и частотные. Эти характеристики могут быть сняты экспериментально или построены по уравнению звена [4].

Переходная или временная характеристика (функция) звена **$h(t)$** представляет собой реакцию на выходе звена, вызванную подачей на его вход единичного, ступенчатого воздействия. Единичное, ступенчатое воздействие (единичная, ступенчатая функция) – это воздействие, которое мгновенно возрастает от нуля до единицы и далее остается неизменным

$$1(t) = \begin{cases} 0 & \text{при } t < 0, \\ 1 & \text{при } t \geq 0. \end{cases}$$

Таким образом

$$h(t) = y(t) \text{ при } x(t) = 1(t). \quad (1.6)$$

Импульсная переходная (временная) характеристика или функция, называемая еще весовой функцией (функцией веса), $w(t)$ представляет собой реакцию звена на единичный импульс. Единичный импульс (единичная импульсная функция или дельта-функция) – это математическая идеализация предельно короткого импульсного сигнала. Единичный импульс – это импульс, площадь которого равна единице при длительности, равной нулю, и высоте, равной бесконечности

$$\delta(t) = \begin{cases} \infty & \text{при } t = 0, \\ 0 & \text{при } t \neq 0. \end{cases} \quad \int_{-\infty}^{\infty} \delta(t) dt = 1.$$

При этом согласно определению

Таким образом

$$w(t) = y(t) \text{ при } x(t) = \delta(t). \quad (1.7)$$

Дельта-функция просто связана с единичной, ступенчатой функцией

$$\delta(t) = 1'(t).$$

Отсюда следует аналогичная связь между весовой и переходной функциями

$$w(t) = H(t) \text{ или } h(t) = \int_0^t w(t) dt$$

Временные характеристики на основании преобразования Лапласа связаны также с передаточной функцией звена. Переходная характеристика $h(t) = L^{-1}[W(p)/p]$.

импульсная переходная характеристика $w(t) = L^{-1}[W(p)]$.

Частотные характеристики звеньев и систем

Частотные характеристики описывают установившиеся вынужденные колебания на выходе звена, вызванные гармоническим воздействием на входе [4].

Пусть на вход звена (рис. 1.1) подано гармоническое воздействие

$$x(t) = x_m \sin \omega t,$$

где x_m – амплитуда, а ω – угловая частота этого воздействия.

По окончании переходного процесса на выходе этого звена будут существовать гармонические колебания с той же частотой, что и на входе, но отличающиеся в общем случае по амплитуде и фазе

$$y(t) = y_m \sin(\omega t + \varphi),$$

где y_m – амплитуда выходных установившихся колебаний; φ – фазовый сдвиг между входными и выходными колебаниями.

При фиксированной амплитуде входных колебаний амплитуда и фаза установившихся колебаний на выходе звена зависит от частоты колебаний.

Амплитудной частотной характеристикой (АЧХ) звена называется зависимость отношения амплитуд от частоты

$$A(\omega) = \frac{y_m}{x_m}.$$

фазовой частотной характеристикой (ФЧХ) звена называется зависимость сдвига фаз от частоты

$$\varphi(\omega) = \varphi$$

При исследовании систем автоматического управления амплитудную и фазовую частотные характеристики удобно строить в логарифмических координатах. Это связано с двумя обстоятельствами. Во-первых, в логарифмических координатах характеристики деформируются таким образом, что возникает возможность упрощенно изображать амплитудные частотные характеристики ломаными линиями. Во-вторых, в логарифмическом масштабе амплитудная частотная характеристика последовательной цепочки звеньев равна сумме амплитудных характеристик отдельных звеньев.

Амплитудно-частотная характеристика в логарифмических координатах (ЛАХ) строится в виде зависимости

$$L(\omega) = 20 \lg A(\omega)$$

от $\lg(\omega)$, называемой логарифмической амплитудной характеристикой (ЛАХ), а фазовая – в виде зависимости φ от $\lg(\omega)$, называемой логарифмической фазовой характеристикой (ЛФХ).

Обыкновенные амплитудная и фазовая характеристики могут быть объединены в одну характеристику – амплитудно-фазовую частотную характеристику $W(j\omega)$, используя $A(\omega)$ и $\varphi(\omega)$ в качестве полярных координат. Амплитудно-фазовую частотную характеристику $W(j\omega)$ можно строить и в прямоугольной системе координат – в комплексной плоскости. При этом координатами будут проекции вектора $A(\omega)$ на соответствующие оси. Зависимости $U(\omega)$ и $V(\omega)$ называются соответственно действительной (вещественной) и мнимой частотными характеристиками. Аналитические выражения для рассмотренных выше частотных характеристик могут быть легко получены по передаточной функции. Если в выражение передаточной функции звена $W(p)$ подставить $p = j\omega$, то получится комплексная величина $W(j\omega)$, которая представляет

собой функцию Φ и является амплитудно-фазовой частотной характеристикой (частотной передаточной функцией) звена

$$W(j\omega) = A(\omega)e^{j\varphi(\omega)} = U(\omega) + jV(\omega) \quad (1.8)$$

Тогда справедливы следующие соотношения

$$A(\omega) = \sqrt{U^2(\omega) + V^2(\omega)}; \quad \varphi(\omega) = \arctg \frac{V(\omega)}{U(\omega)};$$

$$U(\omega) = A(\omega) \cos \varphi(\omega); \quad V(\omega) = A(\omega) \sin \varphi(\omega).$$

Частотные и переходные характеристики взаимосвязаны. Наиболее просто связь между ними определяется для весовой функции с помощью преобразования Фурье

$$W(j\omega) = \int_0^{\infty} w(t)e^{-j\omega t} dt; \quad w(t) = \frac{1}{2\pi} \int_{-\infty}^{\infty} W(j\omega)e^{j\omega t} d\omega.$$

Типовые звенья и их характеристики

В теории автоматического управления вводится понятие типовых звеньев, передаточная функция которых только в определенном частотном диапазоне соответствует реальным звеньям систем управления. Рассматривая характеристики звеньев независимо от их назначения, физического принципа действия, мощности и скорости передаваемых сигналов, можно выделить ряд типовых звеньев, описываемых обыкновенными линейными дифференциальными уравнениями первого и второго порядков :

колебательные, консервативные, инерционные, форсирующие.

Более сложные линейные звенья могут быть сведены к соединению типовых звеньев. Модели типовых звеньев могут быть представлены в виде дифференциальных уравнений, передаточных функций, а также частотных и временных характеристик.

2. Правила преобразования структурных схем.

Структурной схемой в теории автоматического управления называется представление САУ в виде совокупности динамических звеньев. В прямоугольных блоках записываются передаточные функции элементарных динамических звеньев системы. Стрелками обозначаются связи между элементами, а также воздействия: выходное - y , задающее - x возмущающее - f и т.п.

Узлы (разветвления сигналов) обозначаются точками на стрелках, а сумматоры сигналов обозначаются в виде кружка. Например, первый сумматор вычисляет сигнал рассогласования, (ошибки): $e = x - z$.

На рис. 1 приведена структурная схема системы автоматического управления

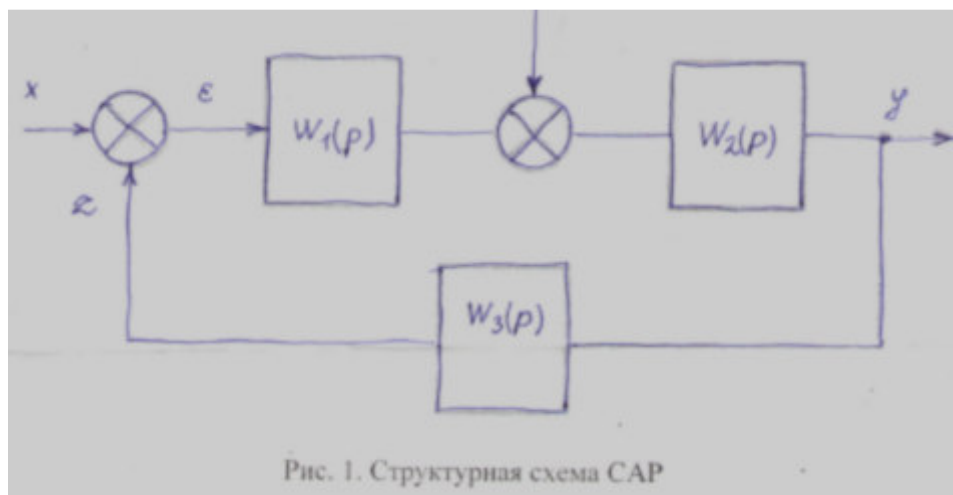


Рис. 1. Структурная схема САУ

Структурная схема представляет собой математическую модель САУ, состоящую из совокупности типовых динамических звеньев, и является очень удобным, информативным и наглядным способом представления системы. Для анализа и синтеза САУ необходимо знать математическое описание системы в виде ее общей передаточной функции. Структурные схемы позволяют достаточно просто решить эту проблему путем сворачивания всей совокупности типовых динамических звеньев в одно динамическое звено. Для этого применяются три правила преобразования структурных схем и правила переноса узла и сумматора.

Звенья в структурных схемах могут соединяться между собой последовательно, параллельно и встречно (по схеме с обратной связью) (рис. 2).

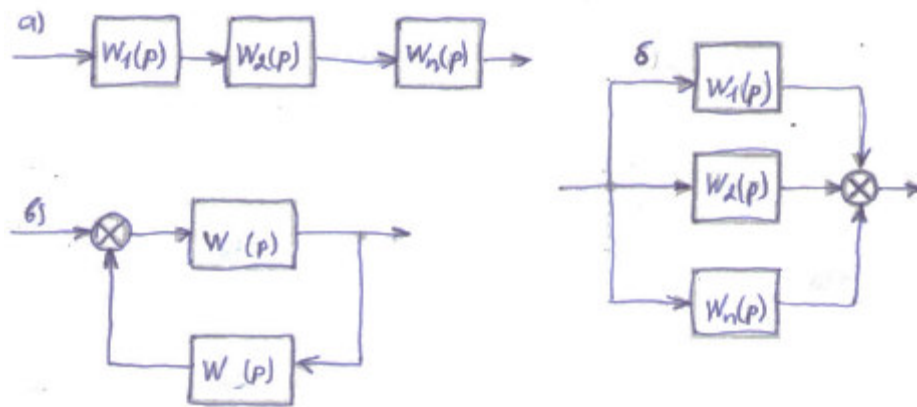


Рис. 2. Виды соединений звеньев

1. Передаточная функция цепочки последовательно соединенных звеньев (рис.

2,а) равна произведению их передаточных функций $W_p = \prod_{i=1}^n W_i(p)$

2. Передаточная функция группы параллельно соединенных звеньев (рис. 2,б)

равна их сумме передаточных функций $W(p) = \sum_{i=1}^n W_i(p)$

3. Передаточная функция группы звеньев, соединенных по схеме с обратной связью (рис. 2,в), определяется как отношение передаточной функции прямой цепи к выражению - единица минус (для положительной обратной связи) или плюс (для отрицательной обратной связи) - передаточная функция разомкнутой цепи: $W(p) = W_{пр}(p) / 1 \pm W_{пр}(p) W_{ос}(p)$

Такая передаточная функция называется передаточной функцией замкнутой системы (замкнутой цепи). Т.е. при положительной обратной связи сигнал ОС прибавляется к задающему воздействию, а при отриц-й – вычитается из него. Прямой цепью наз. Совокупность звеньев передающее сигнал от входа к выходу. Передаточная функция разомкнутой цепи (системы) состоит из передаточной функции прямой цепи и передаточной функции ОС. Перед-я ф-ция разомкнутой цепи в случае одноконтурной САУ представляет собой произведение передаточных функций всех ее звеньев.

Правила переноса сумматора на рис. 3 и 4. а) исх. схемы, б), в) преобразованные

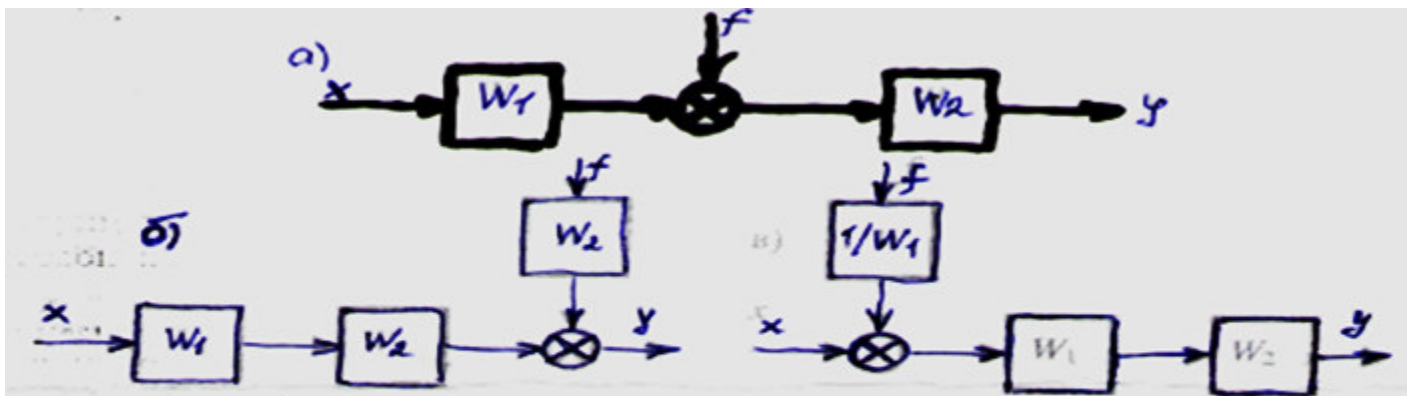


Рис. 3.

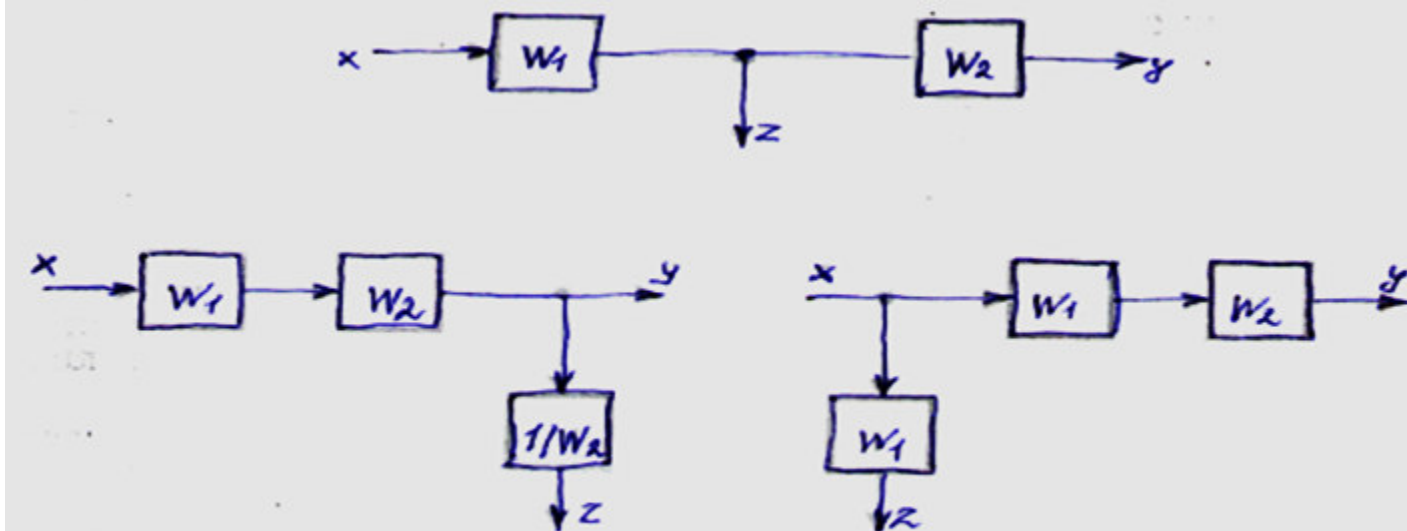
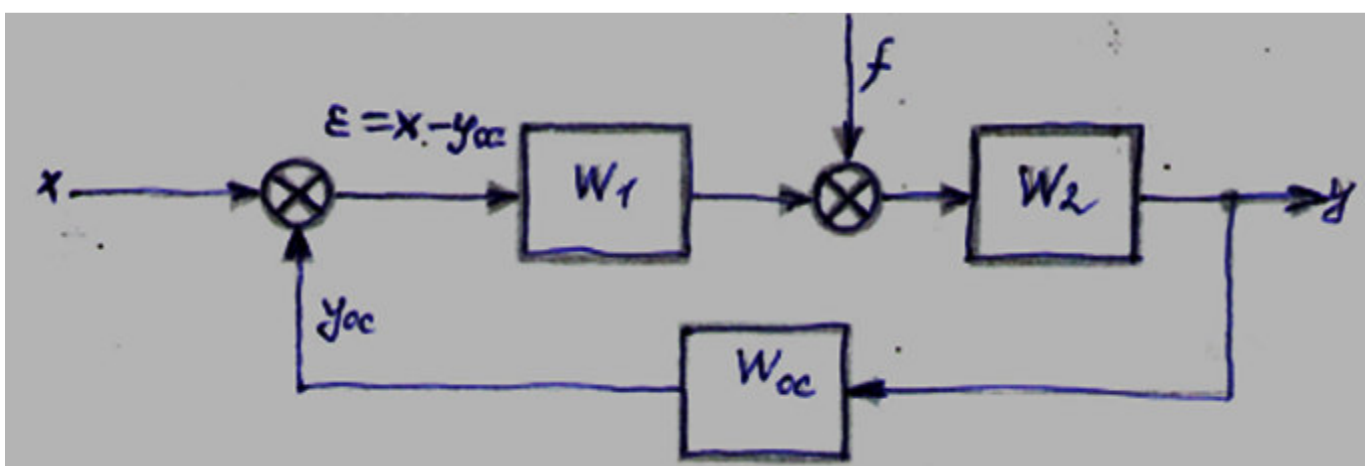


Рис. 4.

Определим передаточные функции по управлению, по возмущению и по ошибке для одноконтурной линейной САУ (рис. 5).



На основе принципа суперпозиции определим поочередно передаточные функции системы по двум входам - управляющему x и возмущающему a считая при этом

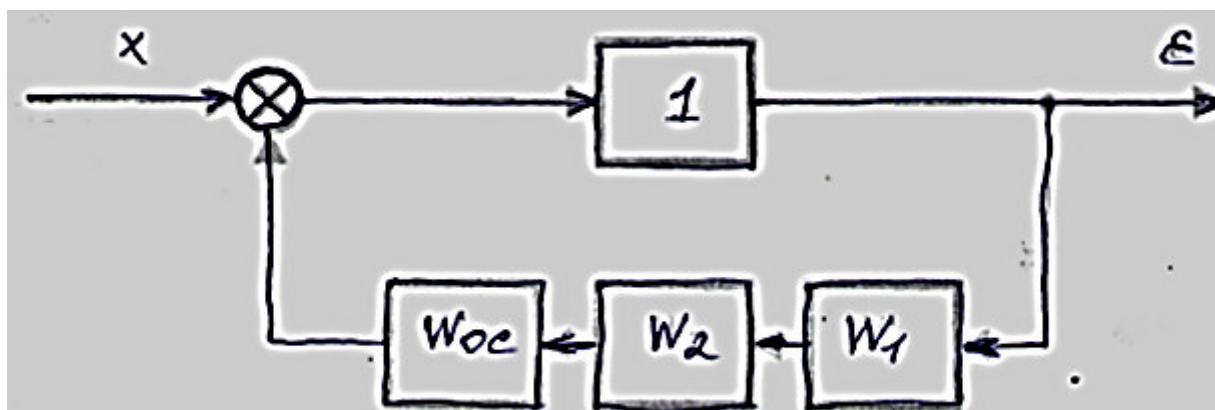
действующим только один из входов. Предполагая, что $f = 0$, определим передаточную функцию по управлению

$$W_{упр}(p) = \frac{y}{x} = \frac{W_1(p)W_2(p)}{1 + W_1(p)W_2(p)W_{oc}(p)} = \frac{W_{yx}(p)}{1 + W(p)}$$

Аналогичным образом найдем передаточную функцию по возмущению, считая $x = 0$:

$$W_{воз}(p) = \frac{y}{f} = \frac{W_2(p)}{1 + W_1(p)W_2(p)W_{oc}(p)} = \frac{W_{yf}(p)}{1 + W(p)}$$

Передаточную функцию по ошибке e получим после преобразования исходной структурной схемы САУ в вид, представленный на рис. 6 ($f = 0$, $x = 0$).



Передаточная функция прямой цепи между входным воздействием I и сигналом ошибки e равна 1 , тогда передаточная САУ по ошибке определится в виде

$$W_{ош}(p) = \frac{e}{x} = \frac{1}{1 + W_1(p)W_2(p)W_{oc}(p)} = \frac{1}{1 + W(p)}$$

Анализируя передаточные функции $W_{упр}(p)$, $W_{воз}(p)$, $W_{ош}(p)$ для случая, когда на линейную систему одновременно подаётся несколько воздействий z на основе принципа суперпозиции можно определить следующую зависимость выходного сигнала от совокупности входных

$$y = \frac{\sum_{i=1}^n W_{yz_i}(p) \cdot z_i}{1 + W(p)}$$

Отсюда для рассматриваемой системы (рис. 5) получаем

$$y = \frac{W_{yx}(p)x + W_{yf}(p)f}{1 + W(p)}$$

Эти уравнения используются при исследовании САУ. Применяя рассмотренные правила преобразования структурных схем, можно любую многоконтурную структурную схему, в том числе и с перекрещивающимися контурами, привести к одноконтурному виду и затем свернуть в одно динамическое звено, передаточная функция которого будет являться передаточной функцией исходной многоконтурной системы.

1.4 Лекция №5 (2 часа).

Тема: «Методы анализа и синтеза систем управления»

1.4.1 Вопросы лекции:

1. Понятие устойчивости системы управления.
2. Математический признак устойчивости.
3. Критерии и области устойчивости линейных СУ.

1.4.2 Краткое содержание вопросов:

1. Понятие устойчивости системы управления.

Понятие устойчивости относится к ситуации, когда входные сигналы системы равны нулю, т.е. внешние воздействия отсутствуют. При этом правильно построенная система должна находиться в состоянии равновесия (покоя) или постепенно приближаться к этому состоянию. В неустойчивых системах даже при нулевых входных сигналах возникают собственные колебания и, как следствие, – недопустимо большие ошибки.

Понятие точности связано с качеством работы управляемых систем при изменяющихся входных сигналах. В правильно спроектированных системах управления

величина рассогласования между заданным законом управления $g(t)$ и выходным сигналом $x(t)$ должна быть мала.

Наконец, для характеристики влияния помех на системы управления используют дисперсию или среднее квадратическое отклонение составляющей ошибки за счет действия помех.

Понятие устойчивости

Одним из первых вопросов, возникающих при исследовании и проектировании линейных систем управления, является вопрос об их устойчивости. Линейная система называется **устойчивой**, если при выведении ее внешними воздействиями из состояния равновесия (покоя) она возвращается в него после прекращения внешних воздействий. Если после прекращения внешнего воздействия система не возвращается к состоянию равновесия, то она является **неустойчивой**. Для нормального функционирования системы управления необходимо, чтобы она была устойчивой, так как в противном случае в ней возникают большие ошибки.

Определение устойчивости обычно проводят на начальном этапе создания системы управления. Это объясняется двумя причинами. Во-первых, анализ устойчивости довольно прост. Во-вторых, неустойчивые системы могут быть скорректированы, т.е. преобразованы в устойчивые с помощью добавления специальных корректирующих звеньев.

Анализ устойчивости с помощью алгебраических критериев

Устойчивость системы связана с характером ее собственных колебаний. Чтобы пояснить это, предположим, что система описывается дифференциальным уравнением

$$\frac{d^n x}{dt^n} + a_1 \frac{d^{n-1} x}{dt^{n-1}} + \dots + a_n x = b_0 \frac{d^m g}{dt^m} + b_1 \frac{d^{m-1} g}{dt^{m-1}} + \dots + b_m g$$

или, после преобразования Лапласа,

$$(p^n + a_1 p^{n-1} + \dots + a_n) x(p) = (b_0 p^m + b_1 p^{m-1} + \dots + b_m) g(p),$$

где $g(p)$ – входное воздействие.

Устойчивая система возвращается в состояние покоя, если входное воздействие $g(p) \equiv 0$. Таким образом, для устойчивой системы решение однородного дифференциального уравнения $(p^n + a_1 p^{n-1} + \dots + a_n) x(p) = 0$ должно стремиться к нулю при t стремящемся к бесконечности.

Если найдены корни $p_1, p_2, \dots, p_n$ характеристического уравнения $p^n + a_1 p^{n-1} + \dots + a_n = 0$, то решение однородного уравнения запишется в

виде
$$x(t) = \sum_{k=1}^n c_k e^{p_k t}$$

В каких же случаях система устойчива?

Предположим, что $p_k = a_k$ – действительный корень.

Ему соответствует слагаемое $c_k e^{a_k t}$. При $a_k < 0$ это слагаемое будет стремиться к нулю, если t стремится к бесконечности. Если же $a_k > 0$, то $x(t) \rightarrow \infty$, когда t стремится к бесконечности; . Наконец, в том случае, когда $a_k = 0$, рассматриваемое слагаемое не изменяется и при t стремящемся к бесконечности, $x_k(t) = c_k$

Допустим теперь, что $p_k = a_k + j b_k$ – комплексный корень характеристического уравнения. Заметим, что в этом случае $\bar{p}_k = a_k - j b_k$ также будет корнем характеристического уравнения. Двум комплексно-сопряженным корням будут соответствовать слагаемые вида $c_k \sin b_k t e^{a_k t}$, $c_k \cos b_k t e^{a_k t}$.

При этом, если $a_k < 0$, то в системе имеются затухающие колебания. При $a_k > 0$ – колебания возрастающей амплитуды, а при $a_k = 0$ – колебания постоянной амплитуды c_k .

Таким образом, система устойчива, если действительные части всех корней характеристического уравнения отрицательны. Если хотя бы один корень имеет действительную часть $a_k \geq 0$, то система неустойчива. Говорят, что система находится на границе устойчивости, если хотя бы один корень характеристического уравнения имеет нулевую действительную часть, а действительные части всех остальных корней отрицательны.

Это определение хорошо иллюстрируется геометрически. Представим корни характеристического уравнения точками на комплексной плоскости (рис. 15).

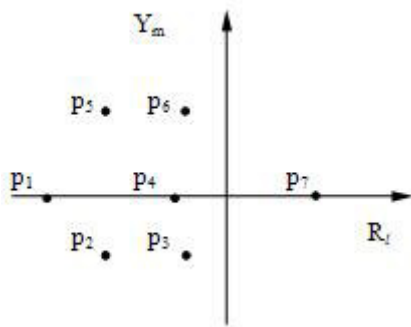


Рис. 15.

Если все корни лежат в левой полуплоскости комплексного переменного, то система устойчива. Если хотя бы один корень лежит в правой полуплоскости комплексного переменного - система неустойчива. Если же корни находятся на мнимой оси и в левой полуплоскости, то говорят, что система находится на границе устойчивости.

Рассмотрим в качестве примера замкнутую систему управления с одним интегрирующим звеном. В этом случае $H(p) = \frac{k}{p}$, $k > 0$, а передаточная функция замкнутой системы

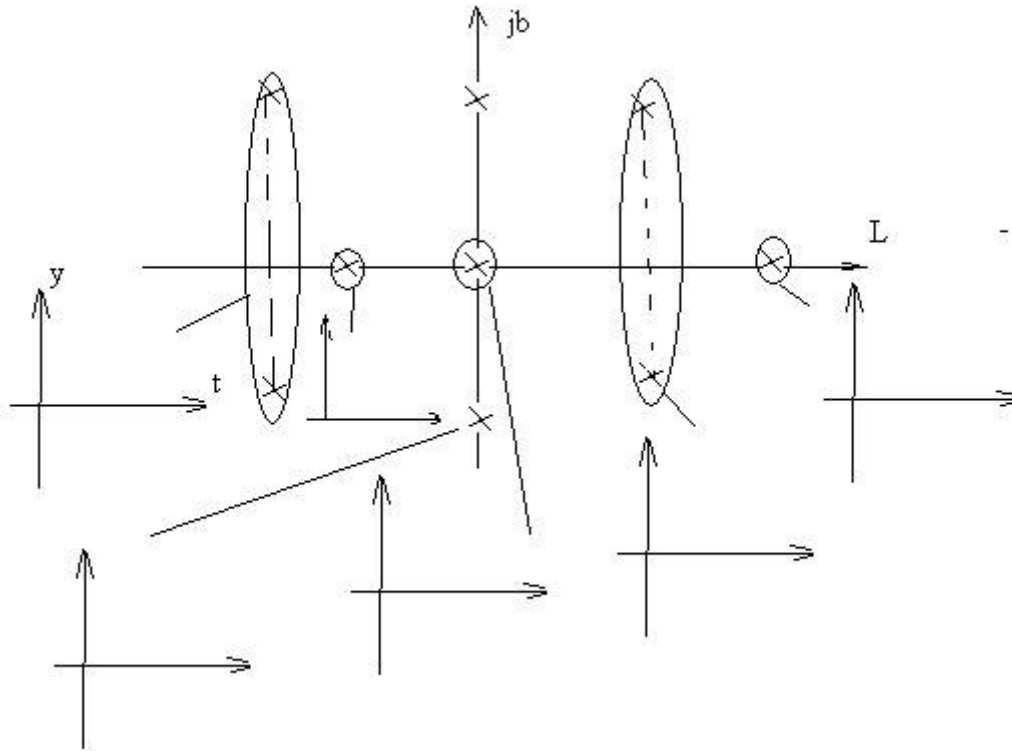
$$W(p) = \frac{H(p)}{1 + H(p)} = \frac{k/p}{1 + k/p} = \frac{k}{p + k}.$$

Выходной сигнал системы $x(p) = W(p)g(p)$ или $x(p) = \frac{k}{p + k} g(p)$. Заметим, что характеристическое уравнение $p + k = 0$ записывается с помощью приравнивания к нулю знаменателя передаточной функции замкнутой системы управления. В данном случае имеется один корень $p_1 = -k < 0$ и поэтому система управления всегда устойчива.

Предположим теперь, что $H(p) = \frac{k}{p^2}$. Тогда $W(p) = \frac{k/p^2}{1 + k/p^2} = \frac{k}{p^2 + k}$. Характеристическое уравнение $p^2 + k = 0$. Поэтому $p_{1,2} = \pm j\sqrt{k}$. Система находится на границе устойчивости. В ней существуют незатухающие колебания.

2. Математический признак устойчивости.

Математический признак устойчивости – для устойчивости системы, необходимо и достаточно, чтобы все корни характеристического уравнения имели отрицательную действительную часть (все полюса были левыми).



Если все полюса лежат слева от мнимой оси, система устойчива, хотя бы один справа система не устойчива, на колебательной (периодической) границе устойчивости, если при остальных левых полюсах имеем пару чисто мнимых корней и на апериодической границе устойчивости, если при остальных левых полюсах имеем один нулевой полюс.

Т.к. выходная величина устойчивой системы при $t \rightarrow \infty$ асимптотически стремится к вынужденной составляющей переходного процесса, такую устойчивость называют асимптотической.

Математиком Ляпуновым показана связь между устойчивостью линеаризованных и исходных нелинейных систем в теоремах:

1 если линеаризованная система устойчива, то устойчива и исходная нелинейная;

2 если линеаризованная система неустойчива, то неустойчива и исходная нелинейная;

3 если линеаризованная система находится на границе устойчивости, то для оценки устойчивости нелинейной системы нужны дополнительные исследования, т.е. другим методом или с большой точностью.

3. Критерии и области устойчивости линейных СУ.

Вычисление корней весьма просто лишь для характеристического уравнения первой и второй степени. Существуют общие выражения для корней уравнений третьей и четвертой степени, но эти выражения громоздки и практически не применяются. Для уравнений более высоких степеней вообще невозможно написать общие выражения для корней через коэффициенты характеристического уравнения.

Существуют правила, позволяющие определять устойчивость системы без вычислений корней. Эти правила называют критериями устойчивости. Известны несколько критериев устойчивости. Все они математически эквивалентны, так как решают вопрос о знаке вещественной части корней характеристического уравнения. Их разделяют на алгебраические и частотные.

Алгебраические критерии позволяют судить об устойчивости системы по коэффициентам характеристического уравнения

$$a_n p^n + a_{n-1} p^{n-1} + \dots + a_1 p + a_0 = 0 \quad (3.13)$$

Во-первых, необходимым (но недостаточным!) условием устойчивости является положительность всех коэффициентов $a_n, a_{n-1}, \dots, a_0$ характеристического уравнения. Если хотя бы один из коэффициентов меньше нуля, то система неустойчива и дальнейшее исследование не имеет смысла. Если $a_n > 0, a_{n-1} > 0, \dots, a_0 > 0$, то согласно алгебраическому критерию устойчивости Гурвица система устойчива, если все определители Гурвица больше нуля.

Для коэффициентов уравнения (3.13) составляют квадратную матрицу $n \times n$, по главной диагонали которой записывают все коэффициенты от a_{n-1} до a_0 и далее заполняют её, как показано ниже. В случае отсутствия данного коэффициента и если его номер больше n или меньше нуля, на его место проставляют нуль:

$$\Delta = \begin{vmatrix} a_{n-1} & a_{n-3} & a_{n-5} & \dots & 0 & 0 \\ a_n & a_{n-2} & a_{n-4} & \dots & 0 & 0 \\ 0 & a_{n-1} & a_{n-3} & \dots & 0 & 0 \\ 0 & a_n & a_{n-2} & \dots & \dots & \dots \\ \dots & \dots & \dots & \dots & a_1 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & \dots & a_2 & a_0 \end{vmatrix}$$

Определители Гурвица составляют так:

$$\Delta_1 = a_{n-1} > 0; \quad \Delta_2 = \begin{vmatrix} a_{n-1} & a_{n-3} \\ a_n & a_{n-2} \end{vmatrix} > 0 \quad \text{и т.д.}$$

Последний определитель включает всю матрицу. Но каждый последующий определитель может быть вычислен через предыдущий. Так как в устойчивой системе $\Delta_{n-1} = a_{n-1} > 0$, то положительность определителя обеспечивается, если $a_0 > 0$.

Если характеристическое уравнение имеет невысокий порядок, то применение алгебраических критериев достаточно просто. Если же уравнение имеет высокий порядок, то применить алгебраические критерии затруднительно. В том случае, когда система включает звено запаздывания, характеристическое уравнение становится трансцендентным из-за члена $e^{-P\tau}$.

В подобных случаях используют частотные критерии. Они удобны в силу простоты геометрической интерпретации и наглядности.

Согласно критерию Михайлова для устойчивости системы необходимо и достаточно, чтобы с ростом ω от 0 до ∞ годограф Михайлова, начинаясь на

положительной части действительной оси, обходил последовательно в положительном направлении n квадрантов, где n – порядок характеристического полинома

$$A(p) = a_n p^n + a_{n-1} p^{n-1} + \dots + a_1 p + a_0$$

На рис. 3.3,а показаны кривые Михайлова для устойчивых систем различных порядков, а на рис. 3.3,б – для неустойчивых.

Рассмотрим теперь частотный критерий Найквиста. Этот критерий отличается от критерия Михайлова тем, что об устойчивости замкнутой системы судят по виду амплитудно-фазовой характеристики разомкнутой системы, которую можно получить как аналитически, так и экспериментально. Это обстоятельство выгодно отличает рассматриваемый критерий устойчивости от ранее изложенных. Согласно критерию Найквиста, для устойчивости замкнутой системы управления необходимо и достаточно, чтобы частотный годограф разомкнутой системы $W(j\omega)$ при изменении ω от 0 до ∞ охватывал $l/2$ раз в положительном направлении точку $(-1, j0)$, где l — число корней характеристического уравнения разомкнутой системы, лежащих в правой полуплоскости.

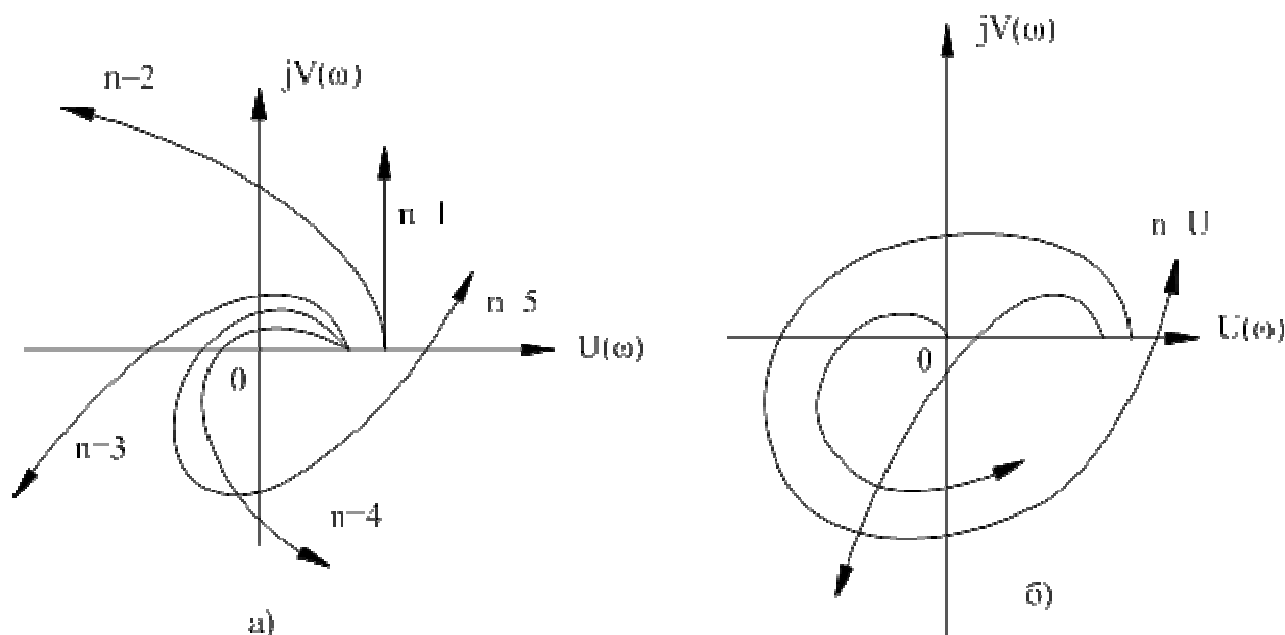


Рис. 3.3. Кривые Михайлова для устойчивых (а) систем разного порядка n и для неустойчивых систем (б)

Из этой теоремы непосредственно вытекает следствие: если разомкнутая система устойчива ($l = 0$), то для устойчивости замкнутой системы необходимо и достаточно, чтобы частотный годограф $W(j\omega)$ при изменении ω от 0 до ∞ не охватывал точку $(-1, j0)$.

Заметим, что для применения частотного критерия устойчивости Найквиста необходимо знать, устойчива или неустойчива система в разомкнутом состоянии. При этом, если система в разомкнутом состоянии неустойчива, то следует определить количество корней характеристического уравнения, имеющих положительные вещественные части. Только в этом случае можно применить частотный критерий устойчивости Найквиста к исследованию устойчивости замкнутой системы.

В качестве примера рис. 3.4 изображен годограф частотной характеристики для разомкнутого колебательного звена. Как видно из рис. 3.3, этот годограф не охватывает точку $(-1, j0)$, и так как разомкнутое колебательное звено устойчиво, то устойчивым будет и замкнутое колебательное звено.

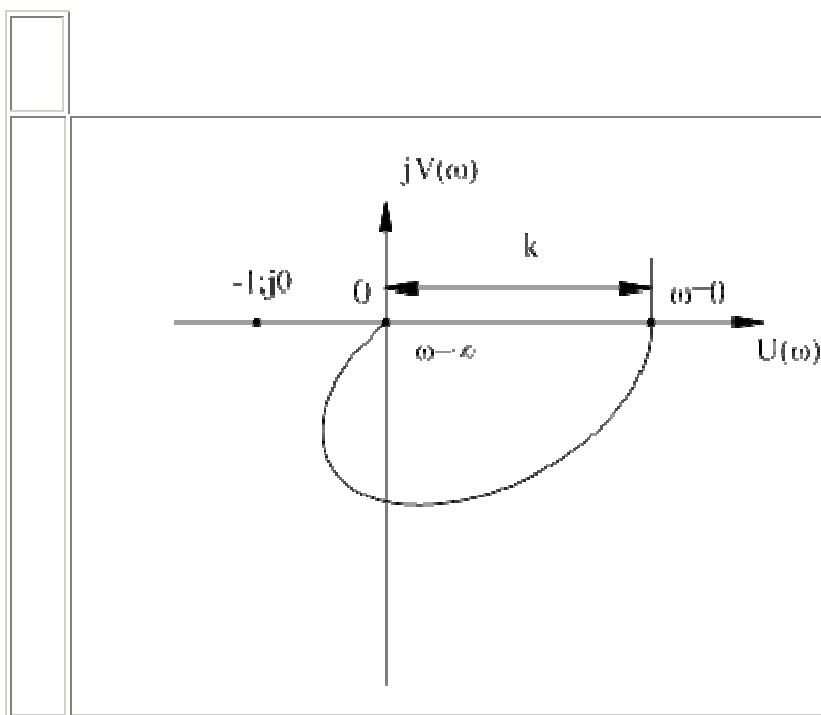


Рис. 3.4. К определению устойчивости по критерию Найквиста

1. 5 Лекция №6 (2 часа).

Тема: «Качество процессов регулирования в системах управления»

1.5.1 Вопросы лекции:

1. Понятие и показатели качества управления СУ.
2. Методы анализа качества систем управления.
3. Точность систем управления.

1.5.2 Краткое содержание вопросов:

1. Понятие и показатели качества управления СУ.

В статическом режиме ошибки возникают только в статической системе, а в астатической системе они равны нулю, в связи с этим статическую точность оценивают только при анализе статических систем.

Статической системой управления принято называть система, объект и регулятор которой являются статическими элементами, т. е.

$$W_o(0) = k_o \text{ и } W_p(0) = k_p. (5.7)$$

Подставляя в уравнения динамики регулируемой величины (4.15) и для ошибки (4.24) одноконтурной системы $p = 0$ и полагая для простоты $x_{\text{п}} = 0$ и $x_{\text{в}} = 0$, получим уравнения статики статической системы:

для управляемой величины

$$x = x_z k_p k_o (1 + k_p k_o) + y_{\text{в}} k_o (1 + k_p k_o); (5.8)$$

для сигнала ошибки

$$e = x_z (1 + k_p k_o)^{-1} - y_{\text{в}} k_o (1 + k_p k_o)^{-1}. (5.9)$$

Первое слагаемое в правой части уравнения (4.32) характеризует статическую ошибку по задающему воздействию, второе — статическую ошибку по возмущению. Обе эти ошибки тем больше, чем больше внешние воздействия, и тем меньше, чем больше знаменатель $(1 + k_p k_o)$. Следовательно, точность статической системы тем лучше, чем больше передаточный коэффициент разомкнутого контура.

Точность статической системы принято оценивать коэффициентом статизма

$$S = Dx_z/Dx_p, (5.10)$$

где Dx_p — отклонение управляемой величины x от заданного значения, создаваемое возмущением $y_b = y_{b0}$ при разомкнутом контуре регулирования; Dx_z — отклонение управляемой величины, создаваемое тем же возмущением y_{b0} в замкнутой системе. Коэффициент статизма показывает, во сколько раз отклонение выходной величины управляемого объекта меньше отклонения этой величины неуправляемого объекта (при одном и том же значении возмущающего воздействия). Очевидно, что $Dx_p = Dy_{b0}k_o$ и $Dx_z = Dy_{b0}k_o / (1 + k_p k_o)$. Отсюда коэффициент статизма

$$S = (1 + k_p k_o)^{-1} = (1 + k)^{-1}, \quad (5.11)$$

где $k = k_p k_o$ — передаточный коэффициент разомкнутого контура.

Точность статической системы считается удовлетворительной, в случае если коэффициент $S = 0,1 \text{ — } 0,01$. Следовательно, общий передаточный коэффициент разомкнутого контура статической системы должен находиться в диапазоне $10 \text{ — } 100$

Качество автоматической системы управления определяется совокупностью свойств, обеспечивающих эффективное функционирование как самого объекта управления, так и управляющего устройства, т. е. всей системы управления в целом. В теории автоматического управления термины "качество управления" используют в узком смысле: рассматривают *только статические и динамические свойства системы*. Такие свойства системы, выраженные в количественной форме, называют *показателями качества управления*. Эти свойства *предопределяют точность поддержания управляемой величины на заданном уровне в установившихся и переходных режимах*, т. е. обеспечивают эффективность процесса управления.

В частности, нами была рассмотрена *точность системы в установившихся режимах*. Теперь мы будем рассматривать показатели качества, характеризующие *точность системы в переходных режимах*.

Точность системы в переходных режимах оценивают при помощи прямых и косвенных показателей. *Прямые показатели* определяют по графику переходного процесса, возникающего в системе при ступенчатом внешнем воздействии. *Косвенные показатели* качества определяют по распределению корней характеристического уравнения или по частотным характеристикам системы.

К особой категории показателей качества относятся так называемые **интегральные оценки**, которые вычисляют либо непосредственно по переходной функции системы, либо по коэффициентам передаточной функции системы.

Вспомним, по лекции точность системы в переходных режимах определяется величинами отклонений управляемой переменной $x(t)$ от заданного значения $x_3(t)$ и длительностью существования этих отклонений. Величина и длительность отклонений зависят от характера переходного процесса в системе. Характер переходного процесса в свою очередь зависит как от свойств системы, так и от места приложения внешнего воздействия.

При самой общей оценке качества обращают внимание прежде всего на форму переходного процесса. Различают следующие типовые переходные процессы

Каждый из трех типовых процессов имеет свои преимущества и недостатки, и предпочтение какой-либо форме процесса делают с учетом особенностей управляемого объекта. Так, к примеру, в электромеханических объектах со сложными кинематическими передачами (лифты, экскаваторы, подъемные установки) нежелательны резкие знакопеременные усилия, и в связи с этим при выборе настроек систем управления такими объектами стремятся к апериодическим и монотонным процессам. В рассмотренной нами системе управления обогащательным аппаратом допустимы колебательные переходные процессы, так как кратковременные отклонения управляемых величин не ухудшают существенно показатели обогащения.

2. Методы анализа качества систем управления.

Дивергентное и конвергентное мышление. Движение по фазам ССВ может быть представлено как чередование дивергентного и конвергентного мышления. Дивергентное мышление - расходящееся мышление (способность посмотреть на проблему широко - рассмотреть максимальное количество вариантов). Конвергентное мышление - сходящееся мышление (сужение границ рассматриваемой ситуации, выбор из большого количества вариантов одного или нескольких). Конвергентное мышление, как правило, организовать проще. Для инициализации дивергентного мышления существуют различные приемы (мозговой штурм, фиксация идей, использование опыта других и т.д.).

Рабочая группа. Для выполнения работ по управлению изменениями с помощью ССВ, создаются рабочие группы. Уделяется серьезное внимание качеству формирования рабочих групп. Выбор участников команды и определение ресурсов по праву играют

значительную роль в управлении изменениями и организации, которые не позаботятся об этом, не уделят должного внимания подготовке, обучению и поддержке участников команды, вряд ли достигнут того успеха, которого они могли бы достичь.

Роль высшего руководства (обладателя проблемы). В ССВ важное место отводится участию высшего руководства в проведении всей работы. В ССВ высшее руководство является "обладателем проблемы". Указывается на чрезвычайную важность вовлечения высшего руководства в проводимую работу. Кроме того, высшее руководство должно обеспечивать поддержку рабочей группы.

Координатор. В больших организациях, где одновременно идет несколько проектов, существует потребность в координаторе. Роль координатора требует хороших административных способностей, понимания организации и ее целей. Все это нужно, чтобы определить, какую именно информацию передавать от одной команды к другой. Координатор не обязательно должен занимать руководящую должность, хотя во многих ситуациях бывает именно так - ведь это символизирует значимость происходящего для организации.

Консультант. В ССВ вводится должность консультанта по организации процесса управления изменениями, которого называют фасилитатором. Существует три формы консалтинга: "эксперт", "врач/пациент" и "процесс". Большинство консалтинговых организаций специализируются на той или иной форме. Для управления изменениями можно использовать первую и третью формы, а потому о них нужно поговорить подробнее. Консультанты-эксперты приходят в организацию и используют свои знания о том или ином предмете, чтобы объяснить организации, что нужно делать и, если организация с этим соглашается, внедряют свои предложения. В свою очередь консультант по процессам - это тот, кто при помощи комбинации педагогических, развивающих и коммуникативных приемов "вытягивает" ответы из сотрудников организации и обеспечивает им необходимую поддержку при внедрении. Очевидно, разница между этими двумя стилями в том, что контроль находится в руках эксперта, если такового приглашают, или в руках организации, если приглашают "процессного" консультанта. Консультант по процессам исходит из того, что все ответы уже существуют в головах сотрудников организации и что главное - вытащить их на свет божий. Он убежден, что чрезвычайно важно, в чьих именно руках находится контроль, и что контроль, во что бы то ни стало должен находиться в руках организации, а не консультанта, потому что иначе программа, процесс или система остановятся, как только консультант уйдет. По большому счету с этим трудно спорить, но

всегда существуют дополнительные факторы, которые необходимо учитывать в управлении изменениями. Во-первых, управление изменениями не является естественным процессом: это радикальные и фундаментальные изменения, которые могут завести корабль в незнакомые воды, так что встает законный вопрос, действительно ли в настоящее время организация знает все ответы. Во-вторых, поскольку многие участники проекта находились внутри организации на протяжении возможно, ряда лет, они в некоторой степени потеряли способность видеть лес за деревьями, иными словами, преодолевать стереотипы мышления. Это ни в коей мере не упрек: ведь все мы в соответствующих обстоятельствах становимся такими. В-третьих, хотя организации и процессы в них различны, но в том, что касается управлению изменениями, многому можно научиться на опыте других. У консультантов, проводящих управление изменениями для других клиентов, такой опыт есть. Эти аргументы достаточно сильны, но нельзя забывать, как важно, чтобы контроль находился в нужных руках, т.е. внутри организации. Итак, мы пришли к выводу, что самая лучшая форма консультаций при управлении изменениями - процессная с элементами экспертной, используемой правильно и очень осторожно, чтобы контроль оставался в нужных руках. Сочетание необходимых для такого подхода качеств встречается довольно редко.

Внешний консультант своими полезными идеями и навыками может внести вклад в проект изменений, но для неискушенных клиентов здесь есть одна - две ловушки, которые могут использовать не вполне порядочные консультанты. Во-первых, консалтинговая фирма должна показать глубокое понимание управления изменениями и его роли в преобразовании и развитии организации. Во-вторых, необходима ясная и четкая методика, открыто сформулированная и доступная для обсуждения. Остерегайтесь тех, кто говорит, будто каждый случай особенный и метод будет зависеть от обстоятельств. Это означает, что никакого метода, а возможно, и опыта, у них нет. В-третьих, консультант должен суметь научить сотрудников общему подходу, а также конкретным методам и приемам, необходимым для полноценного и эффективного управления изменениями. В-четвертых, поскольку процесс изменения управляется сверху, в то время как проект выполняется людьми с более низких уровней иерархии, важно обеспечивать связь и обмен информацией между всеми участниками. Хотя это можно сделать при помощи внутренних ресурсов, часто внешние консультанты могут оказаться здесь очень полезными, потому что они более четко видят потребность в этом и имеют все необходимые навыки для обеспечения слаженной работы.

Инструменты анализа системы управления и управления изменениями. Для выполнения работ на различных шагах ССВ могут использоваться следующие инструменты:

6. схемы - на этапах ДИАГНОСТИКА и ПРОЕКТИРОВАНИЕ (Системная карта, Схема ВХОДА-ВЫХОДА, Схема причин, Схема влияния, ...) см. Рис.;
7. совещания (для контактов с обладателем проблемы);
8. анкетирование, метод экспертных оценок (для вовлечения работников хозяйствующего субъекта и специалистов других организаций в процесс);
9. дерево целей, ограничения, критерии (на шагах Определение целей, ограничений и Формирование критериев);
10. мозговой штурм, опыт других организаций, фиксирование идей (на шаге Разработка вариантов);
11. инструменты финансового анализа и моделирования - на этапах ДИАГНОСТИКА и ПРОЕКТИРОВАНИЕ (финансовый анализ, точка безубыточности, финансовый профиль проекта, методы оценки инвестиционных проектов, бюджет, ...);
12. матрица сравнения вариантов на шаге Оценка вариантов;
13. возможные стратегии изменений при выборе стратегии изменений;
14. средства планирования при разработке Программы изменений.

3. Точность систем управления.

Точность САУ оценивается в установившемся режиме по величине установившейся ошибки при типовых воздействиях. При анализе точности систем рассматривается установившийся режим, так как текущее значение ошибки резко меняется вследствие наличия переходных процессов и не может быть мерой точности.

Рассмотрим систему представленную на рис. 1.

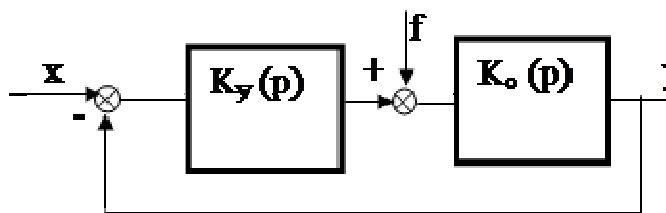


Рис. 1

На схеме приняты следующие обозначения: $K_y(p)$

– передаточная функция устройства управления; $K_o(p)$

– передаточная функция объекта управления; f

– возмущающее воздействие; x

– задающее воздействие;

– регулируемая величина.

Ошибка по задающему воздействию равна $e(t) = x(t) - y(t)$.

Изображение ошибки равно

$$\varepsilon(p) = x(p) - y(p) = x(p) \frac{1}{1 - K_p(p)} = x(p) K_\varepsilon(p). \quad (1)$$

Установившееся значение ошибки определяется с помощью теоремы о конечном значении функции

$$\varepsilon_x = \lim_{p \rightarrow 0} p \varepsilon(p) = \lim_{p \rightarrow 0} p x(p) K_\varepsilon(p). \quad (2)$$

Ошибка по возмущению воздействию равна $e(t) = -y(t)$, т.е. равна изменению регулируемой величины под действием возмущения при отсутствии входного воздействия. В общем случае как задающее, так и возмущающее воздействия являются сложными функциями времени. При определении ошибок пользуются типовыми воздействиями, которые с одной стороны соответствуют наиболее тяжелым режимам работы системы и, вместе с тем, достаточно просты для аналитических исследований.

Кроме того, типовые воздействия удобны для сравнительного анализа различных систем, и соответствуют наиболее часто применяемым законам изменения управляющих и возмущающих воздействий.

1. 6 Лекция №7 (2 часа).

Тема: «Синтез линейных систем управления»

1.6.1 Вопросы лекции:

1. Основные понятия синтеза систем управления и общие принципы синтеза их алгоритмической структуры.

2. Случайные процессы и возмущения в СУ.

1.6.2 Краткое содержание вопросов:

1. Основные понятия синтеза систем управления и общие принципы синтеза их алгоритмической структуры.

Для решения задачи синтеза алгоритмической структуры должны быть известны передаточная функция $W_o(p)$ объекта управления, возмущения $x_в$, действующие на входе и выходе объекта, а также помехи, возникающие в каналах задания и измерения (рисунок 9.15, а, б).

В простейшем случае, когда возмущающие воздействия на объект отсутствуют, управление можно осуществлять по разомкнутой схеме (рисунок 9.15, а). Если при этом

передаточную функцию $W_y(p)$ управляющего устройства принять равной

$$W_y(p) = \frac{1}{W_o(p)}$$

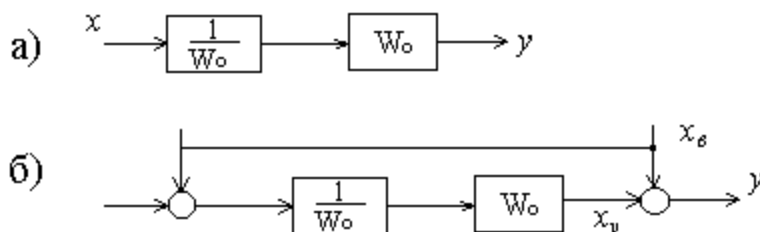


Рисунок 9.15 Простейшая структурная оптимизация САУ (а – при отсутствии возмущений, б – с возможностью полной компенсации возмущения)

то обеспечится полная (структурная) компенсация инерционности объекта, и система управления будет практически мгновенно воспроизводить на выходе объекта задающее воздействие.

Если на объект действует возмущение $x_в$, которое поддается измерению, то теоретически можно синтезировать идеальную разомкнутую систему управления с полной компенсацией возмущения (рисунок 9.15, б). Причем, передаточная функция,

обеспечивающая полную компенсацию инерционности объекта, оказывается наилучшей и для компенсации возмущения x_θ . Действительно, при выполнении условия

$$W_\gamma(p) = \frac{1}{W_\theta(p)} \quad (9.27)$$

всегда $W_\theta(p)W_\gamma(p) = 1$, поэтому полезная составляющая x_y на выходе объекта будет полностью уравнивать возмущение x_θ .

Однако, возмущение x_θ как правило, не удастся измерить, и систему управления придется строить по замкнутой схеме или по принципу обратной связи. Для отыскания структуры идеальной замкнутой системы можно использовать идею косвенного измерения возмущения x_θ с помощью модели объекта $W_{om}(p)$ (рисунок 9.16, а). Очевидно, что при:

$$W_{om}(p) = W_\theta(p), \quad (9.28)$$

вычисляемый на выходе модели (см. штриховые стрелки) сигнал

$$X_{om} = Y - X_{pm} = (X_f + X_s) - X_{pm} = X_s, \quad (9.29)$$

является косвенно измеренным возмущением x_θ , и его можно, как и в предыдущей схеме (рисунок 9.16, б), ввести в управляющее устройство с передаточной функцией $1/W_o(p)$ и, таким образом, снова получить идеальную разомкнутую структуру. В ней, в соответствии с правилами структурных преобразований, сигнал x_{um} можно перенести на вход управляющего устройства и приложить к сумматору 2. Тогда управляющее устройство $1/W_o$, окажется охваченным внутренней положительной обратной связью, а сигнал после сумматора 1 будет соответствовать сигналу ошибки. Последнее означает, что система стала замкнутой и работает по принципу отрицательной обратной связи с регулятором (рисунок 9.16, а, штриховой прямоугольник).

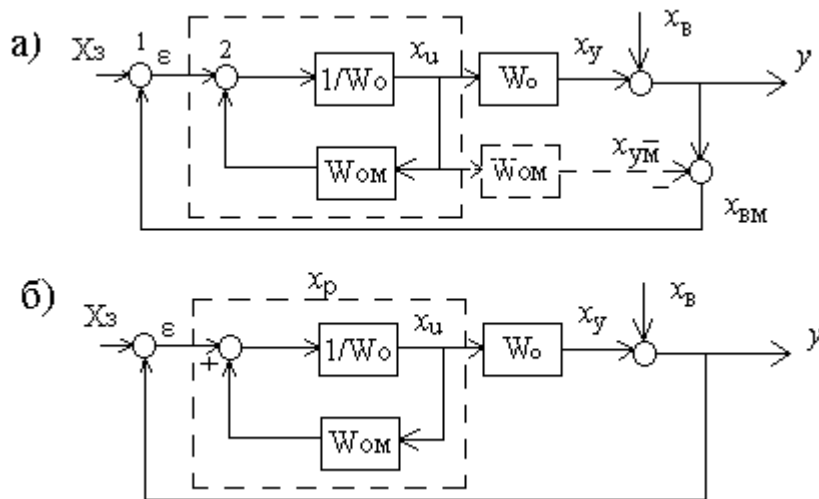


Рисунок 9.16 САУ с косвенным измерением возмущающего воздействия с использованием модели объекта управления

$$W_r(p) = \frac{x_e(p)}{\varepsilon(p)} = \frac{1/W_o(p)}{1 - W_{om}(p)/W_o(p)} \quad (9.30)$$

При точном совпадении модели и объекта регулятор $W_r(p)$ будет работать как пропорциональный с $k_p = \infty$, что соответствует нулевым ошибкам по каналам задания и возмущения.

Используемое в идеальной системе включение последовательно с объектом звена в виде обратной модели объекта является принципиальной основой структурного и параметрического синтеза систем управления, а сам прием называется методом компенсации инерционности объекта.

В практических задачах синтеза чаще всего применяется частичная (параметрическая) компенсация – устранение влияния одной – двух (обычно самых больших) постоянных времени объекта. Для этого последовательно с инерционным объектом:

$$W_o(p) = k_o / (T_{o1}p + 1)(T_{o2}p + 1) \dots (T_{on}p + 1) \quad (9.31)$$

где $T_{o1} > T_{o2} > T_{o3} > \dots > T_{on}$, включают форсирующее звено первого – второго порядка с передаточной функцией:

$$W_x(p) = k_x (T_{x1}p + 1)(T_{x2}p + 1), \quad (9.32)$$

для которого постоянные времени должны быть равны компенсируемому постоянным времени объекта, т. е.:

$$T_{x1} = T_{z1} ; \quad T_{x2} = T_{z2}$$

и передаточный коэффициент:

$$k_x = 1/k_0$$

Следует заметить, что практическая реализация систем с идеальной структурой (рисунок 9.16, б) и применение метода компенсации инерционности объекта связаны с определенными техническими ограничениями и препятствиями, которые не всегда могут быть преодолены. В частности: как правило, невозможно точно реализовать обратную передаточную функцию объекта $1/W_0$. Форсирующие звенья (9.32), используемые для частичной компенсации инерционности объекта, реально имеют свою инерционность. Регулятор с внутренней положительной обратной связью обычно структурно неустойчив или имеет большой передаточный коэффициент, который вызывает нереализуемые управляющие воздействия. Тем не менее, несмотря на невозможность практической реализации системы с идеальной структурой, она является теоретическим пределом, к которому необходимо стремиться при синтезе высококачественных систем управления. Таким образом, принцип структурно – параметрической оптимизации систем управления с обратной связью можно сформулировать следующим образом: управляющее устройство должно содержать динамическое звено с передаточной функцией, равной или близкой обратной передаточной функции объекта.

Установить степень приближения к желаемому теоретическому пределу возможно путём использования различных критериев.

2. Случайные процессы и возмущения в СУ.

Всякая реальная автоматическая система подвержена воздействию случайных возмущений (ошибки измерений, случайные силы и моменты, другие элементы системы и т. д.).

Вследствие случайных внешних воздействий сами процессы управления в автоматической системе приобретают случайный (стохастический) характер. Такие системы называются стохастическими.

Если учесть случайные возмущения, то появляется возможность исследовать точность автоматических систем.

Основы теории стохастических систем были разработаны А. Н. Колмогоровым, В. С. Пугачёвым, Н. Винером, Р. Е. Калманом.

Возмущения, действующие в автоматических системах, являются случайными непрерывными или дискретными величинами и случайными функциями времени.

Непрерывнозначная случайная величина a характеризуется плотностью распределения

вероятности

(a)

, а дискретная $a_i (i = 1, 2, \dots, n)$ – вероятностями её значений.

На практике применяют более простые (неполные) характеристики: математическое ожидание (среднее значение) m_a и дисперсию D_a .

Случайная функция (процесс) распределения вероятности $(x(t_1$

$X(t)), \dots,$

полностью характеризуется конечномерными плотностями

$(t \dots))$ при m .

Марковские случайные процессы полностью характеризуются плотностью вероятности

состояния

(x, t)

и условной плотностью вероятности перехода

$(x, t$

$x, t)$

.

Дискретная случайная последовательность полностью характеризуется заданием конечномерных вероятностей того, что в дискретные моменты времени tk случайный процесс

принимает значение $X(r)(k), r = 1, \dots, N$.

Для полного описания марковского дискретного процесса достаточно иметь вероятности каждого значения

$$P(X_k = r)$$

и условной вероятности перехода

$$P(X_k = r | X_{k-1} = q), \quad r, q = 1, N, \quad k = 1, 2, \dots$$

Практически в инженерных расчётах для описания непрерывных случайных функций ограничиваются двумя вероятностными моментами

– математическим ожиданием $m(t) = M\{X(t)\}$,

– корреляционной функцией $R(t_1, t_2) = M\{X(t_1)X(t_2)\}$, где $X(t)$ – центрированная случайная функция.

При $t_1 = t_2 = t$; $K(t, t) = D(t)$ – дисперсия случайной функции.

$$D(t) = M\{X^2(t)\}$$

Для дискретных случайных процессов применяют аналогичные характеристики: $m(k) = M\{X(k)\}$,

–

При

$$l = k;$$

$$R(k, k) = D(k)$$

$$D(k)$$

$$(k)$$

$$R(k, l) = M\{X(k)X(l)\}$$

– дисперсия.

Для описания векторных случайных процессов в статистической динамике автоматических систем применяют те же характеристики, но вместо скалярных – векторные и матричные: вектор математического ожидания и матрицу корреляционных функций.

$$T T$$

$$\begin{matrix} m_{x1}(t), \dots, m_{xn}(t) \\ \text{о о} \quad T \\ R(t, t) M \quad X(t) X(t) \\ x \quad 1 \quad 2 \quad 1 \quad 2 \end{matrix} \quad m_1(t), \dots, m_n(t), \quad (2.3)$$

$$R_{11}(t, t) \dots R_{1n}(t, t) \\ R_{n1}(t, t) \dots R_{nn}(t, t)$$

$$R_{11}(t, t) \dots R_{nn}(t, t)$$

, (2.4) где
о $X(t)$

$$R_{ij}(t, t)$$

При

$$\begin{matrix} X(t) m(t) \\ x \\) R(t, t) \\ j i 1 \quad 2 \\ t \quad t, i j, \end{matrix}$$

–центрированный вектор; T – знак транспонирования;

–компоненты корреляционной матрицы

$$\begin{matrix} R(t, t) D(t) \\) \\ x \end{matrix} \quad \text{– дисперсионная матрица.}$$

Аналогично корреляционные моменты рассматриваются для дискретных (импульсных) векторных последовательностей, квантованных по времени.

$$k 0, 1 \dots$$

$$T, T \\ i$$

– интервал дискретности.

Случайные процессы могут быть эргодическими и стационарными.

Стационарные случайные процессы характеризуются также спектральными плотностями, связанными с корреляционными функциями преобразованиями Фурье.

Векторные процессы имеют тот же вид, но входящие в них компоненты являются матрицами. Важное значение имеют случайные процессы (t) , (k) , называемые соответственно

непрерывным и дискретным белым шумом с корреляционными функциями вида

$$K(t_1, t_2) = M(t_1) \delta(t_1 - t_2)$$

$$K(q, l) = M(q) \delta_{ql}$$

непрерывного шума; $G^*(q)$

$$G(t_1) = G(t_2) \delta(t_1 - t_2),$$

(2.7) где $G(t)$ – интенсивность белого

$$G(l) = G(q) \delta_{ql},$$

– интенсивность (дисперсия) импульсов дискретной случайной

$$G(t_1) = G(t_2) \delta(t_1 - t_2),$$

Для векторных белых шумов $G(t)$ – матрица интенсивностей, (ковариационная) матрица.

$$G(l, q) = G(q) \delta_{ql},$$

* (q) – дисперсионная

Случайный небелый шум

о $X(t)$

с заданной спектральной плотностью может быть получен из белого шума, если воспользоваться формирующим фильтром.

Случайные возмущения, действующие на автоматическую систему, оказывают различное влияние. Особенно вредными являются возмущения, действующие на различные измерители.

Устранить их влияние на результат управления в автоматической системе принципиально невозможно, так как они порождаются часто теми же физическими явлениями, которые используются в управлении. Поэтому важно уметь оценивать влияние помех на точность работы автоматических систем.

1. 7 Лекция №8 (2 часа).

Тема: «Нелинейные и цифровые системы управления»

1.7.1 Вопросы лекции:

1. Особенности нелинейных систем управления.
2. Типовые нелинейности.
3. Использование микропроцессоров и микро-ЭВМ в системах управления.
4. Методы анализа и синтеза систем управления с ЭВМ в качестве управляющего устройства.

1.7.2 Краткое содержание вопросов:

1. Особенности нелинейных систем управления.

Методика исследования нелинейных систем методом фазовой плоскости включает в себя следующие этапы:

1. Переход от исходного дифференциального уравнения второго порядка(1), описывающего динамику системы к системе двух дифференциальных уравнений первого порядка в форме Коши(2). Выделение фазовых переменных x и y , где x – отклонение выходной величины от установившегося режима ($x_1=x$), y – скорость изменения выходной величины ($x_2=y$).

$$\frac{d^2 x}{dt^2} = f\left(x, \frac{dx}{dt}\right) \quad (1)$$

$$\begin{cases} \frac{dx}{dt} = y \\ \frac{dy}{dt} = f(x, y) \end{cases} \quad (2)$$

2. Исключение времени, путем деления второго уравнения системы на первое(3).

$$\frac{dy}{dx} = \frac{Q(x, y)}{P(x, y)} = R(x, y) \quad (3)$$

3. Нахождение уравнений линий переключения управляющего воздействия и выделение областей, где нелинейную систему можно рассматривать как линейную. Решение дифференциальных уравнений для каждой выделенной области.

4. Построение фазовых траекторий в соответствующих областях.

5. Анализ устойчивости и качества нелинейной системы.

Рассмотрим пример исследования методом фазовой плоскости релейной системы автоматического управления углом поворота вала двигателя. Структурная схема системы представлена на рис.15.

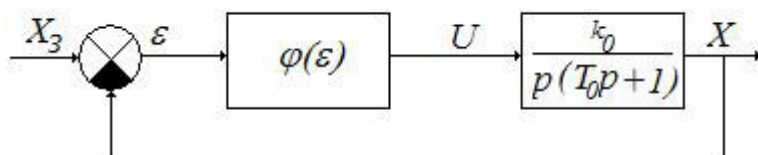


Рис.15. Структурная схема релейной системы

Здесь $\varphi(\varepsilon)$ – кусочно-линейная статическая характеристика нелинейного элемента, k_0, T_0 – коэффициент усиления и постоянная времени двигателя, X – угол поворота вала исполнительного двигателя, X_3 – подлежащее отработке заданное значение X .

$$\varphi(\varepsilon) = \begin{cases} U_{\text{нп}}, \varepsilon \geq 0 \\ -U_{\text{нп}}, \varepsilon \leq 0 \end{cases}$$

1. Рассмотрим случай, когда – идеальное реле (рис.16а).

Представленная на рис.15 схема, описывается следующей системой уравнений:

$$\begin{cases} p(T_0 p + 1)X = k_0 U \\ U = \varphi(\varepsilon) \\ \varepsilon = X_s - X \end{cases} \quad (4)$$

Исключив промежуточные переменные, получим одно уравнение: $p(T_0 p + 1)X = k_0 \varphi(X_s - X)$

или

$$T \frac{d^2 x}{dt^2} + \frac{dx}{dt} = k_0 \varphi(X_s - X) \quad (5)$$

Возьмем частный случай $X_s = 0$, тогда исходя из этого $\varepsilon = -X$. Получим систему двух дифференциальных уравнений первого порядка:

$$\begin{cases} \frac{dx}{dt} = y \\ T_0 \frac{dy}{dt} = -y - k_0 \varphi(\varepsilon) \end{cases} \quad (6)$$

Для $X_s \neq 0$ система (6) не изменится, если рассматривать X как координату отклонения от заданного значения.

Для получения уравнения фазовых траекторий разделим одно уравнение на другое. Исключим время, разделив второе уравнение на первое:

$$T_0 \frac{dy}{dx} = -k_0 \frac{\varphi(x)}{y} - 1 \quad (7)$$

Согласно статической характеристике идеального реле $\varphi(\varepsilon)$ может принимать только постоянные значения $+U_{\text{нр}}, -U_{\text{нр}}$. Для каждого из этих значений $\varphi(\varepsilon)$ уравнение (7) является линейным и легко решается:

$$T_0 \frac{dy}{dx} = -k_0 \frac{U_m}{y} - 1$$

$$T_0 \frac{dy}{dx} = k_0 \frac{U_m}{y} - 1$$

Его решение имеет вид:

$$x = -T_0(y + k_0 U_m \ln(y - k_0 U_m)) + C_1, \text{ при } \varphi(x) = U_m \quad (8)$$

$$x = -T_0(y - k_0 U_m \ln(y - k_0 U_m)) + C_1, \text{ при } \varphi(x) = -U_m \quad (9)$$

где постоянная интегрирования $C_1 = T_0(y_0 + k_0 \varphi(x) \ln(y_0 - k_0 \varphi(x))) + x_0$

, x_0, y_0 – начальные значения фазовых переменных. На рис.16 представлены графики фазовой траектории и изменения управляющего воздействия для этого случая. Линия переключения реле совпадает с осью координат и ее уравнение имеют вид $x=0$ ($\varepsilon=0$).

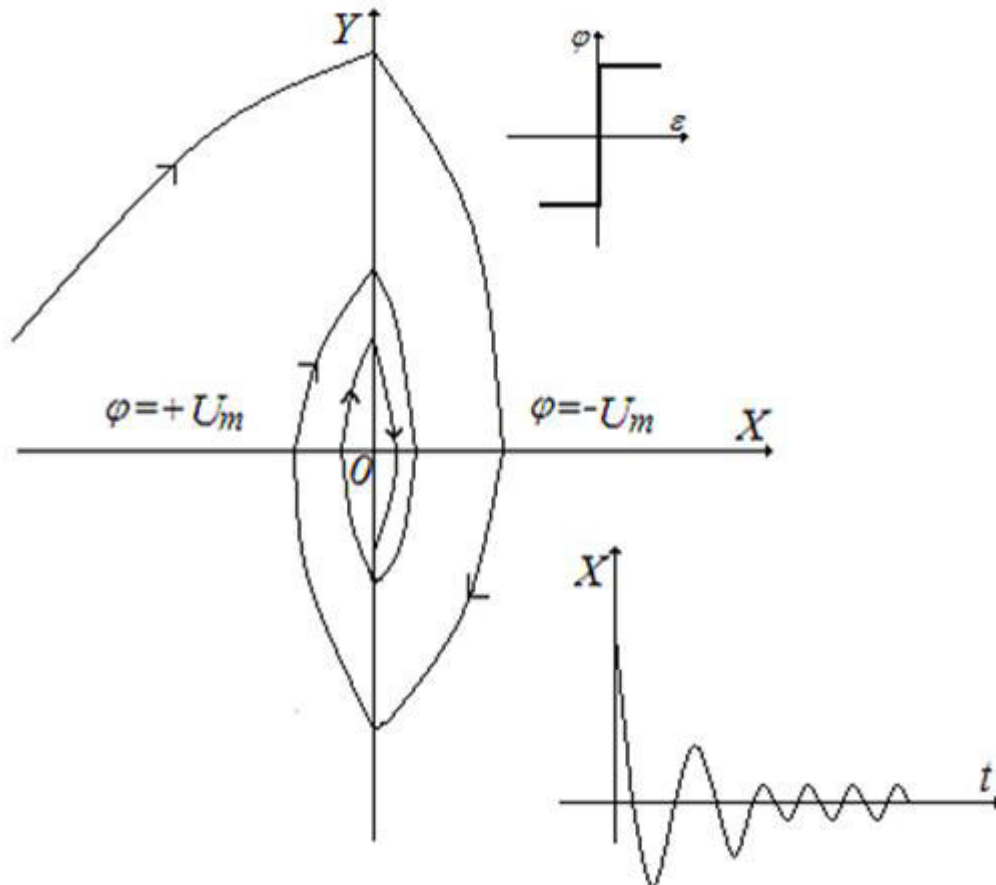


Рис.16. Вид фазовой траектории для системы с идеальным реле.

Анализируя вид фазовой траектории можно сделать вывод о том, что система не имеет установившегося значения. Имеет место режим автоколебаний. Задающее и возмущающее воздействия отрабатываются с максимальным быстродействием, так как управляющее воздействие принимает максимальные значения $+U_m, -U_m$.

Рассмотрим случай, когда –

$$\varphi(x) = \begin{cases} U_m, & x > c; \\ 0, & |x| < c; \\ -U_m, & x < -c; \end{cases}$$

реле с зоной нечувствительности (рис.1с).

В данном случае $\varphi(x)$ кроме постоянных значений $+U_m, -U_m$ может принимать значение равное 0. При $\varphi(x) = 0$ уравнения (7) принимает вид прямой (движение объекта по инерции, так как $U = 0$):

$$T_0 \frac{dy}{dt} = 1,$$

его решение

$$x = T_0(y_0 - y) + x_0 \quad (10)$$

При $-c < x < c$, $U = 0$,

следовательно уравнение линии переключения для этого случая представляет собой следующую зависимость:

$$\begin{aligned} x &> c, \quad U = +U_m \\ x &= \pm c, \quad \text{при} \quad x < -c, \quad U = -U_m \end{aligned} \quad (11)$$

На рис.17 представлен вид фазовой траектории. Отрезок оси абсцисс между линиями переключения представляет собой *особый* отрезок, определяющий зону движения системы по инерции из-за нечувствительности реле.

Если ширина зоны нечувствительности реле достаточно большая, то система (объект) может “застрять” в этой зоне, как показано на рис.17.

Если уменьшить зону нечувствительности реле, например, с целью уменьшения установившейся ошибки, то система перейдет в режим автоколебаний, так как они будут “проскакивать” зону нечувствительности.

Система с таким фазовым портретом устойчива в целом, но неасимптотически из-за наличия зоны нечувствительности реле. Она имеет установившуюся ошибку, максимальное значение которой, определяется зоной нечувствительности реле.

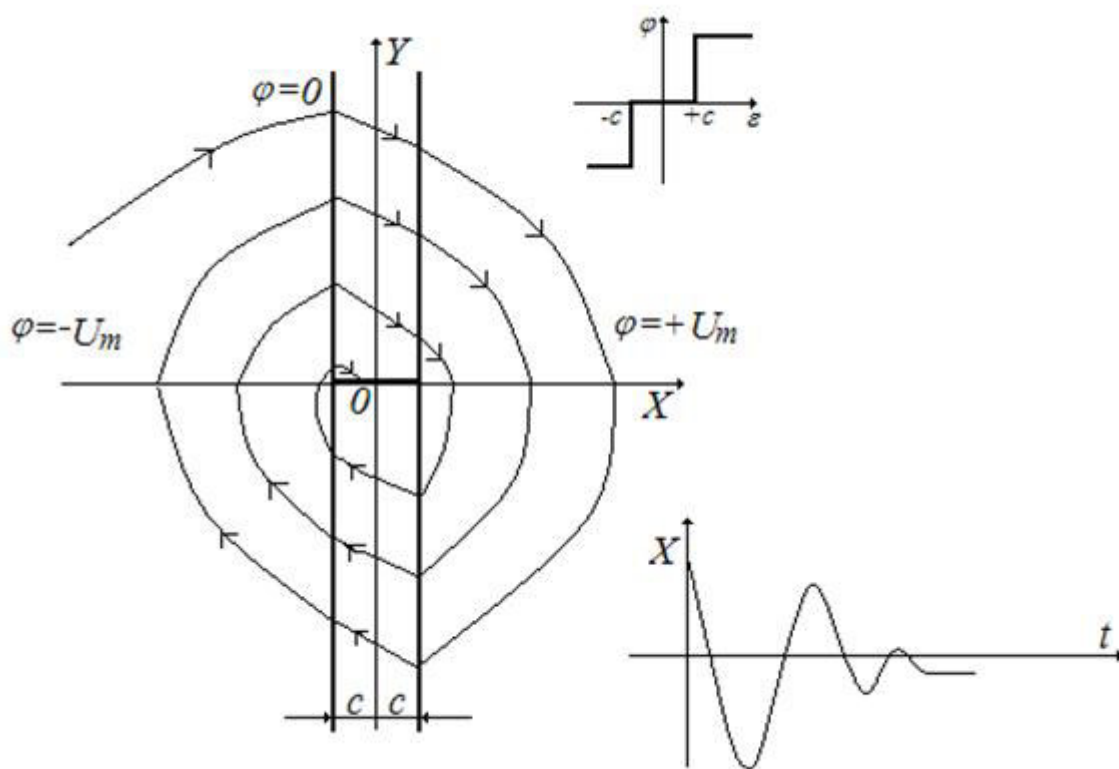


Рис.17. Вид фазовой траектории для системы, имеющей реле с зоной нечувствительности.

Для реле с гистерезисом (рис.1в)

$$\varphi(x) = \begin{cases} U_m, & x > b, x > 0; \\ -U_m, & x < b; \\ U_m, & x > -b, x < 0; \\ -U_m, & x < -b. \end{cases}$$

уравнение линий переключения будет

$$x = \begin{cases} b, & y > 0 \\ -b, & y < 0 \end{cases} \quad (12)$$

Фазовый портрет такой системы представлен на рис.18. Здесь присутствует устойчивый предельный цикл, что говорит о неустойчивости системы в малом.

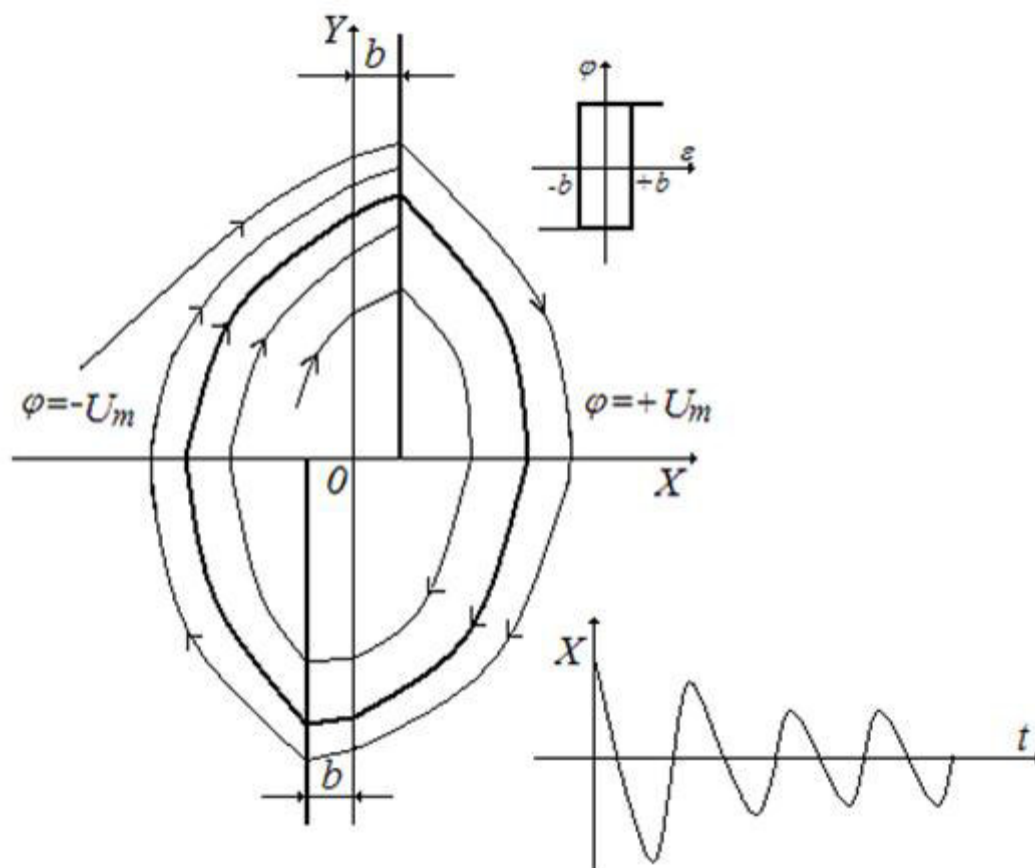


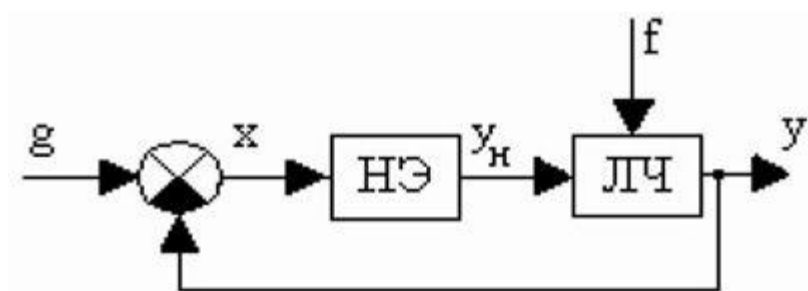
Рис.18. Вид фазовой траектории для системы, имеющей реле с гистерезисом

2. Типовые нелинейности.

Линейных систем в природе не существует, так как характеристики реальных устройств нелинейные и некоторые из них не могут быть линеаризованы, например, характеристика логического элемента. Кроме того, есть системы, например релейные, адаптивные, в которых принципиально необходимо учитывать нелинейности.

Нелинейной системой называется такая система, в состав которой входит хотя бы одно звено, описываемое нелинейным уравнением. Такое звено называется нелинейным звеном или нелинейным элементом.

Путём эквивалентного преобразования структурных схем и нелинейных звеньев большое число нелинейных систем можно представить в виде замкнутого контура с последовательным включением нелинейного элемента (НЭ) и линейной части (ЛЧ), как показано на рисунке.

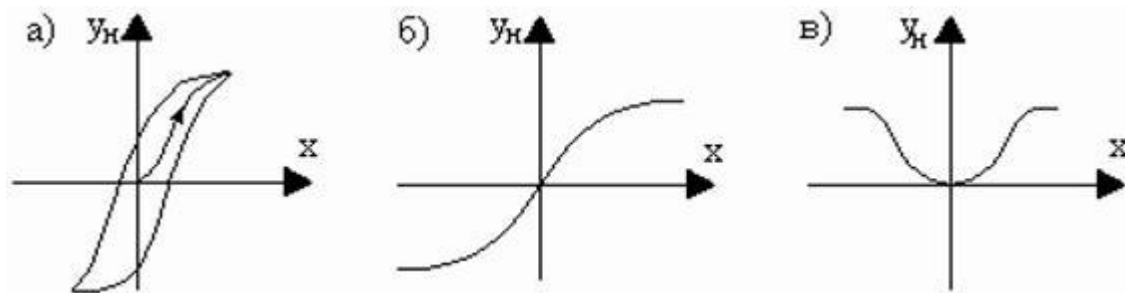


Классификация нелинейных элементов и систем

Нелинейные звенья классифицируются по различным признакам. Наибольшее распространение получила классификация по статическим и динамическим характеристикам, так как в системе чаще всего нелинейности приходится учитывать в виде характеристик. Эти характеристики могут быть как однозначными, так и двузначными (петлевыми), симметричными и несимметричными относительно начала координат.

Различают следующие типы нелинейных звеньев.

Нелинейные звенья с гладкими криволинейными характеристиками. Примеры таких характеристик приведены на рисунке

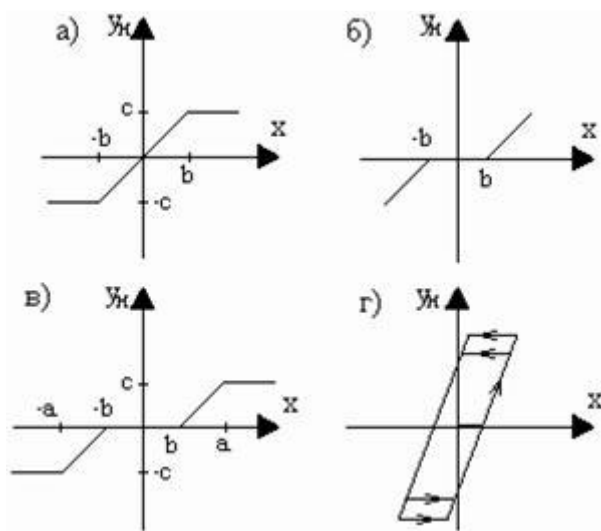


а – гистерезисная. б, в – усилительные.

На рисунке **а** изображена двухзначная гистерезисная (запаздывающая) характеристика. Характеристика **б** отображает насыщение или ограничение и соответствует реальному амплитудному усилителю, а характеристика **в** – реальному усилителю мощности. Характеристики **а** и **б** – нечётно-симметричные, а характеристика **в** – чётно симметричная.

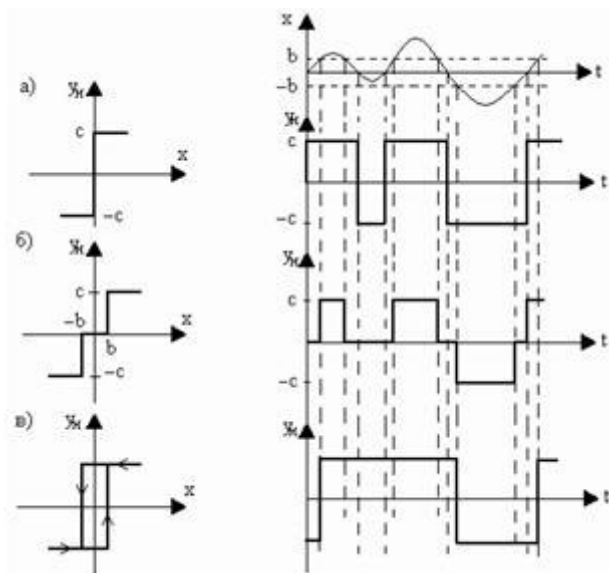
Нелинейные звенья с кусочно-линейными характеристиками.

Некоторые из таких характеристик представлены на рисунке.



Характеристика **а** отображает насыщение, характеристика **б** – зону нечувствительности, а характеристика **в** соответствует звену, обладающему одновременно зоной нечувствительности и насыщением. Характеристика **г** позволяет учесть люфт или зазор кинематической передачи.

Релейные звенья – это элементы, которые на своём выходе выдают конечное число фиксированных значений. Три наиболее типовые релейные характеристики:



А – идеальное двухпозиционное реле

Б – трёхпозиционному реле с зоной нечувствительности

В – Двухпозиционному поляризованному реле.

Кроме того на рисунке показано прохождение непрерывного сигнала через соответствующие типы реле. Откуда следует, что коэффициент передачи реле зависит от величины входного воздействия.

3. Использование микропроцессоров и микро-ЭВМ в системах управления.

В настоящее время в системах автоматического управления используют готовые микроэлектронные интегральные схемы, на основе которых созданы микропроцессоры и микро-ЭВМ. Микропроцессор представляет собой программно-управляемое устройство, осуществляющее процесс обработки поступившей информации и управление этим процессом. Наличие микропроцессорной техники позволило создать и использовать в строительных и дорожных машинах и оборудовании бортовые микропроцессорные системы. Они выполняют программируемые последовательности арифметических и логических операций, управление аппаратурой комплекса, исполнительными устройствами, системой в целом, программами и режимами, сбором, хранением, обработкой и выдачей информации.

В общем случае в состав бортовой микро-ЭВМ входят: устройства входа (сигналы от датчиков) и выхода (управляющие сигналы на исполнительные устройства);

оперативное и постоянное запоминающее устройство; микропроцессор и соединительные элементы.

Основой микропроцессорного управления является модель реального процесса при работе машины (рис. 10.19). Она содержит три основных компонента, к которым относятся модельное состояние (описывающее процесс работы в каждый момент времени), функция модификации состояний (переход от одного модельного состояния к другому на основании сигналов датчиков) и функция предсказания (устанавливающая требуемое модельное состояние и формирующая набор команд на исполнительные органы). Значительную роль играет и стратегия, определяющая последовательность состояний, через которые проходит управляемый процесс. Программным обеспечением бортовой микро-ЭВМ являются программы, осуществляющие связь между машинистом и аппаратным обеспечением и хранящиеся в постоянном запоминающем устройстве. Носителем памяти являются гибкие диски из майлара, на концентрические дорожки (из микроскопических намагниченных участков) которых записывается информация.

Использование бортовых микропроцессорных систем в строительных и дорожных машинах позволяет значительно улучшить качество и безопасность выполняемых работ, увеличить производительность, продолжительность работы машины в исправном состоянии (за счет оптимизации режимов всей машины и ее узлов и агрегатов, связанных с расходом топлива и действующими нагрузками) и вести постоянный контроль за состоянием как отдельных узлов, так и всей машины в целом.

4.1. Цифровой регулятор обладает большей гибкостью, поскольку для изменения какого-либо его параметра достаточно просто изменить число, записанное в ячейке памяти;

4.2. Цифровые сигналы менее чувствительны к шумам и дрейфу параметров оборудования;

4.3. Цифровая обработка сигналов может производиться с высокой точностью и скоростью;

4.4. Сложные алгоритмы обработки сигналов лучше всего реализовать с помощью цифровых устройств, так как при этом точность параметров ограничена лишь длиной слова цифрового процессора;

4.5. Благодаря большим вычислительным возможностям ЭВМ в цифровых системах можно реализовать сложные алгоритмы управления и обеспечить такие переходные процессы, которые недостижимы в непрерывных системах.

5. Аналог дифференциального уравнения записывается в рекуррентной форме по текущим и прошлым значениям входного воздействия и выходной функции.

2. МЕТОДИЧЕСКИЕ МАТЕРИАЛЫ ПО ПРОВЕДЕНИЮ ПРАКТИЧЕСКИХ ЗАНЯТИЙ

2.1 Практическое занятие №1,2,3 (6 часов)

Тема: «Знакомство с интерфейсом и принципами построения моделей в программном комплексе «МВТУ»»

2.1.1 Задание для работы:

1. Знакомство с интерфейсом и принципами построения моделей в программном комплексе «МВТУ»

2.1.2 Краткое описание проводимого занятия:

Программный комплекс "МВТУ" предоставляет исследователю развитой графический интерфейс, позволяющий основную часть создания модели выполнить с помощью мыши, а параметры элементов ввести с клавиатуры. Интерфейс ПК "МВТУ" состоит из основной панели (главного окна), имеющей меню и ряд кнопок управления, воспринимающих щелчки копков мыши, и совокупности окон, в которых строится модель и наблюдаются результаты ее работы.

Основная панель – главное окно программы, появляющееся в верхней части экрана после запуска ПК "МВТУ" (рис.1).

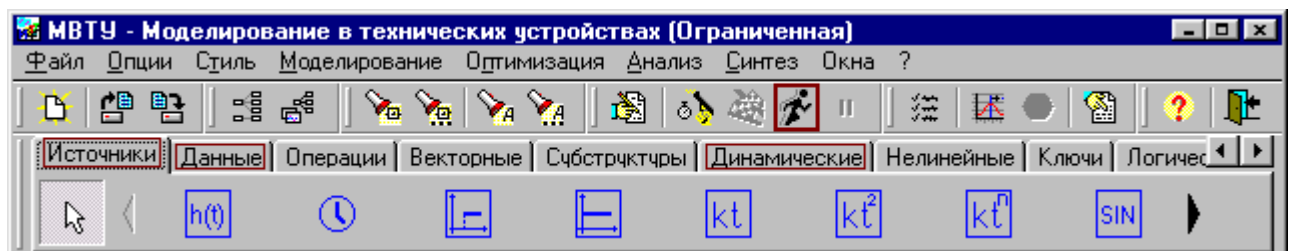


Рис. 1. Основная панель ПК "МВТУ". Выделены кнопка Пуск (Продолжить расчет) и три важных вкладки **Палитры** с наборами элементов (виртуальных блоков), которые будут использоваться при моделировании: **Источники** сигналов (генераторы) – вкладка открыта, **Данные** (индикаторы и регистраторы) и **Динамические** блоки (элементы линейных систем и систем в целом).

Верхняя часть главного окна – панель управления. Она содержит меню и кнопки управления и настройки. Нижняя часть главного окна это т.н. **Палитра** блоков – структурированный набор вкладок, содержащих образцы моделей различных элементов, которые могут быть вынесены в окно модели (схемное окно). При необходимости палитра

блоков может быть перенесена на другое место или вовсе удалена с экрана для освобождения места для схемы модели, индикаторов и др. На рис.1 выделены три важных набора элементарных блоков: генераторы, индикаторы и модели линейных элементов, которые позволяют строить модели линейных систем и объектов и будут подробнее рассмотрены ниже. Кнопки в правой верхней части палитры позволяют просматривать и другие вкладки, с наборами соответствующих блоков, в частности, вкладку **Анимация**.

3. Основные элементы модели

3.1. Генераторы сигналов

Генераторы сигналов размещены на вкладке **Источники** основной панели (рис.2):

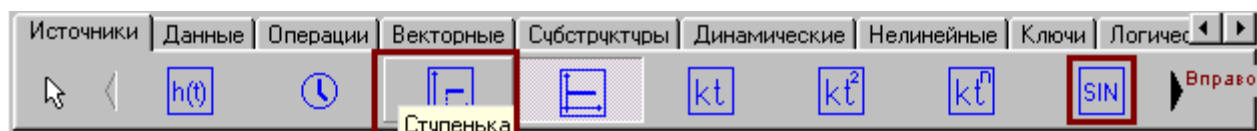


Рис. 2. Часть набора виртуальных генераторов, имеющих на вкладке **Источники**. Важными источниками сигналов являются генераторы ступенчатого и синусоидального сигналов. Кнопка со стрелкой Вправо позволяет посмотреть и другие источники сигналов.

3.2. Элементы линейных систем

Блоки, моделирующие элементы линейных систем и объектов различной сложности помещены на вкладке **Динамические** (рис.3):

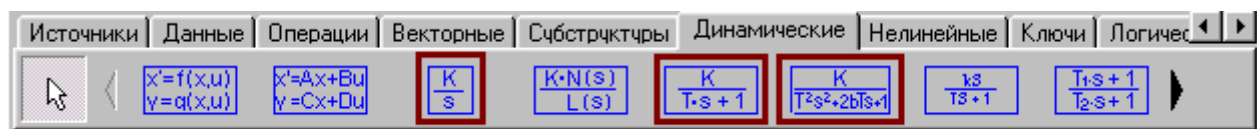


Рис. 3. На вкладке **Динамические** блоки помещены образцы моделей элементов линейных систем. Для начала, обратим внимание на интегратор, апериодическое и колебательное звенья.

3.3. Индикаторы и регистраторы



Рис. 4. Важный регистратор – виртуальный осциллограф (блок Временной график).

Примечание: программа позволяет создавать и собственные варианты индикаторов с помощью инструментов, расположенных на вкладке **Анимация** (в правой части **Палитры**).

3.4. Соединительные линии

Соединительные линии позволяют отобразить взаимодействие между отдельными элементами реальной системы. В ПК "МВТУ" соединительные линии однонаправленные: они передают виртуальные сигналы с выходов блоков на их входы. Это означает, что в моделируемых системах последующие блоки не должны влиять на работу предыдущих блоков. Такое требование следует выполнить при составлении функциональной схемы моделируемой системы, должным образом выделяя ее функциональные элементы. Линии проводятся от одного блока модели к другому с помощью мыши. Пример соединительных линий можно видеть в левом нижнем окне модели рис. 5.

4. Простая модель

На рис.5 показана простая модель, состоящая всего из одного блока – апериодического звена и результаты его исследования, состоявшего в определении реакции этого звена на ступенчатое воздействие, так называемой переходной функции.

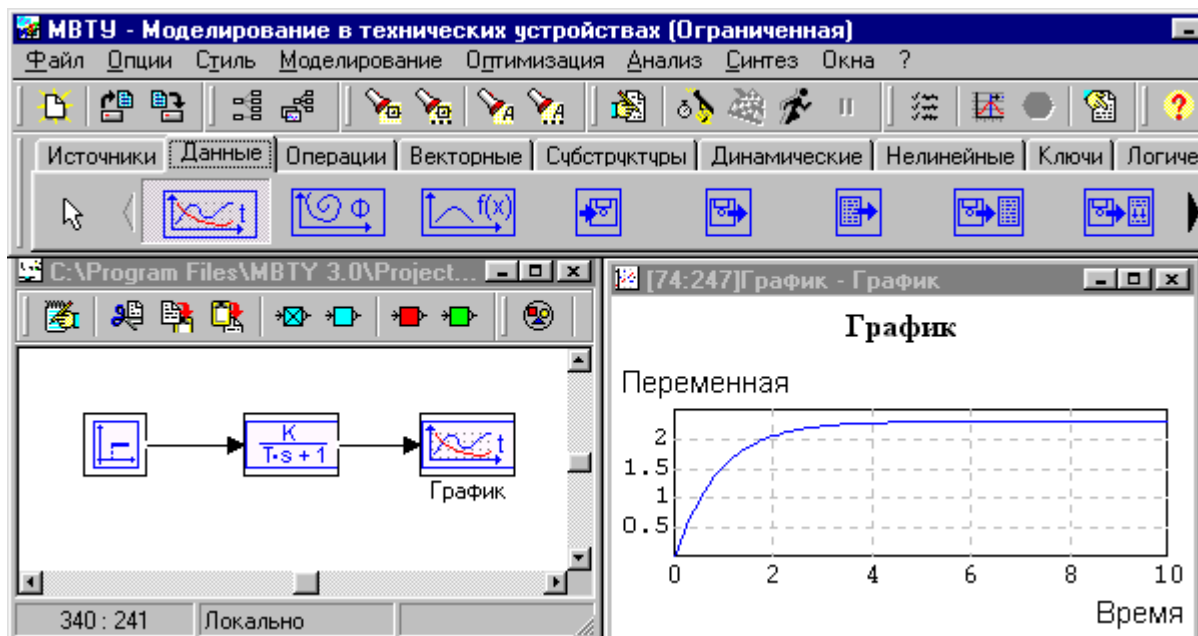


Рис. 5. Определение переходной функции апериодического звена. На левое нижнее окно модели вынесены и соединены друг с другом генератор ступенчатого сигнала, апериодическое звено и осциллограф. При запуске модели, нажатием на кнопку **Пуск** (Продолжить расчет CTRL+ F9) - бегущий

человечек, на осциллографе появляется график реакции звена на ступенчатое воздействие – его переходная функция.

Виртуальный генератор в нулевой момент времени подает на вход апериодического звена ступенчатое единичное воздействие, на которое звено откликается все замедляющимся ростом выходного сигнала. Виртуальный осциллограф позволяет увидеть изменение выходного сигнала звена с течением времени и проанализировать его.

5. Поясняющие надписи.

Сопровождение модели поясняющими надписями позволяет облегчить ее восприятие и работу с ней. В пояснении нужно указать кто, когда и какую модель создал. В "МВТУ" можно создавать пояснения двух видов: **заметку**, текст которой виден вместе с блоками модели и **комментарий**, текст которого открывается в отдельном окне, при двукратном щелчке по квадратному блоку со знаком вопроса. Блоки заметки (без обозначения) и комментария (квадрат со знаком вопроса) «затерялись» в правой части вкладки **Субструктуры** (рис.6):

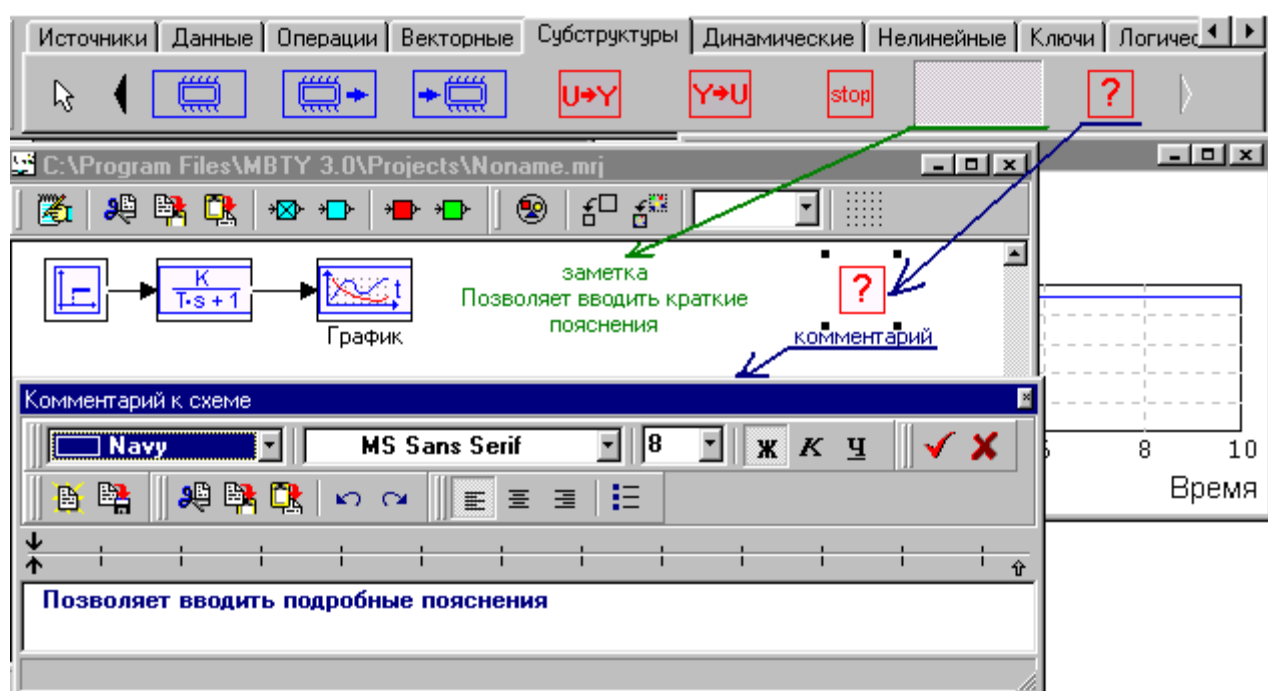


Рис.6. Блоки **заметка** и **комментарий** выносятся на рабочее пространство окна модели с вкладки **Субструктуры**. Внизу показано окно просмотра и редактирования комментария.

2.1.3 Результаты и выводы:

Изучили теоретический материал, выполнили упражнения и ответили на контрольные вопросы.

2.2 Практическое занятие №4,5 (4 часа)

Тема: «Исследование динамических свойств»

2.2.1 Задание для работы:

1. Исследование динамических свойств типовых динамических звеньев

2.2.2 Краткое описание проводимого занятия:

Дифференциальные уравнения и передаточные функции звеньев и систем

Математическое описание систем автоматического управления (САУ) составляется на основе описания отдельных ее звеньев. Объединяя уравнения звеньев с учетом их взаимосвязей, получают уравнение системы [1-5].

В теории автоматического управления приняты определенные формы записи дифференциальных уравнений линейных звеньев.

Дифференциальное уравнение линейного звена (рис. 1.1) в операторной форме имеет вид [2]

$$Q(p)y(t) = R(p)x(t), \quad (1.1)$$

где

$$Q(p) = T_n^* p^n + T_{n-1}^* p^{n-1} + \dots + T_2^* p^2 + T_1^* p + 1,$$

$$R(p) = k_m p^m + k_{m-1} p^{m-1} + \dots + k_2 p^2 + k_1 p + k_0,$$

T_i ($i = 1, 2, \dots, n$) – постоянные времени (сек);

k_j ($j = 1, 2, \dots, m$) – коэффициенты передачи;

$p = d/dt$ – оператор дифференцирования;

n – порядок дифференциального уравнения.

В уравнении (1.1) $Q(p)$ (дифференциальный оператор при выходной величине) называют собственным оператором, а $R(p)$ (дифференциальный оператор при входной величине) – оператором воздействия.

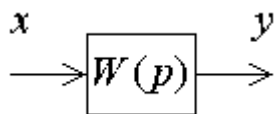


Рис. 1.1. Структурная схема линейного звена САУ

Другой формой записи математического описания звена является запись с помощью передаточной функции.

Отношение оператора воздействия к собственному оператору называют передаточной функцией или передаточной функцией в операторной форме

$$W(p) = \frac{R(p)}{Q(p)} = \frac{k_m p^m + k_{m-1} p^{m-1} + \dots + k_2 p^2 + k_1 p + k_0}{T_n^2 p^2 + T_{n-1}^2 p^{n-1} + \dots + T_2^2 p^2 + T_1 p + 1} \quad (1.2)$$

Используя передаточную функцию, уравнение (1.1) можно записать в виде

$$y(t) = W(p)x(t) \quad (1.3)$$

Наряду с передаточной функцией в операторной форме широко используют передаточную функцию в форме изображений Лапласа.

Передаточной функцией или передаточной функцией в форме изображений Лапласа называют отношение изображения выходной величины к изображению входной величины при нулевых начальных условиях.

Передаточную функцию в форме изображения Лапласа можно получить из передаточной функции в операторной форме, если в последней сделать подстановку $\mathbf{p} = \mathbf{s}$, где $\mathbf{s} = \mathbf{c} + j\omega$ – комплексная величина

$$W(s) = \frac{y(s)}{x(s)} = \frac{R(s)}{Q(s)} = \frac{k_m s^m + k_{m-1} s^{m-1} + \dots + k_2 s^2 + k_1 s + k_0}{T_n^2 s^n + T_{n-1}^2 s^{n-1} + \dots + T_2^2 s^2 + T_1 s + 1}, \quad (1.4)$$

где

$$x(s) = L[x(t)]; y(s) = L[y(t)] \text{ – преобразования Лапласа.}$$

Тогда дифференциальное уравнение в изображениях Лапласа имеет вид

$$Q(s)y(s) = R(s)x(s) \text{ или } y(s) = W(s)x(s). \quad (1.5)$$

Такое сходство рассмотренных выражений для передаточных функций справедливо только при нулевых начальных условиях.

Очень часто при описании оператора дифференцирования и комплексной переменной преобразования Лапласа используется один и тот же символ $\mathbf{p}$, передаточная функция в этом случае имеет один и тот же вид. Однако необходимо помнить, что символ $\mathbf{p}$ при этом имеет различный смысл.

Временные характеристики звеньев и систем

Динамические свойства линейных звеньев и систем автоматического управления в целом могут быть описаны уравнениями, как показано выше, и графическими характеристиками. В теории автоматического применяются два типа таких характеристик – временные и частотные. Эти характеристики могут быть сняты экспериментально или построены по уравнению звена [4].

Переходная или временная характеристика (функция) звена **$h(t)$** представляет собой реакцию на выходе звена, вызванную подачей на его вход единичного, ступенчатого воздействия. Единичное, ступенчатое воздействие (единичная, ступенчатая функция) – это воздействие, которое мгновенно возрастает от нуля до единицы и далее остается неизменным

$$1(t) = \begin{cases} 0 & \text{при } t < 0, \\ 1 & \text{при } t \geq 0. \end{cases}$$

Таким образом

$$h(t) = y(t) \text{ при } x(t) = 1(t). \quad (1.6)$$

Импульсная переходная (временная) характеристика или функция, называемая еще весовой функцией (функцией веса), **$w(t)$** представляет собой реакцию звена на единичный импульс. Единичный импульс (единичная импульсная функция или дельта-функция) – это математическая идеализация предельно короткого импульсного сигнала. Единичный импульс – это импульс, площадь которого равна единице при длительности, равной нулю, и высоте, равной бесконечности

$$\delta(t) = \begin{cases} \infty & \text{при } t = 0, \\ 0 & \text{при } t \neq 0. \end{cases} \quad \int_{-\infty}^{\infty} \delta(t) dt = 1$$

При этом согласно определению

Таким образом

$$w(t) = y(t) \text{ при } x(t) = \delta(t). \quad (1.7)$$

Дельта-функция просто связана с единичной, ступенчатой функцией

$$\delta(t) = 1'(t)$$

Отсюда следует аналогичная связь между весовой и переходной функциями

$$w(t) = h(t) \text{ или } h(t) = \int_0^t w(t) dt$$

. Временные характеристики на основании преобразования Лапласа связаны также с передаточной функцией звена. Переходная характеристика $h(t) = L^{-1}[W(p)/p]$;

импульсная переходная характеристика $w(t) = L^{-1}[W(p)]$.

Частотные характеристики звеньев и систем

Частотные характеристики описывают установившиеся вынужденные колебания на выходе звена, вызванные гармоническим воздействием на входе [4].

Пусть на вход звена (рис. 1.1) подано гармоническое воздействие

$$x(t) = x_m \sin \omega t,$$

где x_m – амплитуда, а ω – угловая частота этого воздействия.

По окончании переходного процесса на выходе этого звена будут существовать гармонические колебания с той же частотой, что и на входе, но отличающиеся в общем случае по амплитуде и фазе

$$y(t) = y_m \sin(\omega t + \varphi),$$

где y_m – амплитуда выходных установившихся колебаний; φ – фазовый сдвиг между входными и выходными колебаниями.

При фиксированной амплитуде входных колебаний амплитуда и фаза установившихся колебаний на выходе звена зависит от частоты колебаний.

Амплитудной частотной характеристикой (АЧХ) звена называется зависимость отношения амплитуд от частоты

$$A(\omega) = \frac{y_m}{x_m};$$

фазовой частотной характеристикой (ФЧХ) звена называется зависимость сдвига фаз от частоты

$$\varphi(\omega) = \varphi$$

При исследовании систем автоматического управления амплитудную и фазовую частотные характеристики удобно строить в логарифмических координатах. Это связано с двумя обстоятельствами. Во-первых, в логарифмических координатах характеристики деформируются таким образом, что возникает возможность упрощенно изображать амплитудные частотные характеристики ломаными линиями. Во-вторых, в логарифмическом масштабе амплитудная частотная характеристика последовательной цепочки звеньев равна сумме амплитудных характеристик отдельных звеньев.

Амплитудно-частотная характеристика в логарифмических координатах (ЛАХ) строится в виде зависимости

$$L(\omega) = 20 \lg A(\omega)$$

от $\lg(\omega)$, называемой логарифмической амплитудной характеристикой (ЛАХ), а фазовая — в виде зависимости φ от $\lg(\omega)$, называемой логарифмической фазовой характеристикой (ЛФХ).

Обыкновенные амплитудная и фазовая характеристики могут быть объединены в одну характеристику — амплитудно-фазовую частотную характеристику $W(j\omega)$, используя $A(\omega)$ и $\varphi(\omega)$ в качестве полярных координат. Амплитудно-фазовую частотную характеристику $W(j\omega)$ можно строить и в прямоугольной системе координат —

в комплексной плоскости. При этом координатами будут проекции вектора $A(\omega)$ на соответствующие оси. Зависимости $U(\omega)$ и $V(\omega)$ называются соответственно действительной (вещественной) и мнимой частотными характеристиками. Аналитические выражения для рассмотренных выше частотных характеристик могут быть легко получены по передаточной функции. Если в выражение передаточной функции звена $W(p)$ подставить $p = j\omega$, то получится комплексная величина $W(j\omega)$, которая представляет собой функцию ω и является амплитудно-фазовой частотной характеристикой (частотной передаточной функцией) звена

$$W(j\omega) = A(\omega)e^{j\varphi(\omega)} = U(\omega) + jV(\omega). \quad (1.8)$$

Тогда справедливы следующие соотношения

$$A(\omega) = \sqrt{U^2(\omega) + V^2(\omega)}, \quad \varphi(\omega) = \arctg \frac{V(\omega)}{U(\omega)}.$$

$$U(\omega) = A(\omega) \cos \varphi(\omega), \quad V(\omega) = A(\omega) \sin \varphi(\omega).$$

Частотные и переходные характеристики взаимосвязаны. Наиболее просто связь между ними определяется для весовой функции с помощью преобразования Фурье

$$W(j\omega) = \int_0^{\infty} w(t)e^{-j\omega t} dt, \quad w(t) = \frac{1}{2\pi} \int_{-\infty}^{\infty} W(j\omega)e^{j\omega t} d\omega.$$

Типовые звенья и их характеристики

В теории автоматического управления вводится понятие типовых звеньев, передаточная функция которых только в определенном частотном диапазоне соответствует реальным звеньям систем управления. Рассматривая характеристики звеньев независимо от их назначения, физического принципа действия, мощности и скорости передаваемых

сигналов, можно выделить ряд типовых звеньев, описываемых обыкновенными линейными дифференциальными уравнениями первого и второго порядков :

колебательные, консервативные, инерционные, форсирующие.

Более сложные линейные звенья могут быть сведены к соединению типовых звеньев. Модели типовых звеньев могут быть представлены в виде дифференциальных уравнений, передаточных функций, а также частотных и временных характеристик.

Апериодическое звено первого порядка

Передаточная функция этого звена
$$W(S) = \frac{k}{TS + 1}$$

Частотные функции этого звена имеют вид

$$W(j\omega) = k / [T(j\omega) + 1]$$

$$A(\omega) = k / \sqrt{T^2 \omega^2 + 1}$$

$$\varphi(\omega) = -\arctg(\omega T)$$

$$L(\omega) = 20 \lg k - 20 \lg \sqrt{T^2 \omega^2 + 1}$$

Временные функции этого звена имеют вид

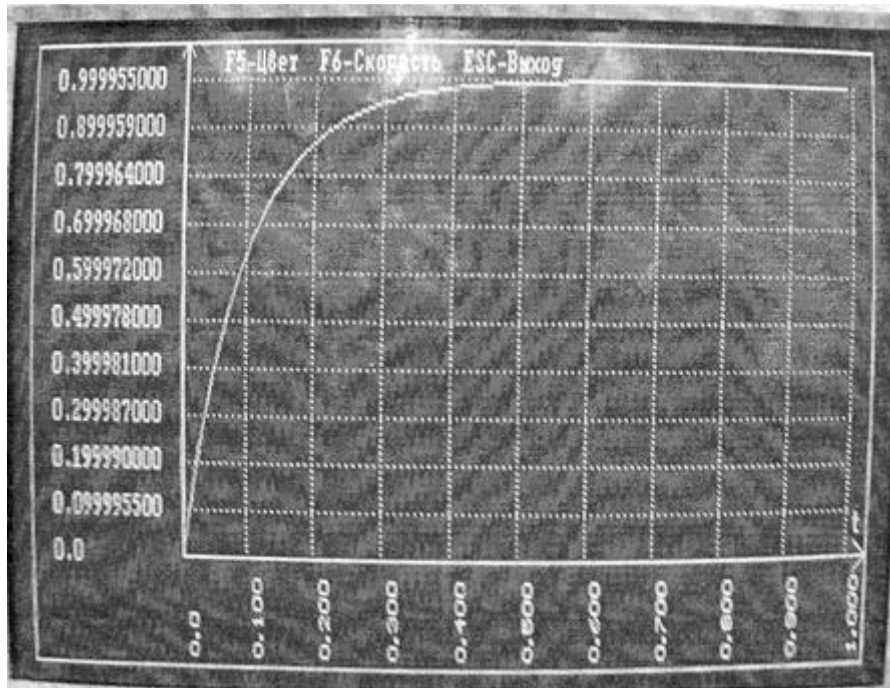
$$h(t) = k \left(1 - e^{-\frac{t}{T}} \right)$$

Ход работы:

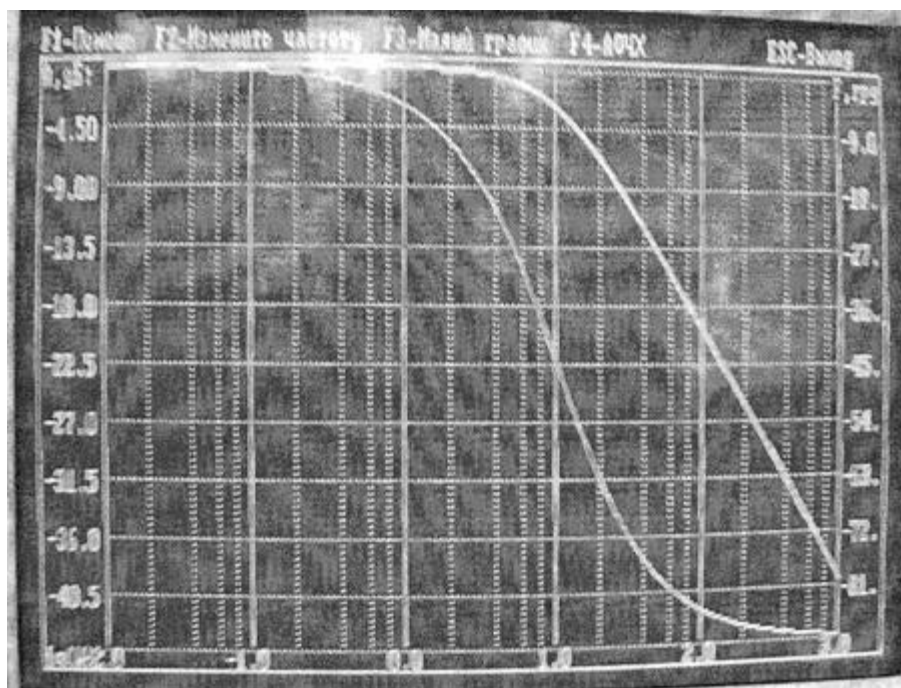
1. Апериодическое звено 1-го порядка

Передаточная функция этого звена
$$W(s) = \frac{k}{Ts + 1}$$

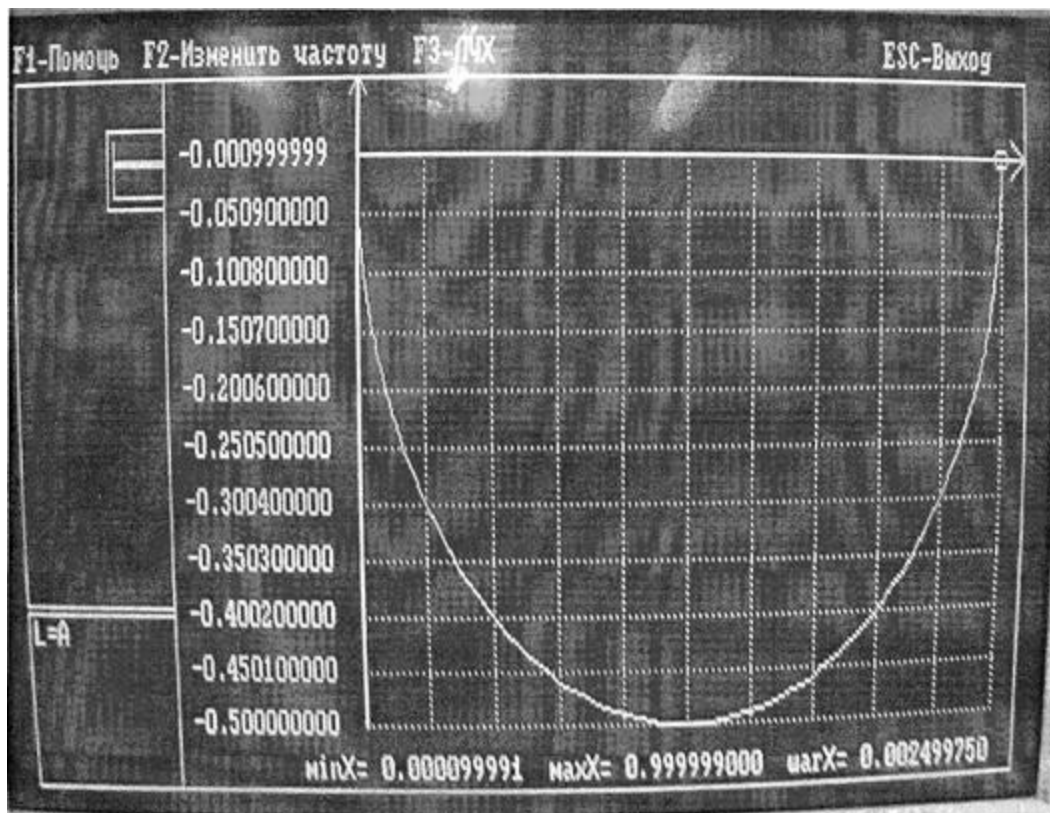
1.1. При начальных условиях $k=1$, $T=0,1$ получаем переходную функцию:



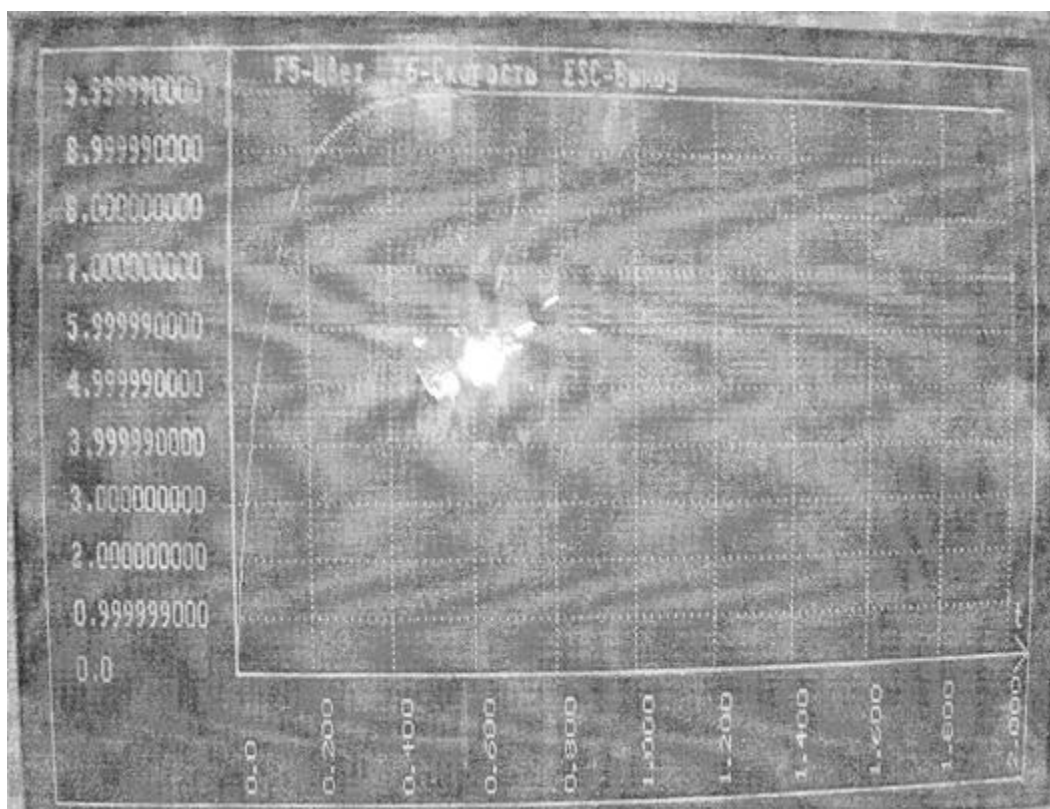
1.2. Логарифмические характеристики ЛАХ(--) и ЛФХ(--):



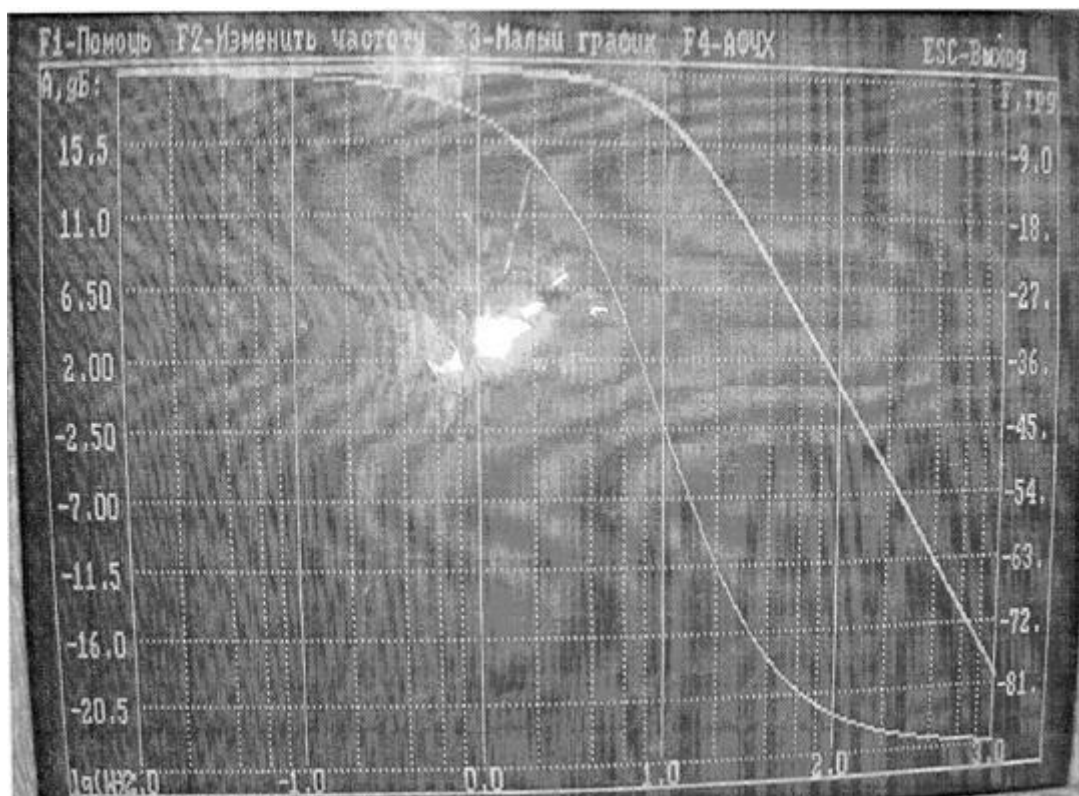
1.3. амплитудно-фазо-частотные характеристики АФЧХ:



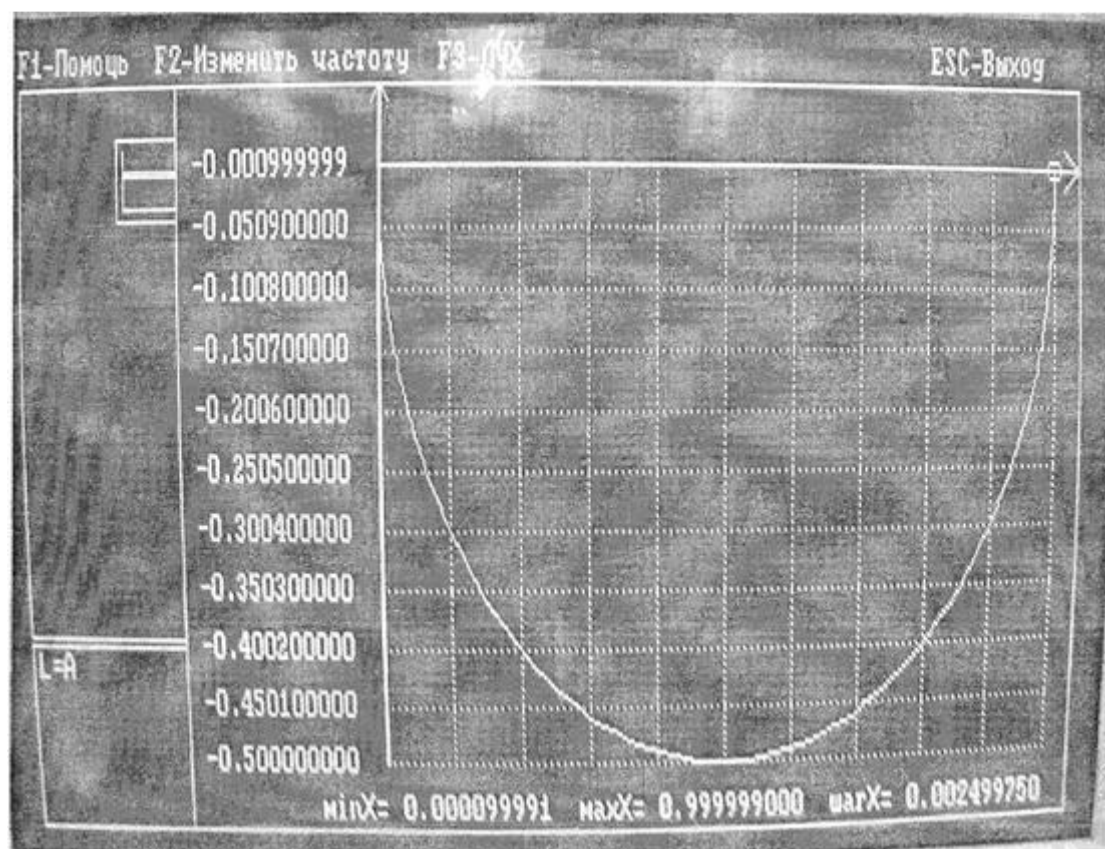
2.1. При начальных условиях $k=10$, $T=0,1$ получаем переходную функцию:



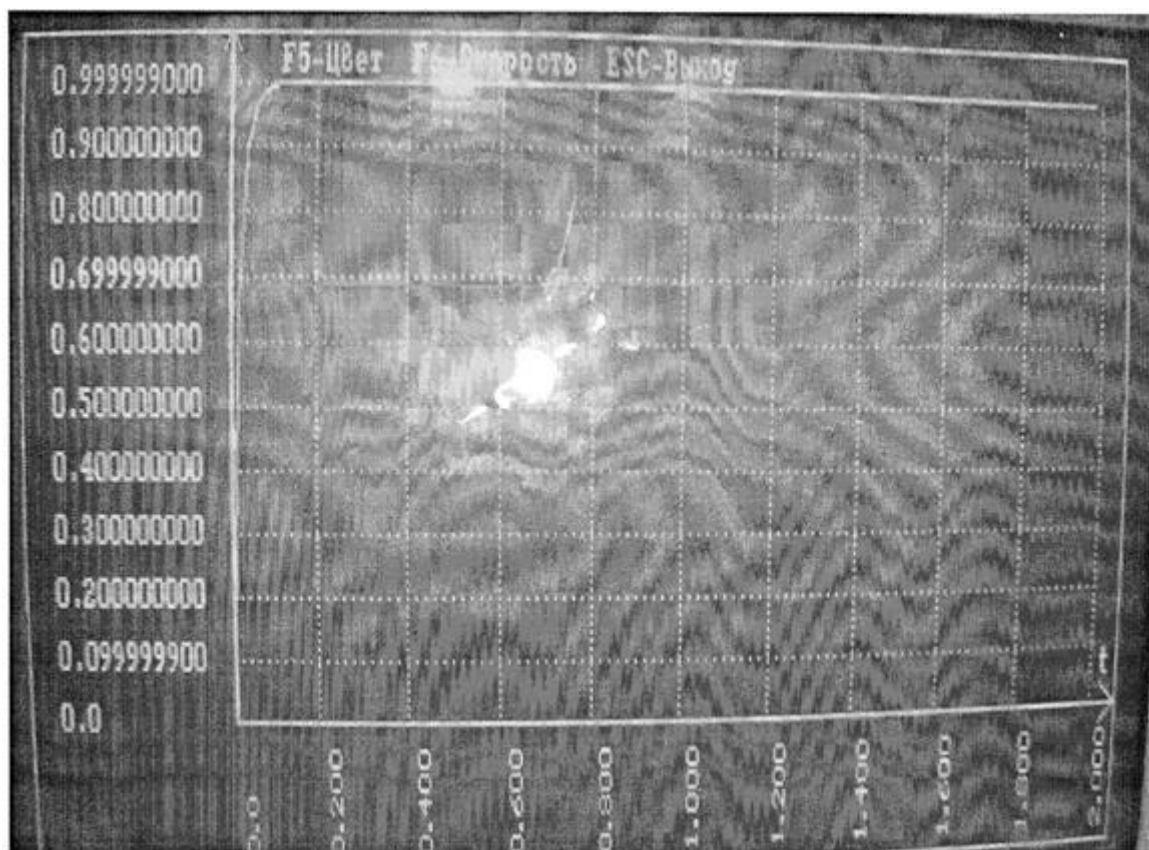
2.2. Логарифмические характеристики ЛАХ(--) и ЛФХ(--):



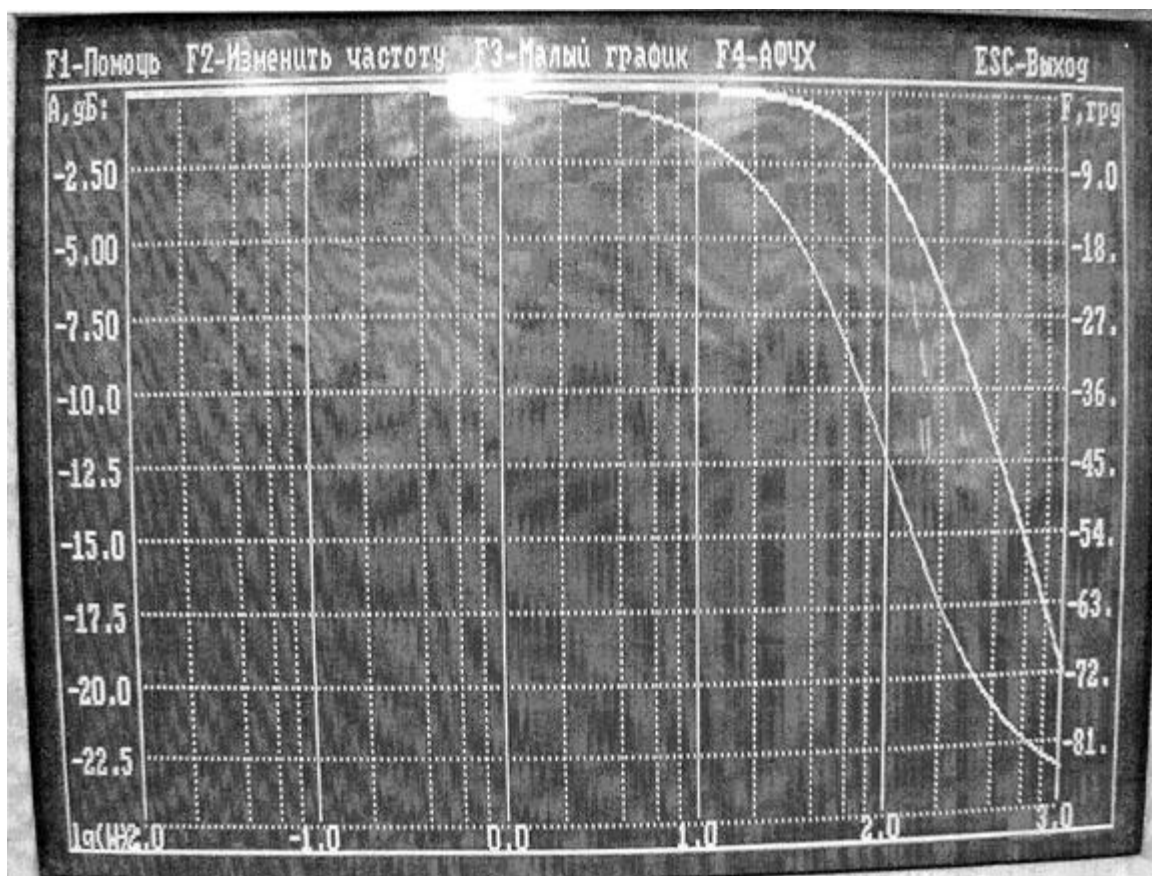
2.3. амплитудно-фазо-частотные характеристики АФЧХ:



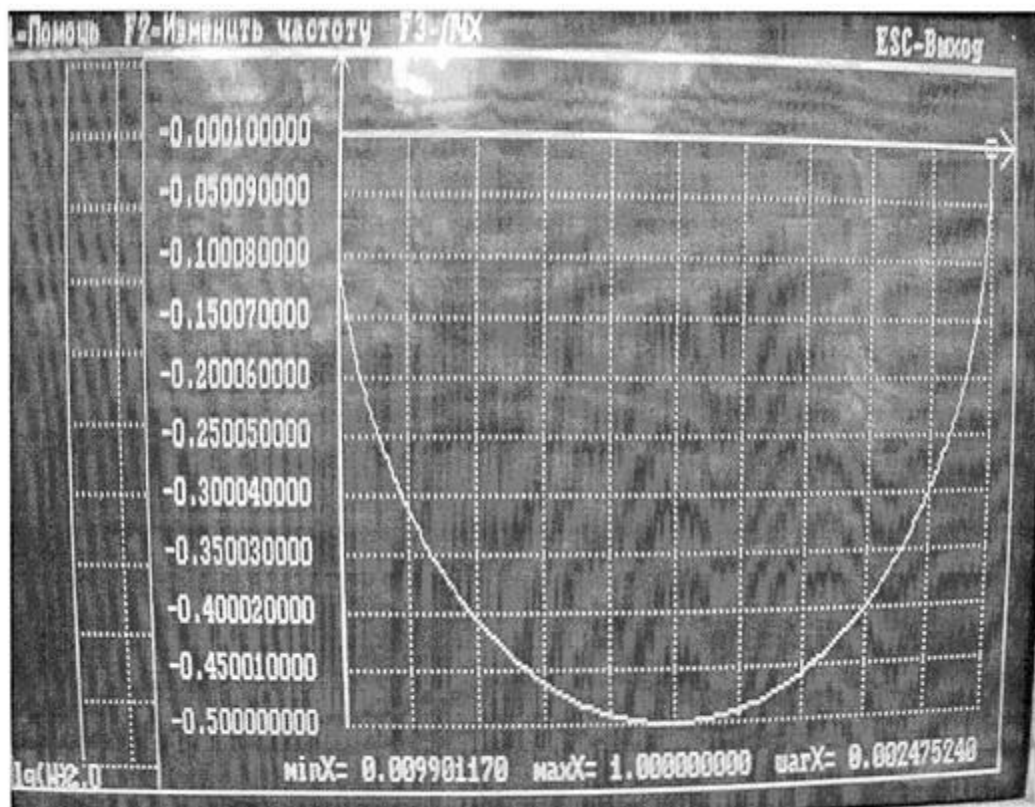
3.1. При начальных условиях $k=1$, $T=0,01$, получаем переходную функцию:



3.2. Логарифмические характеристики ЛАХ(--) и ЛФХ(--):



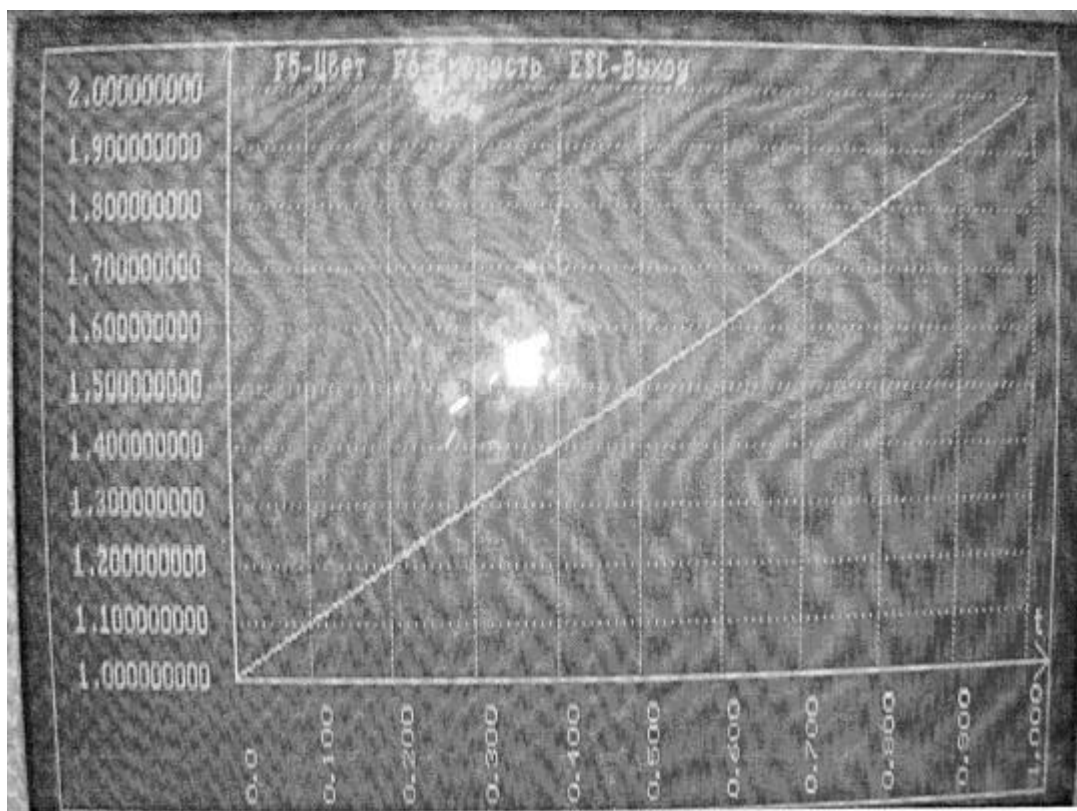
3.3. и амплитудно-фазо-частотные характеристики АФЧХ:



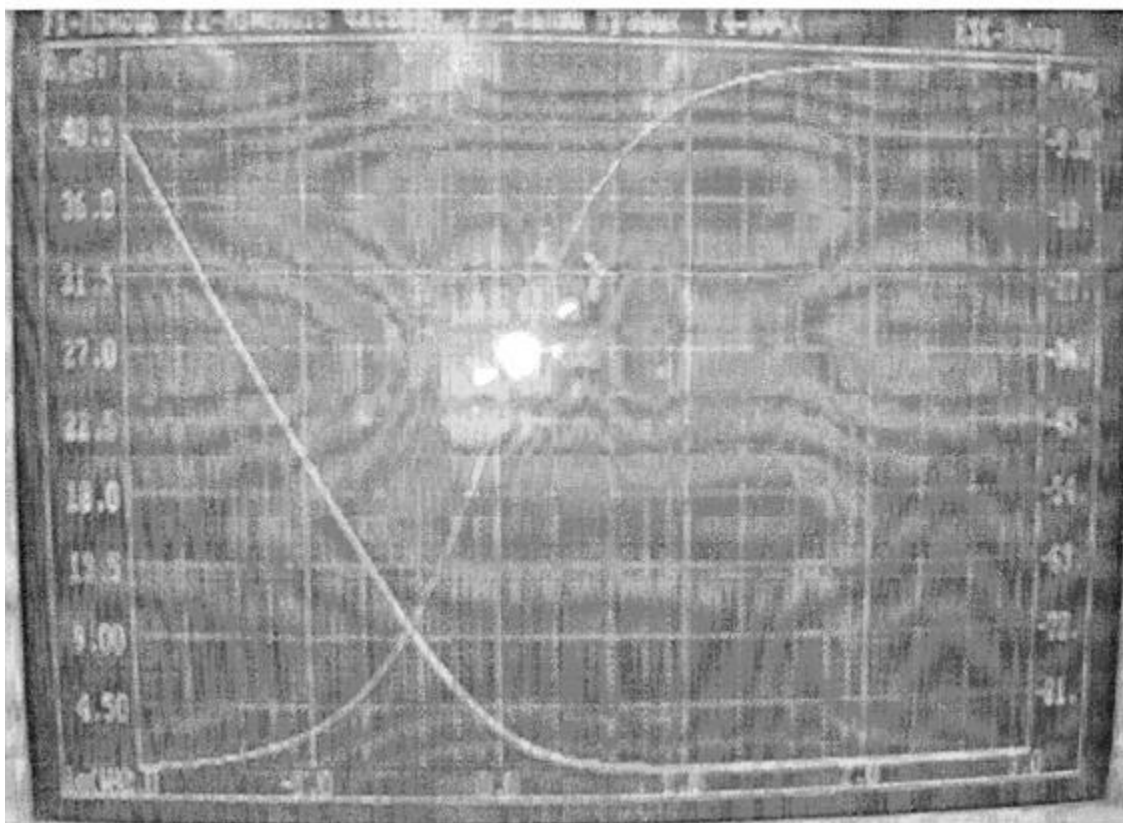
2. Изотропное звено

Передаточная функция этого звена $W(s) = \frac{k}{s} + k_1$

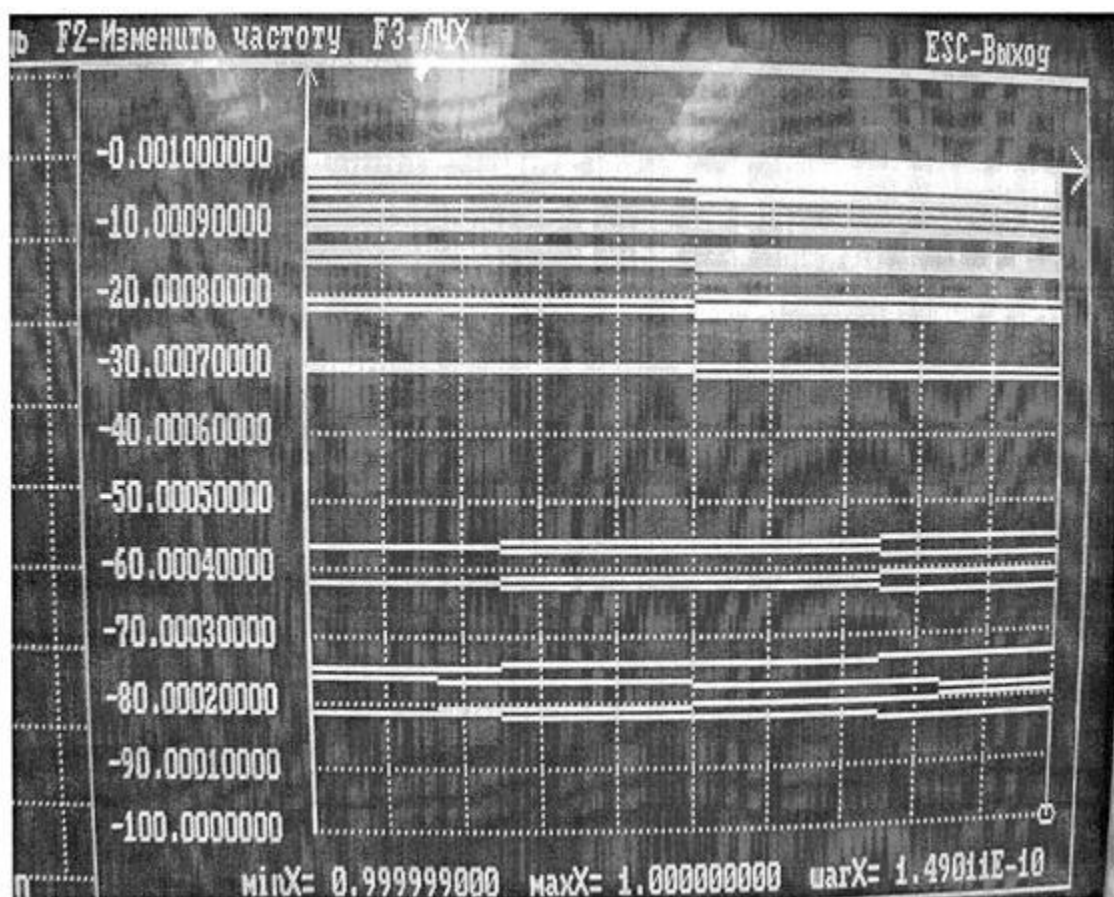
1.1. При начальных условиях $k=1$, $k_1=1$, получаем переходную функцию



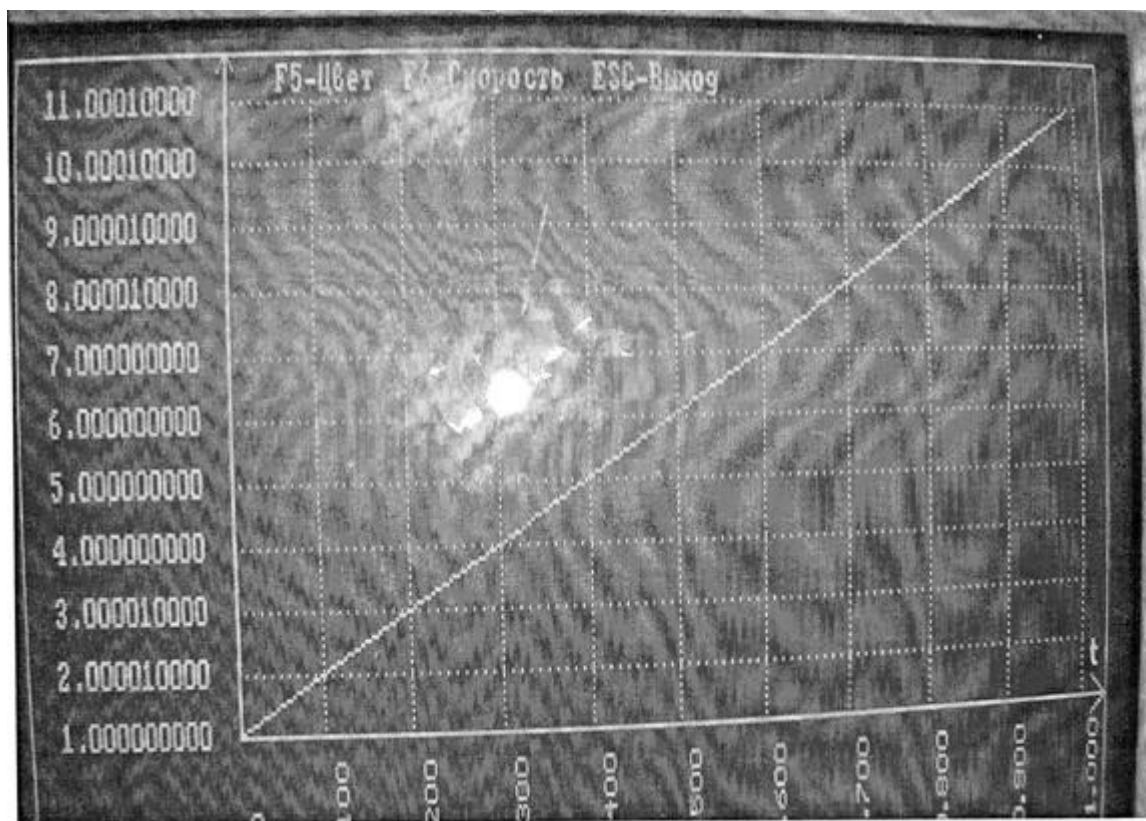
1.2. Логарифмические характеристики ЛАХ(--) и ЛФХ(--):



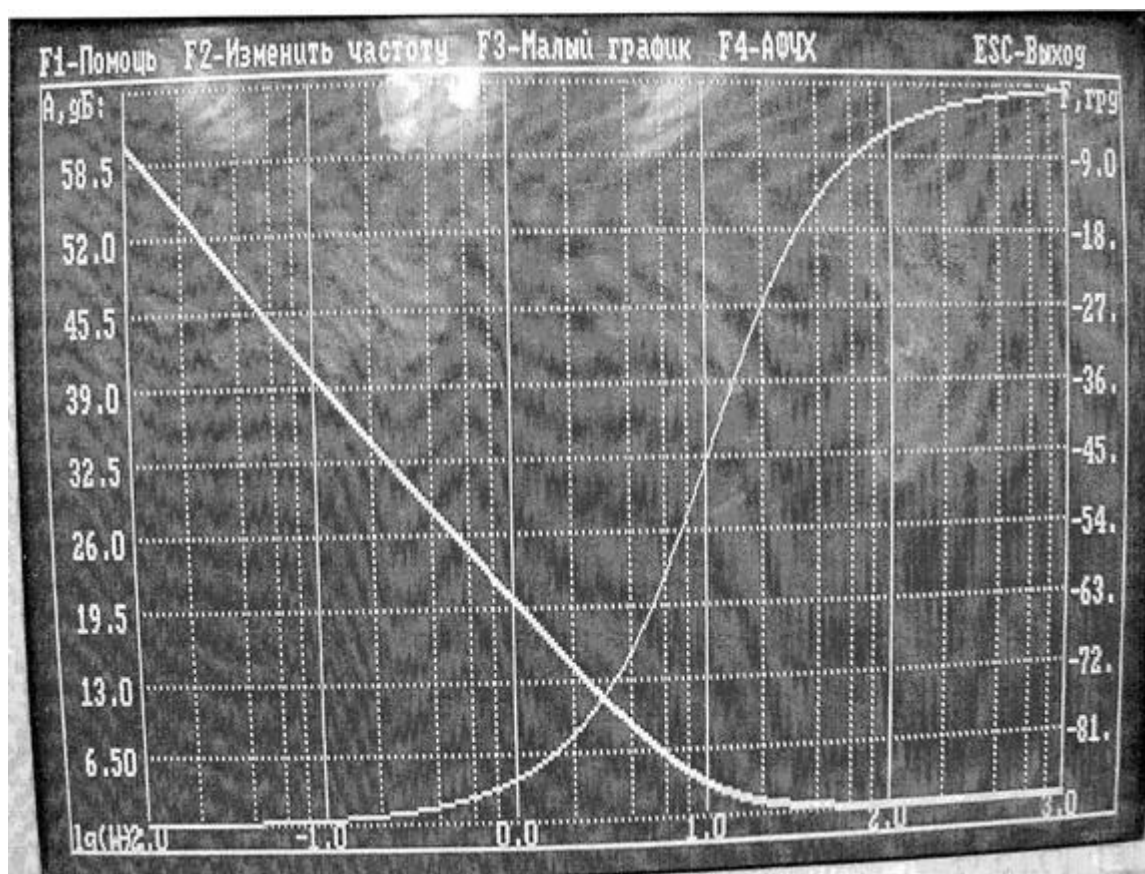
1.3. амплитудно-фазо-частотные характеристики АФЧХ (строим теоретически):



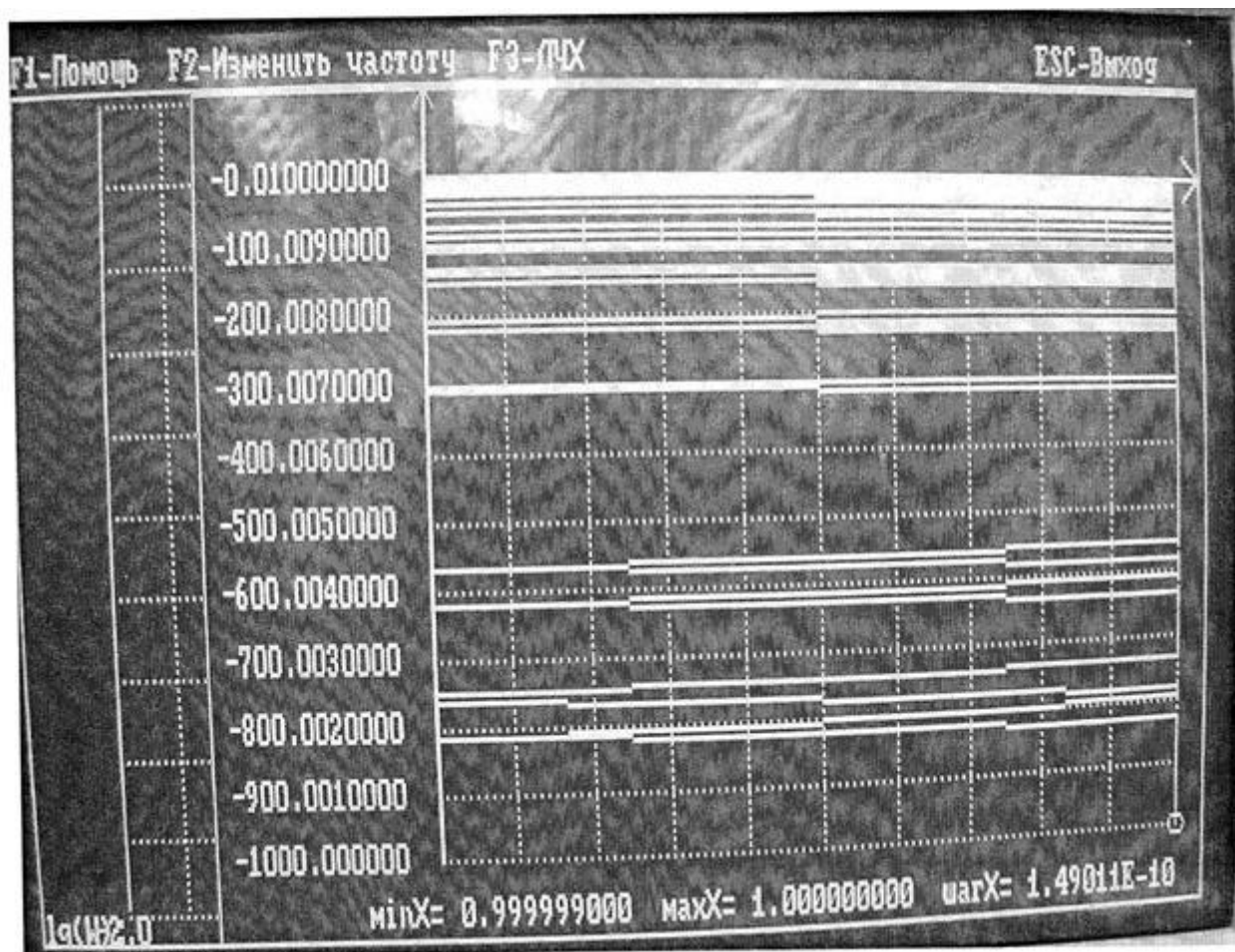
2.1. При начальных условиях $K=10$, $T=0,1$, $\xi=0$ получаем переходную функцию



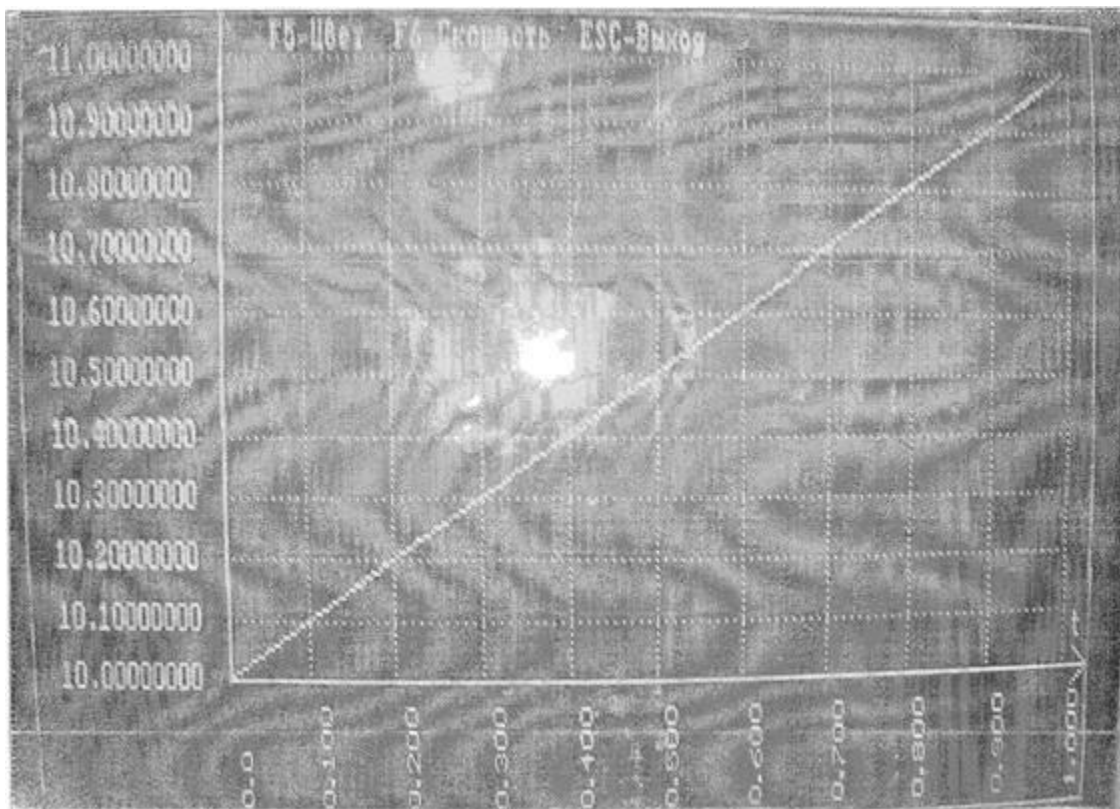
2.2. Логарифмические характеристики ЛАХ(--) и ЛФХ(--):



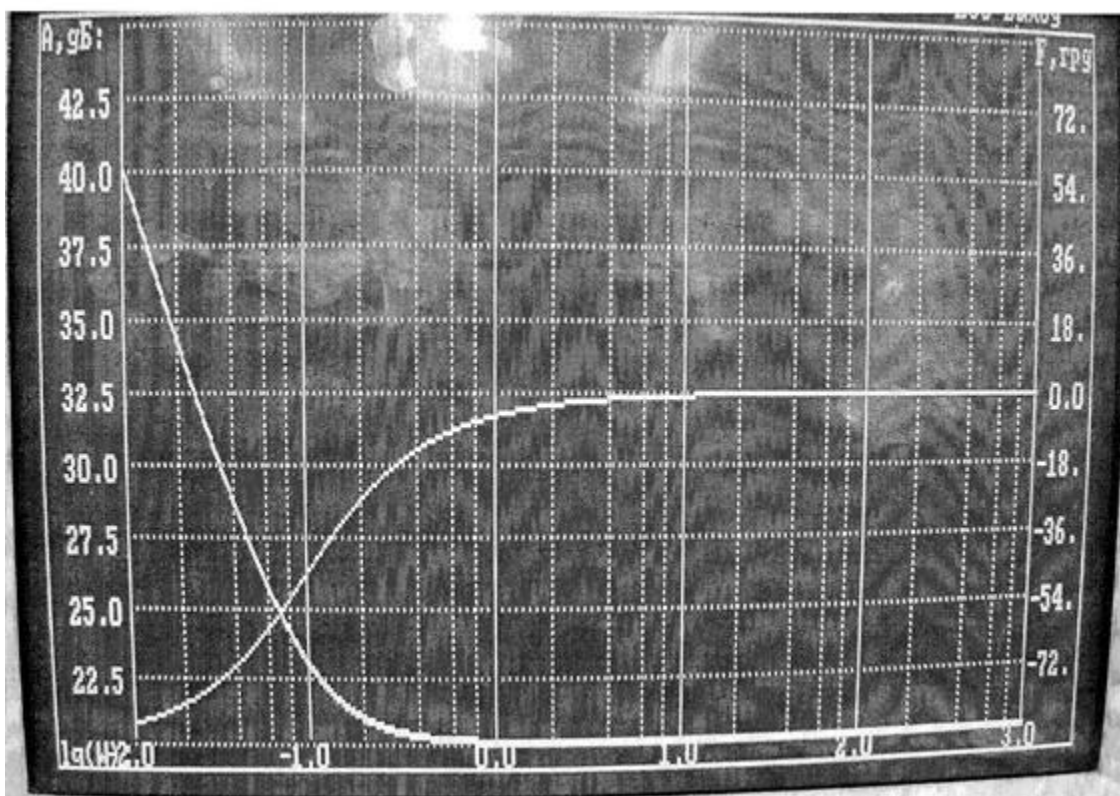
2.3. амплитудно-фазо-частотные характеристики АФЧХ (строим теоретически):



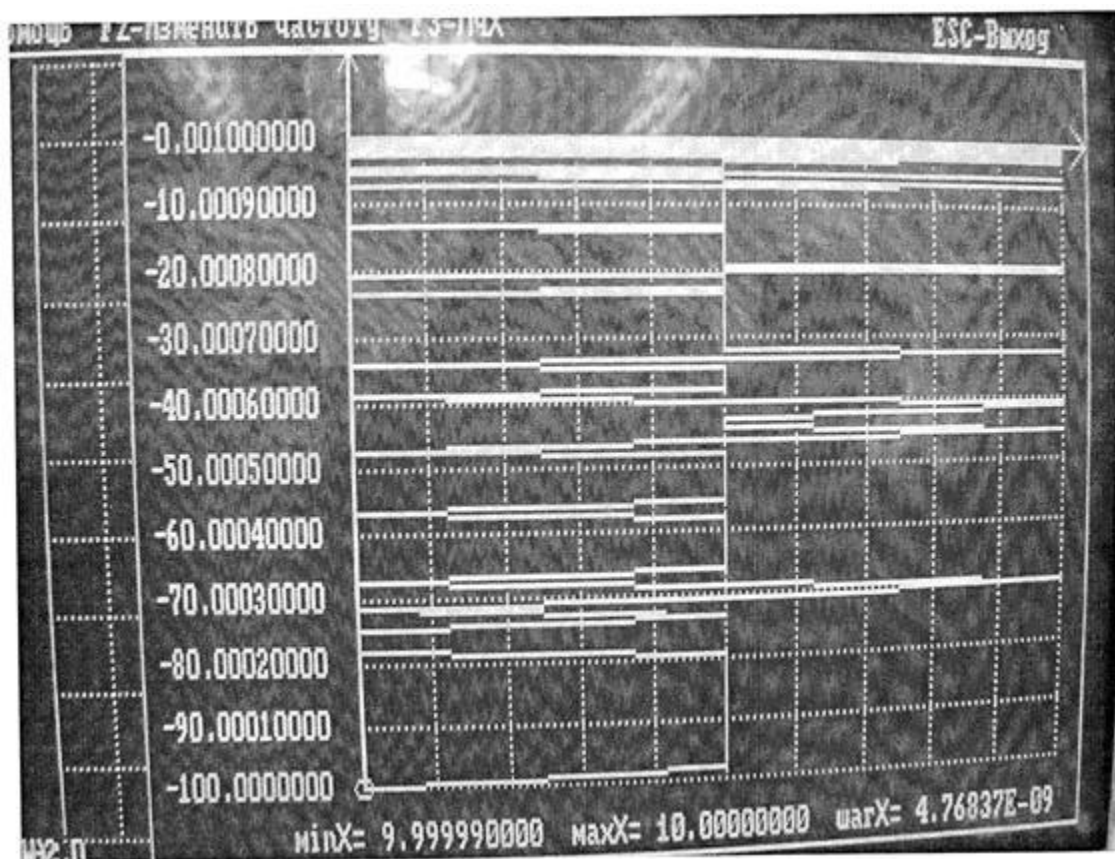
3.1. При начальных условиях $K=1$, $T=0,01$, $\xi=0$ получаем переходную функцию



3.2. Логарифмические характеристики ЛАХ(--) и ЛФХ(--):



3.3. амплитудно-фазо-частотные характеристики АФЧХ (строим теоретически):



2.2.3 Результаты и выводы:

В ходе работы мы получили соответствие математических формул и графиков. Изучили временные и частотные характеристики типовых и динамических звеньев. Отработали навыки экспериментального исследования типовых динамических звеньев с помощью ЭВМ.

2.3 Практическое занятие №6,7

Тема: «Моделирование и исследование структурных схем вход-состояние-выход»

2.3.1 Задание для работы:

1. Моделирование и исследование структурных схем вход-состояние-выход

2.3.2 Краткое описание проводимого занятия:

Когда модель построена, можно произвести ее моделирование. Предварительно задаются параметры расчета: метод и интервал интегрирования, минимальное и максимальное значения шага интегрирования, шаг вывода результатов, точность. Дополнительно можно установить режим масштабирования времени с заданием «множителя ускорения» модельного времени. Если задать этот множитель равным 1, то скорости протекания модельного и реального времени будут совпадать. Такой режим позволяет

обеспечить синхронизацию обмена данных с внешними устройствами при моделировании в реальном времени.

Для решения дифференциальных уравнений в ПК «МВТУ» реализованы 10 явных и 6 неявных методов, среди которых есть новые оригинальные методы [8, 9]. Известно, что классические явные методы (Рунге-Кутты, Адамса и др.) неэффективны при интегрировании жестких систем, поэтому для решения таких задач обычно используют неявные методы. В ПК «МВТУ» реализованы новые явные адаптивные методы [8], параметры которых автоматически настраиваются на решаемую задачу, благодаря чему они позволяют эффективно решать многие жесткие системы. Кроме этого, один из адаптивных методов (Адаптивный 5) обеспечивает точное воспроизведение быстро осциллирующих решений при наличии собственных значений якобиана вблизи мнимой оси. Результаты решения множества тестовых и прикладных задач показали, что реализованные в ПК «МВТУ» методы позволяют быстро и качественно правильно решать задачи разных типов (жесткие, осциллирующие, локально неустойчивые, разрывные). Некоторые результаты тестовых испытаний приведены в [10].

ПК «МВТУ» позволяет также эффективно решать системы ДАУ. При использовании явных методов алгебраическая подсистема решается независимо от дифференциальной, при этом можно применять один из трех методов (простых итераций, Ньютона-Рафсона, Бroyдена). При использовании неявных методов алгебраическая и дифференциальная подсистемы решаются совместно, что позволяет решать системы ДАУ высших индексов. Система ДАУ (1.1) имеет индекс 1, если матрица частных производных $\partial g(x, y, t) / \partial y$ обратима в любой точке на траектории решения. В этом случае можно аналитически либо численно исключить из уравнений вектор y , приведя таким образом систему к форме Коши. Если матрица $\partial g / \partial y$ вырождена, то приведение к форме Коши невозможно, такие системы имеют индекс 2 и выше и называются системами ДАУ высших индексов (подробнее об индексе ДАУ см. в [11]). Простейшая схема, описываемая системой ДАУ индекса 2, показана на рис. 7. Эта схема осуществляет дифференцирование входного сигнала, обеспечивая более высокую точность, чем типовой блок **Дифференцирование**. Подобные схемы позволяют строить обратные модели (данная схема является обратной моделью для интегратора).

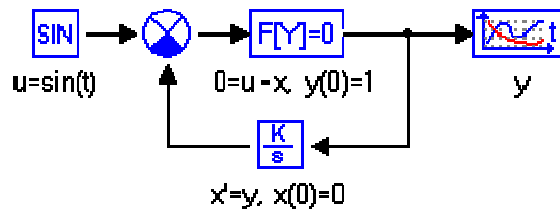


Рис. 7. Модель, описываемая системой ДАУ индекса 2
(дифференцирование входного сигнала).

Системы ДАУ высших индексов часто возникают при решении задач механики, теории управления, электротехники и т.д. [11]. Например, электрическая схема, представленная на рис. 5, описывается системой ДАУ индекса 2. Однако Simulink, Vissim и многие другие известные системы моделирования позволяют решать ДАУ только индекса 1. ПК «МВТУ» имеет очевидное преимущество перед этими ПК, позволяя решать системы ДАУ высших индексов.

Для отображения результатов моделирования в ПК «МВТУ» используются типовые блоки **Временной график**, **Фазовый портрет**, **График Y от X**. Последний из этих блоков позволяет отображать результаты расчета в линейно распределенных объектах, например, можно отобразить распределение напряжения в длинной линии. Графические окна, связанные с этими блоками, имеют средства для автомасштабирования, нахождения координат любой точки графика, а также для оформления графиков (заголовки, подписи, цветовое оформление). Дополнительные возможности для отображения результатов моделирования предоставляют блоки библиотеки *Анимация*, позволяющие создавать движущиеся объекты.

Удобным средством просмотра результатов в процессе моделирования является блок **Параметры горячей линии**, который инициализируется после 2-х кратного щелчка левой клавишей мыши по линии связи. В результате появляется окно с текущими значениями сигналов (несколькими для векторной линии). Это позволяет определить значение любой переменной в любой момент модельного времени, что упрощает отладку сложных моделей. В ПК «МВТУ» есть и другие средства отладки. Например, можно найти все алгебраические контуры с указанием блоков, удаление которых размыкает эти контуры. Можно включить режим отладки, тогда после каждого шага интегрирования можно посмотреть значения всех переменных. Средства диагностики обеспечивают выдачу диагностических сообщений («Переполнение», «Деление на 0» и т.д.) с указанием конкретного блока, где произошла данная ошибка.

Для оперативного управления процессом моделирования используется режим КОНТРОЛЬ И УПРАВЛЕНИЕ, позволяющий с помощью специальной библиотеки создать *Панель управления* с расположенными на ней виртуальными аналогами переключателей, ручных регуляторов, лампочек и измерительных приборов. Все эти устройства можно связать с конкретными переменными модели. Пример такой панели управления показан на рис. 8.

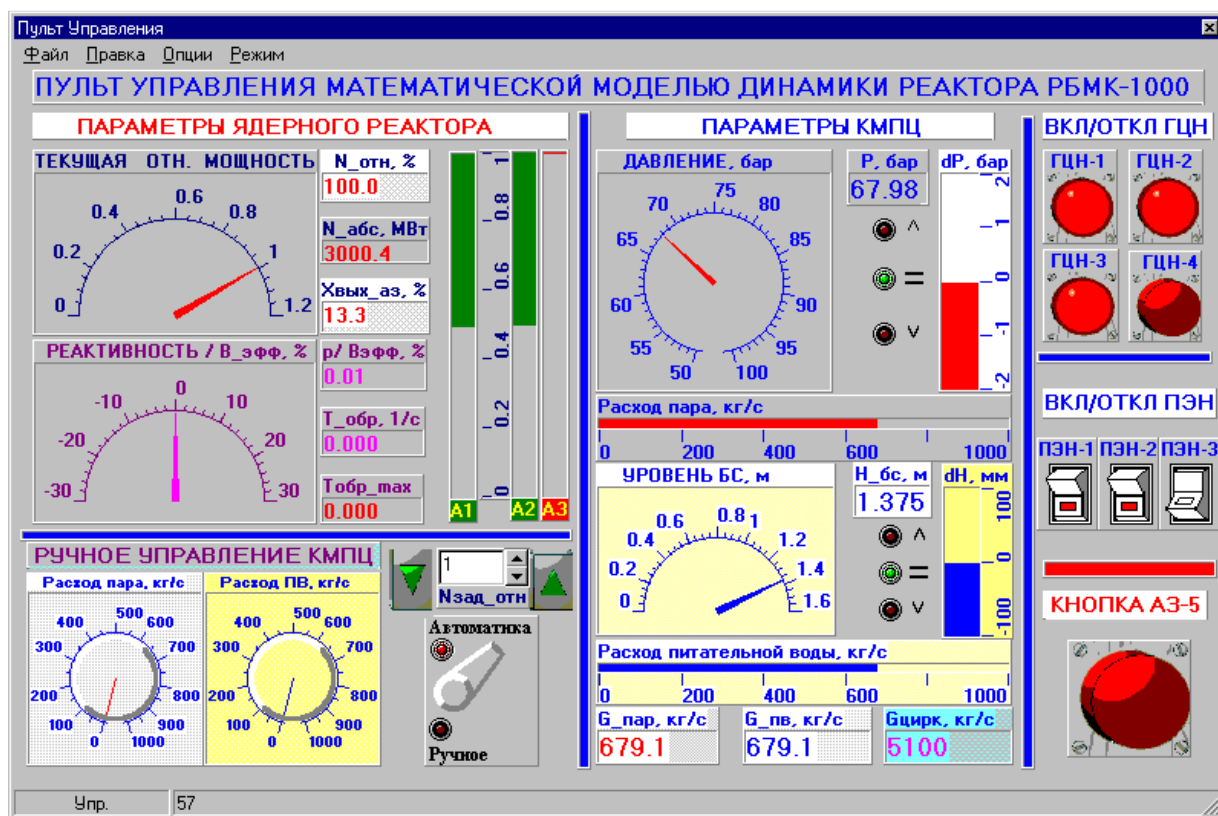


Рис. 8. Панель управления.

2.3.3 Результаты и выводы:

Программный комплекс внедрен в ряд проектных разработок предприятий Минатома России:

- разработка структуры и алгоритмов управления в АСУ ТП энергоблоков с реактором типа ВВЭР и на Представительном комплексе АСУ ТП Минатома РФ;
- моделирование процессов в системах управления и защиты для расчетного обоснования алгоритмов комплексной системы контроля, управления и защиты (КСКУЗ) реакторов типа РБМК-1000;

- расчетное обоснование ядерной безопасности проектов ядерных паропроизводящих установок (ЯППУ) с реактором интегрального типа для плавучих АЭС в переходных режимах и в проектных аварийных ситуациях;
- моделирование нестационарных процессов в проекте реакторной установки БРЕСТ-ОД-300 со свинцовым теплоносителем применительно к проектному обоснованию технологических систем автоматического управления и защиты;
- расчетное обоснование ядерной безопасности проекта АС «УниTERM», предназначенной для тепло- и электроснабжения удаленных районов Дальнего Востока и Крайнего Севера.

2.4 Практическое занятие №8,9

Тема: «Расчет устойчивости систем управления»

2.4.1 Задание для работы:

1. Расчет устойчивости систем управления

2.4.2 Краткое описание проводимого занятия:

Анализ устойчивости с помощью алгебраических критериев

Устойчивость системы связана с характером ее собственных колебаний. Чтобы пояснить это, предположим, что система описывается дифференциальным уравнением

$$\frac{d^n x}{dt^n} + a_1 \frac{d^{n-1} x}{dt^{n-1}} + \dots + a_n x = b_0 \frac{d^m g}{dt^m} + b_1 \frac{d^{m-1} g}{dt^{m-1}} + \dots + b_m g$$

или, после преобразования Лапласа,

$$(p^n + a_1 p^{n-1} + \dots + a_n) x(p) = (b_0 p^m + b_1 p^{m-1} + \dots + b_m) g(p),$$

где $g(p)$ – входное воздействие.

Устойчивая система возвращается в состояние покоя, если входное воздействие $g(p) \equiv 0$. Таким образом, для устойчивой системы решение однородного дифференциального уравнения $(p^n + a_1 p^{n-1} + \dots + a_n) x(p) = 0$ должно стремиться к нулю при t стремящемся к бесконечности.

Если найдены корни $p_1, p_2, \dots, p_n$ характеристического уравнения $p^n + a_1 p^{n-1} + \dots + a_n = 0$, то решение однородного уравнения запишется в

виде
$$x(t) = \sum_{k=1}^n c_k e^{p_k t}$$
.

В каких же случаях система устойчива?

Предположим, что $p_k = a_k$ – действительный корень.

Ему соответствует слагаемое $c_k e^{a_k t}$. При $a_k < 0$ это слагаемое будет стремиться к нулю, если t стремится к бесконечности. Если же $a_k > 0$, то $x(t) \rightarrow \infty$, когда t стремится к бесконечности; . Наконец, в том случае, когда $a_k = 0$, рассматриваемое слагаемое не изменяется и при t стремящемся к бесконечности, $x_k(t) = c_k$

Допустим теперь, что $p_k = a_k + j b_k$ – комплексный корень характеристического уравнения. Заметим, что в этом случае $\bar{p}_k = a_k - j b_k$ также будет корнем характеристического уравнения. Двум комплексно-сопряженным корням будут соответствовать слагаемые вида $c_k \sin b_k t e^{a_k t}$, $c_k \cos b_k t e^{a_k t}$.

При этом, если $a_k < 0$, то в системе имеются затухающие колебания. При $a_k > 0$ – колебания возрастающей амплитуды, а при $a_k = 0$ -колебания постоянной амплитуды c_k .

Таким образом, система устойчива, если действительные части всех корней характеристического уравнения отрицательны. Если хотя бы один корень имеет действительную часть $a_k \geq 0$, то система неустойчива. Говорят, что система находится на границе устойчивости, если хотя бы один корень характеристического уравнения имеет нулевую действительную часть, а действительные части всех остальных корней отрицательны.

Это определение хорошо иллюстрируется геометрически. Представим корни характеристического уравнения точками на комплексной плоскости (рис. 15).

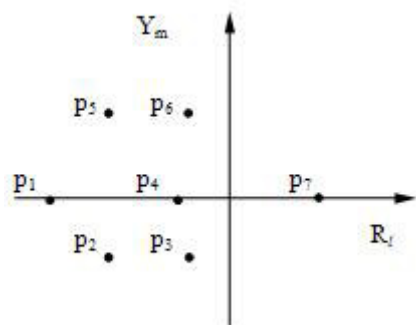


Рис. 15.

Если все корни лежат в левой полуплоскости комплексного переменного, то система устойчива. Если хотя бы один корень лежит в правой полуплоскости комплексного переменного - система неустойчива. Если же корни находятся на мнимой оси и в левой полуплоскости, то говорят, что система находится на границе устойчивости.

Рассмотрим в качестве примера замкнутую систему управления с одним

интегрирующим звеном. В этом случае $H(p) = \frac{k}{p}$, $k > 0$, а передаточная функция замкнутой системы

$$W(p) = \frac{H(p)}{1 + H(p)} = \frac{k/p}{1 + k/p} = \frac{k}{p + k}.$$

Выходной сигнал системы $x(p) = W(p)g(p)$ или $x(p) = \frac{k}{p + k} g(p)$. Заметим, что

характеристическое уравнение $p + k = 0$ записывается с помощью приравнивания к нулю знаменателя передаточной функции замкнутой системы управления. В данном случае имеется один корень $p_1 = -k < 0$ и поэтому система управления всегда устойчива.

Предположим теперь, что $H(p) = \frac{k}{p^2}$. Тогда $W(p) = \frac{k/p^2}{1 + k/p^2} = \frac{k}{p^2 + k}$. Характеристическое уравнение $p^2 + k = 0$. Поэтому $p_{1,2} = \pm j\sqrt{k}$. Система находится на границе устойчивости. В ней существуют незатухающие колебания.

2.4.3 Результаты и выводы:

Изучили теоретический материал, выполнили упражнения и ответили на контрольные вопросы.

2.5 Практическое занятие №10,11

Тема: «Расчет качества управления»

2.5.1 Задание для работы:

1. Расчет качества управления

2.5.2 Краткое описание проводимого занятия:

Сегодня на рынке большое количество разнообразной продукции (товаров и марок) с самыми различными ценами на кажущиеся (покупателю) одинаковые товары и в тоже время одинаковыми ценами на товары, явно, по мнению покупателя, этим ценам не соответствующие. Каждый потребитель выбирает тот товар, который для него представляет наибольшую ценность, исходя из своего представления о качестве товара, его цене и возможных затратах на эксплуатацию. Получается, что потребительская ценность товара не является одинаковой для всех покупателей, она сугубо индивидуализирована, хотя в своей массе, согласно законам математической статистики, средневзвешенная рыночная ценность товара всегда приближается к истинной его потребительской стоимости.

Итак, какие же факторы определяют ценность продукции? Потребительская ценность продукции зависит не только от эксплуатационных показателей качества, но и от целого ряда других потребительских ценностей, прямо или косвенно характеризующих продукцию.

Все потребительские ценности можно условно классифицировать по нескольким категориям, отличающимся друг от друга временными факторами действия: базовые, постоянные, временные ценности, сопутствующие, привнесенные, универсальные.

Базовые ценности – это потребительские ценности, заложенные в продукцию на этапе проектирования и характеризующиеся эксплуатационными показателями качества, к которым относятся показатели назначения (функциональные), надежности (безотказность, долговечность, ремонтпригодность, сохраняемость), технической эстетики (целостность композиции, совершенство товарного вида), экологические (физические, химические, микробиологические), эргономические (соответствие эргономическим требованиям в рабочей зоне), патентно-правовые (патентная чистота, патентная защита), безопасности и транспортабельности.

Перечисленные показатели характеризуют продукцию на протяжении всего ее жизненного цикла. Они могут совершенствоваться, изменяться, но их начальная

номенклатура не меняется. Эти показатели определяют базовое потребительское качество, которое является основой для сравнения с продукцией конкурентов.

К базовым ценностям относится и себестоимость продукции, характеризующая производственно-технологическую базу предприятия-изготовителя и его ресурсный потенциал. Себестоимость изготовления продукции фактически является суммой затрат на создание и реализацию продукции с заданными базовыми показателями качества, т.е. имеет место высокая корреляция между базовым качеством изделия и себестоимостью его изготовления.

Постоянные, временные, сопутствующие и привнесенные потребительские ценности дополняют базовые. Дополнительные ценности не изменяют базового качества, заложенного при проектировании продукции, но усиливают или оттеняют его действие в глазах потребителя, что выражается в повышении потребительской стоимости продукции.

Постоянные ценности – это такие дополнительные потребительские ценности, которые действуют на протяжении всего жизненного цикла продукции, но имеют к базовым ценностям не прямое, а косвенное отношение. Например, имидж фирмы-изготовителя продукции, престиж магазина, сертификат на систему качества, популярность торговой марки и т.д. Эти ценности имеют различный рейтинг. Их воздействие на покупателя позволяет намного увеличить потребительскую стоимость продукции. В отдельных случаях влияние только этих ценностей обеспечивает долговременную ликвидность продукции, даже если она по базовым показателям уступает конкурентам. Имидж фирмы, например, действует также как подпись известного художника.

Временные ценности – дополнительные ценности, имеющие прямое отношение к виду и качеству продукции, но действующие временно, иногда сезонно, обычно меньше жизненного цикла товара: новизна, мода, престиж. Эти ценности, как правило, на какое-то время позволяют держать ударные цены на продукцию. Идеально когда жизненный цикл товара соразмерен с длительностью действия временных ценностей. Временные ценности реализуются потенциальной возможностью наценки к себестоимости товара, убывающей во времени (в связи с его моральным износом).

Сопутствующие ценности – дополнительные потребительские ценности, не связанные с продукцией непосредственно, но облегчающие или затрудняющие условия ее приобретения или эксплуатации: сезонный спрос на продукцию, уровень инфляции (для

экспортируемых или импортированных товаров). Сопутствующие ценности могут как способствовать ликвидности продукции, так и затруднять ее реализацию. Наценка к продукции за счет действия сопутствующих ценностей может значительно колебаться во времени.

Привнесенные ценности – информационные ценности: реклама, выставки, конкурсы, которые сами по себе не имеют ни прямого, ни косвенно отношения к продукции, но за счет новой или повторяющейся информации о ценностях, имеющих отношение к продукции, значительно увеличивают ее потребительскую стоимость в глазах многих покупателей. К привнесенным ценностям также относятся слухи, мнения, жизненный опыт. Воздействие привнесенных ценностей может быть как временным, так и постоянным (например, реклама). Привнесенные ценности во времени действуют аналогично сопутствующим. Колебательный характер наценки вызван ослаблением во времени воздействия информационных мероприятий (до ее возобновления).

Большая часть продукции, как правило, не имеет дополнительных потребительских ценностей. Особенно это относится к материалам, полуфабрикатам, комплектующим изделиям, ценность которых профессионально оценивается потребителями по базовым характеристикам, поэтому их стоимость на рынке может быть с большой вероятностью спрогнозирована еще в период разработки. Так как дополнительные ценности выражаются наценкой к себестоимости, то долю этой наценки можно считать рентабельностью продукции за счет конкретной потребительской ценности.

Универсальные ценности – рыночная стоимость продукции или цена. Цена – главная ценность, которая, как зеркало, адекватна потребительским свойствам, но с какой-то погрешностью, вызванной стохастическим характером зависимости цены и качества. Вместе с этим цена, какой бы ни была продукция, имеет универсальную размерность (в денежном выражении), т.е. по ней можно сравнивать ценность разных по виду и качеству изделий.

Успешное продвижение на рынок нового изделия во многом будет зависеть от правильного учета всех факторов, влияющих на ликвидность продукции, и особенно от возможности предприятия-изготовителя выявить или сформировать дополнительные потребительские ценности, усиливающие базовое качество продукции.

Итак, из всего вышеперечисленного можно сделать вывод, что показатели качества, являющиеся основной категорией потребительских ценностей, создают базу (основу) для

формирования цены, себестоимости продукции в зависимости от ее первоначального качества. На основе базовых ценностей (показателей качества) формируются все последующие ценности, входящие в состав потребительской ценности продукции. Лишь некоторые не имеют никакой связи с базовыми ценностями, они были отмечены выше.

Количественная характеристика одного или нескольких свойств продукции, составляющих ее качество, называется *показателем качества продукции*.

Высокое качество изделий предопределяется различными факторами, основными из которых являются:

факторы технического характера (конструктивные, технологические, метрологические и т.д.);

факторы экономического характера (финансовые, нормативные, материальные и т.д.);

факторы социального характера (организационные, правовые, кадровые и т.д.).

Совокупность показателей качества продукции можно классифицировать по следующим признакам:

по количеству характеризующих свойств (единичные, комплексные и интегральные показатели);

по отношению к различным свойствам продукции (показатели надежности, технологичности, эргономичности и др.);

по стадии определения (проектные, производственные и эксплуатационные показатели);

по методу определения (расчетные, статистические, экспериментальные, экспертные показатели);

по характеру использования для оценки уровня качества (базовые и относительные показатели);

по способу выражения (размерные показатели и показатели, выраженные безразмерными единицами измерения, например, баллами, процентами).

Показатель качества продукции, характеризующий одно из ее свойств, называется *единичным показателем качества продукции* (например, мощность, калорийность топлива и т.д.).

Относительный показатель качества продукции – отношение значения показателя качества продукции к соответствующему (то есть принятому за исходное) значению, выражается в безразмерных числах или процентах и вычисляется по формуле

$$K_i = \bar{P}_i / \bar{P}_{i6},$$

где K_i – относительный показатель качества;

$\bar{P}_i$ – значение единичного показателя качества оцениваемой продукции;

$\bar{P}_{i6}$ – значение единичного базового показателя качества.

При применении *комплексного метода* применяют комплексный показатель качества, который определяется путем сведения воедино отдельных показателей с помощью коэффициентов весомости каждого показателя. При этом может быть использована функциональная зависимость:

$$K = f(n, b_i, k_i), \quad i = 1, 2, 3, \dots, n_i,$$

где K – комплексный показатель качества продукции;

n – число учитываемых показателей;

b_i – коэффициент весомости i -го показателя качества;

k_i – i -й показатель качества (единичный или относительный).

Алгоритм расчета комплексного показателя качества приведен на рис. 2.5. Для определения номенклатуры показателей качества, коэффициентов весомости и вида функциональной зависимости f применяются опытно-статистические и экспертные методы.

Комплексный показатель качества продукции – это показатель, характеризующий несколько ее свойств. Например, K_{Γ} – коэффициент готовности

$$K_{\Gamma} = \frac{T}{T - T_{\text{в}}},$$

где T – наработка изделия на отказ (показатель безотказности);

$T_{\text{в}}$ – среднее время восстановления (показатель ремонтпригодности), т.е. K_{Γ} характеризует два свойства изделия – безотказность и ремонтпригодность.

В свою очередь

$$T_B = T_O + T_y$$

где T_O – среднее время, затрачиваемое на отыскание отказа;

T_y – среднее время, необходимое для устранения отказа.



Рис. 2.5. Алгоритм расчета комплексного показателя качества

Таким образом, ремонтпригодность – сложное свойство изделия по отношению к T_O и T_y . Следовательно, относительно коэффициента готовности K_T показатель T_B можно рассматривать как единичный, а относительно T_O и T_y – как комплексный.

Интегральный показатель качества продукции – отношение суммарного полезного эффекта от эксплуатации или потребления продукции к суммарным затратам на ее создание и эксплуатацию или потребление.

$$И = \frac{\mathcal{E}}{З_C + З_{\mathcal{E}}} \text{ эффект/руб.},$$

где $\mathcal{E}$ – суммарный полезный эффект от эксплуатации продукции (срок полезного использования холодильника, пробег грузового автомобиля в тонно-километрах за срок службы до капитального ремонта и т.д.);

Z_c – суммарные затраты на создание продукции (разработка, изготовление, монтаж и другие единовременные затраты);
 $Z_{\text{э}}$ – суммарные эксплуатационные затраты (техническое обслуживание, ремонт и другие текущие затраты);
 $1/I$ – удельные затраты на единицу эффекта.

Среди показателей качества имеются такие, которые невозможно выразить численными значениями (оттенки, запах, тембр и т.д.). Они определяются при помощи органов чувств (органолептически) и называются *сенсорной характеристикой*.

Оценка уровня качества продукции может производиться дифференциальным или комплексным методами. При применении дифференциального метода производится сопоставление единичных показателей качества новой продукции с идентичными базовыми показателями качества, а при комплексном – фактических комплексных показателей с базовыми комплексными показателями.

Числовые значения показателей качества устанавливаются с помощью объективных и субъективных методов. *Объективные методы*: измерительный, регистрационный и расчетный. *Субъективные методы*: органолептический, социологический и экспертный. Объективные методы базируются на применении технических измерительных средств, регистрации, подсчете событий, выполнении вычислений. Основа субъективных методов – анализ восприятия органов чувств человека, сбор и учет различных мнений, решения, принимаемые группой специалистов-экспертов.

ГОСТ 22851-77 устанавливает следующую номенклатуру основных 10 групп показателей качества по характеризующим ими свойствам продукции:

1. *Показатели назначения* характеризуют свойства продукции, определяющие основные функции, для выполнения которых она предназначена, и обуславливают область ее применения.

В эту группу входят:

а) *классификационные показатели*, устанавливающие принадлежность изделий к классификационной группировке (классы автомобилей, точности приборов и т.д.);

б) *функциональные (эксплуатационные)*, характеризующие полезный результат от эксплуатации изделий (быстродействие компьютера, производительность стана, точность измерительного прибора и т.д.);

в) *конструктивные*, дающие точное представление об основных проектно-конструкторских решениях изделий (двигатели дизельные, бензиновые, электрические и т.д.);

г) *показатели состава и структуры*, определяющие содержание в продукции химических элементов, их соединений (процентное содержание серы и золы в коксе и т.д.). Показатели этой группы играют основную роль в оценке уровня качества, они часто используются как критерии оптимизации и применяются совместно с другими видами показателей.

2. *Показатели надежности* характеризуют свойства безотказности, долговечности, ремонтпригодности и сохраняемости.

Безотказность – свойство изделия сохранять работоспособность в течение некоторого времени или наработки.

Долговечность – свойство изделия сохранять работоспособность до предельного состояния с необходимыми перерывами для технического обслуживания и ремонта.

Ремонтпригодность – способность продукции подвергаться ремонту.

Сохраняемость – свойство изделий и продуктов сохранять исправное и пригодное к потреблению состояние в течение установленного в технической документации срока хранения и транспортирования, а также после него.

Например, показатели *транспортабельности* характеризуют приспособленность продукции к транспортированию, не сопровождающемуся ее использованием или потреблением. Определяются экспериментальным, расчетным или экспертным методами. Например, показатель пригодности продукции к сохранению потребительских свойств при перевозках, он отражен в нормах естественной убыли для отдельных видов продукции (стекло, цемент и т.д.)

$$K_d = \frac{Q_B}{Q_P} \cdot 100\%$$

где K_d – доля продукции, сохраняющая в заданных пределах свои первоначальные свойства за время перевозок, %;
 Q_P – количество продукции, погружаемое в транспортное средство;
 Q_B – количество выгруженной продукции, сохранившей значения показателей качества в допустимых пределах.

3. *Эргономические показатели* характеризуют систему «человек – изделие» и учитывают комплекс свойств человека, проявляющихся в производственных и бытовых процессах. К ним относятся *гигиенические* (освещенность, температура, давление, влажность), *антропометрические* (одежда, обувь, мебель, пульта управления) и *психофизиологические* (скоростные и силовые возможности, пороги слуха, зрения и т.п.).

Психофизиологические характеризуют приспособленность изделия к органам чувств человека.

Психологические характеризуют возможность восприятия и обработки различной информации.

Физиологические характеризуют допустимые физические нагрузки на различные органы человека.

4. *Эстетические показатели* характеризуют информационную выразительность, рациональность формы, целостность композиции, совершенство производственного исполнения, стабильность товарного вида (характеристики художественных стилей, оттенков, запахов, гармоничности и т.д.).

5. *Показатели технологичности* характеризуют свойства продукции, обуславливающие оптимальное распределение затрат материалов, времени и средств труда при технической подготовке производства, изготовлении и эксплуатации продукции. Это показатели трудоемкости, материало- и фондоемкости, себестоимости изделий. Исчисляются как общие (суммарные) так и структурные, удельные, сравнительные или относительные показатели.

Относительные показатели – это, например:

– коэффициент использования материалов

$$K_{\text{им}} = \frac{M_{\Gamma}}{M_{\text{в}}},$$

где M_{Γ} – количество материала в готовой продукции;

$M_{\text{в}}$ – количество материала, введенного в технологический процесс;

показатель удельной себестоимости

$$s_{\text{уд}} = \frac{S}{B},$$

где $S_{\text{уд}}$ – удельная себестоимость;

S – общая себестоимость изделия;

B – определяющий параметр изделия (мощность, вес и т.п.).

6. *Показатели стандартизации и унификации* характеризуют насыщенность продукции стандартными, унифицированными и оригинальными частями, а также уровень унификации с другими изделиями.

Основные показатели унификации – коэффициенты применяемости, повторяемости, взаимной унификации для групп изделий, удельный вес оригинальных деталей (узлов). Стандартными являются все части продукции, выпускаемые по государственным и отраслевым стандартам.

7. *Патентно-правовые показатели* характеризуют степень обновления технических решений, использованных в продукции, их патентную защиту, а также возможность беспрепятственной реализации продукции в нашей стране и за рубежом (количество или удельный вес запатентованных или лицензированных деталей (узлов) и т.п.).

8. *Экологические показатели* характеризуют уровень вредных воздействий на окружающую среду, возникающих при эксплуатации или потреблении продукции. Например: содержание вредных примесей, выбрасываемых в окружающую среду, вероятность выброса вредных частиц, газов, излучений при хранении, транспортировании и использовании продукции, уровень ПДК.

9. *Показатели безопасности* характеризуют особенности продукции, обуславливающие при ее эксплуатации или потреблении безопасность человека. Они отражают требования к нормам и средствам защиты людей, находящихся в зоне возможной опасности при возникновении аварийной ситуации, и предусмотрены системой госстандартов по безопасности труда, а также международными стандартами.

10. *Экономические показатели* характеризуют затраты на разработку, изготовление, эксплуатацию или потребление продукции, учитываемые в интегральном показателе качества продукции (различные виды затрат, себестоимость, цена и пр.), при сопоставлении различных образцов продукции – технико-экономические показатели.

2.5.3 Результаты и выводы:

Сегодня на рынке большое количество разнообразной продукции (товаров и марок) с самыми различными ценами на кажущиеся (покупателю) одинаковые товары и в тоже время одинаковыми ценами на товары, явно, по мнению покупателя, этим ценам не соответствующие. Каждый потребитель выбирает тот товар, который для него представляет наибольшую ценность, исходя из своего представления о качестве товара, его цене и возможных затратах на эксплуатацию. Получается, что потребительская ценность товара не является одинаковой для всех покупателей, она сугубо индивидуализирована, хотя в своей массе, согласно законам математической статистики, средневзвешенная рыночная ценность товара всегда приближается к истинной его потребительской стоимости.

2.6 Практическое занятие №12,13,14

Тема: «Моделирование СУ с использованием блока «Язык программирования» (МВТУ)»

2.6.1 Задание для работы:

1. Моделирование СУ с использованием блока «Язык программирования» (МВТУ)

2.6.2 Краткое описание проводимого занятия:

Учитывая, что невозможно сформировать абсолютно полную библиотеку типовых блоков, в ПК «МВТУ» включены средства, позволяющие пользователю расширить состав личной библиотеки путем создания новых типов блоков. К таким средствам относятся типовые блоки **Новый и Язык программирования**. Блок **Язык программирования** позволяет создавать модели с помощью алгоритмического языка, аналогичного языку системы MATLAB. Диалоговое окно этого блока – окно текстового редактора алгоритмов, в котором пользователь записывает математическую модель в виде,

близком к естественной записи. Язык позволяет задавать алгебраические соотношения и дифференциальные уравнения, а также выполнять операции с действительными и комплексными матрицами и векторами, логическими переменными, геометрическими точками, полиномами. Возможны и более сложные типы данных – записи и ссылки. Среди конструкций языка – условные и безусловные переходы, циклы, пользовательские функции и процедуры. Интерпретатор языка предварительно компилирует программу во внутренний псевдокод, что ускоряет выполнение задачи.

В качестве примера рассмотрим построение модели одномерной теплопроводности, описываемой уравнением

$$\frac{\partial T}{\partial t} = \alpha \frac{\partial^2 x}{\partial x^2}, \quad 0 \leq x \leq 1, \quad 0 \leq t \leq t_{\text{end}}$$

при заданных граничных и начальных условиях (файл \Demo\Язык_программирования\Теплопроводность.mtj). Применяя для дискретизации этого уравнения метод прямых, получим систему ОДУ

$$T_i' = K(T_{i-1} - 2T_i + T_{i+1}), \quad T_i(0) = T0, \quad i = 2, \dots, N-1;$$

$$T_1 = u(t), \quad T_N = v(t), \quad K = \frac{\alpha}{\Delta x^2}, \quad \Delta x = \frac{1}{N-1}.$$

Текст алгоритма, реализующего решение рассматриваемой задачи, записан в окне редактора блока **Язык программирования** в следующем виде:

Листинг 1

```
input u,v; //входы блока (граничные условия)
init T=N#20; //начальные условия
const alfa=0.02, K=alfa*(N-1)^2,
x=linspace(0,1,N);
//x - массив узлов равномерной сетки
T[1]=u; T[N]=v;
for (i=2,N-1) T[i]=K*(T[i-1]-2*T[i]+T[i+1]);
output x[N],T[N]; //векторные выходы блока
```

(комментарии следуют за двойным слешем — "//"). Число узлов N задается в окне глобальных параметров. Для отображения распределения температуры используется типовой блок **График Y от X**, на входы которого подаются векторные сигналы x и T.

Рассмотрим еще один пример – фильтрацию сигналов с использованием быстрого преобразования Фурье (БПФ) (файл \Demo\Язык_программирования\Фильтр_БПФ.mrg). Пусть исходный сигнал – сумма двух гармоник, а на него накладывается нормальный белый шум, сопоставимый по величине с исходным сигналом. Тогда алгоритм фильтра БПФ, записанный с помощью языка программирования, можно представить в виде

Листинг 2

```
t=linspace(0,1023,1024)/4;
x=sin(5*pi*t/128)+0.9*cos(pi*t/8);
xn=1024#0;
for (k=1,1024) xn[k]=x[k]+2*randg(0,1);
// t - массив значений времени
// x - исходный сигнал
// xn - зашумленный сигнал
y=fft(xn); //прямое БПФ
py=abs(y).*abs(y);
Porog=4e4;
// py - спектральная плотность сигнала
// Porog - порог для спектральной плотности
pz=1024#(0,0);
for (k=1,1024)
if py[k]<Porog then pz[k]=0+0i else pz[k]=y[k];
z=real(ifft(pz)); //обратное БПФ
// z - фильтрованный сигнал
f=linspace(1,511,511)/256;
// массив значений частоты
for (k=1,511) E[k]=py[k+1]*1e-4;
E_Porog=511#(Porog*1e-4);
// нормированные значения спектр. плотности и порога
output t[1024],xn[1024],x[1024],f[511],
```

```
E[511],E_Porog[511],z[1024];
```

На выходе блока получаем массивы значений сигналов, а также массив значений спектральной плотности. Результаты, отображенные с помощью блоков **График Y от X**, показаны на рис. 2.

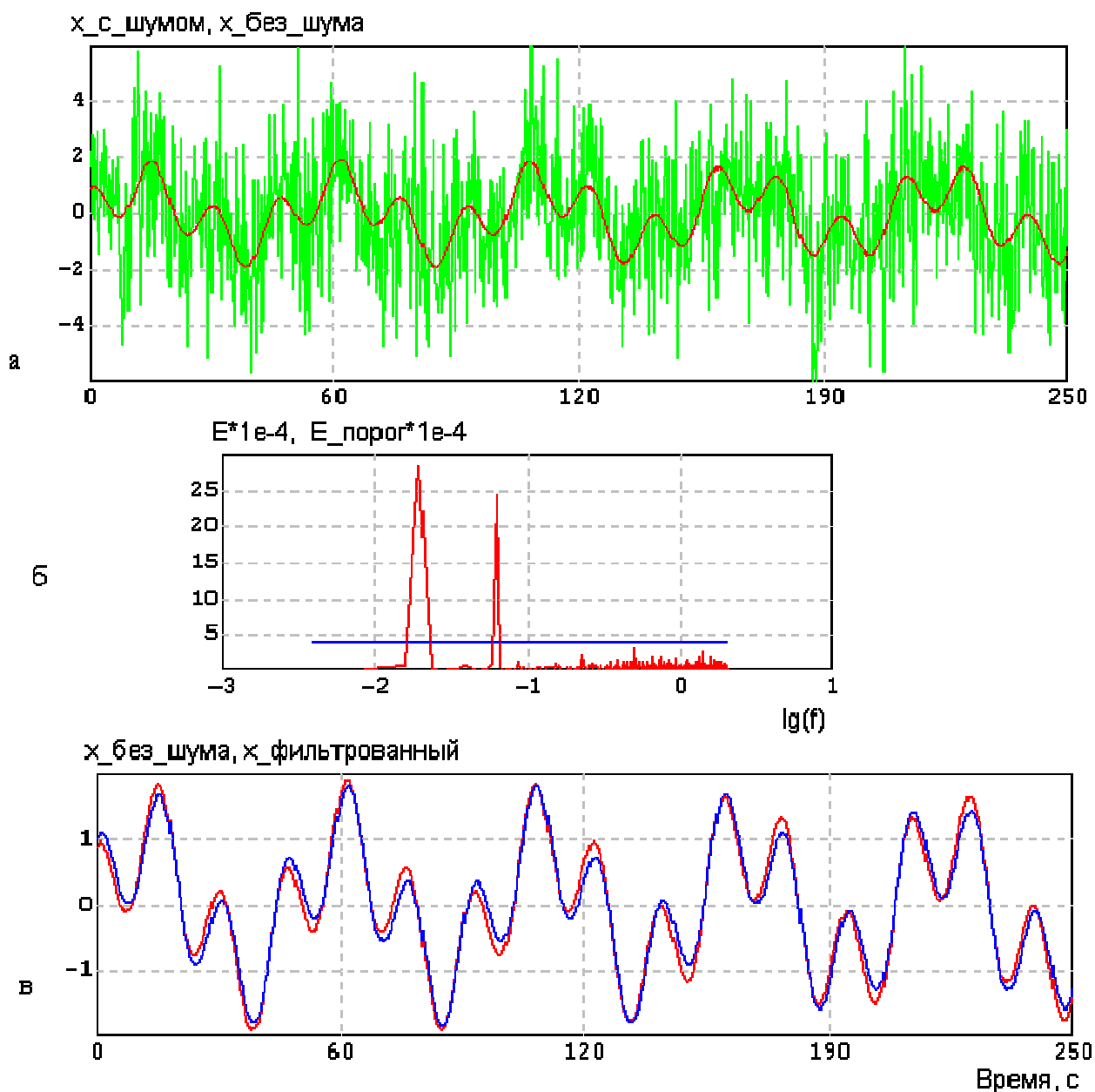


Рис. 2. Фильтрация сигнала с помощью БПФ: а - зашумленный сигнал (зеленая линия) и исходный сигнал (красная линия); б –спектральная плотность (красная линия) и порог для спектральной плотности (синяя линия); в – исходный сигнал (красная линия) и фильтрованный сигнал(синяя линия).

Как правило, сложная техническая система является гибридной системой, поведение которой описывается не только дифференциально-алгебраическими уравнениями, но и логическими условиями, задающими переходы из одного дискретного состояния в другое. Для моделирования таких систем применяют специальные программные средства, такие как Simulink+Stateflow или MVS [6]. Язык программирования и большой набор дискретных, переключательных и логических элементов позволяют реализовывать гибридные модели также и в ПК «МВТУ».

Рассмотрим пример, включенный в состав демонстрационных примеров пакета Stateflow под названием Stick-Slip Friction Demonstration. Моделируется движение бруска, прикрепленного к пружине, под действием внешней силы и с учетом сухого трения (такая модель подробно рассмотрена в [7]). Эта же модель, реализованная в ПК «МВТУ» (файл \Demo\Язык_программирования\ Сухое_трение_анимация.mtj), показана на рис. 3. В этом примере моделирование выполняется с использованием типового блока **Анимация**, демонстрирующего движение бруска в реальном масштабе времени.

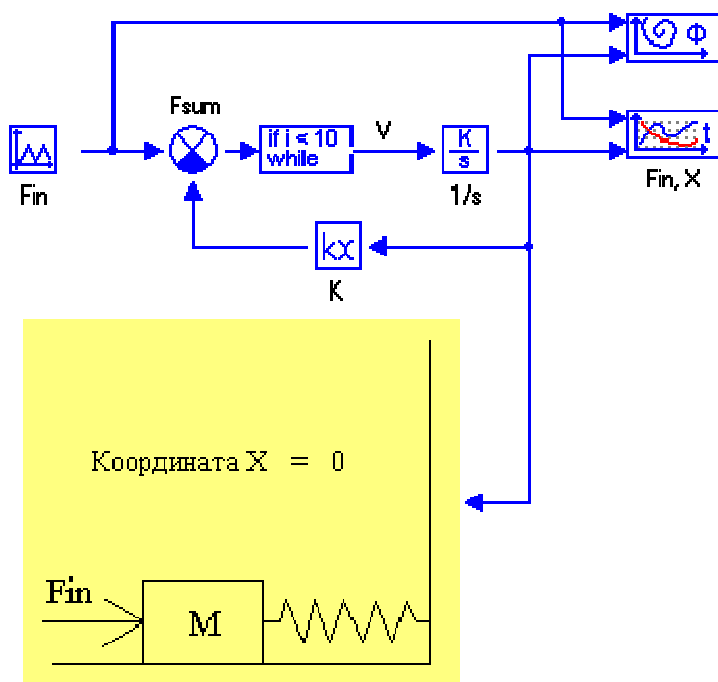


Рис. 3. Модель движения бруска с сухим трением.

Параметры модели: M – масса бруска; K – упругость пружины; F_{static} – сила, которую нужно приложить, чтобы сдвинуть брусок с места; $F_{sliding}$ – сила трения скольжения ($F_{static} \geq F_{sliding}$). Изменение состояния бруска описывается следующими логическими

условиями: если брусок остановился или был в состоянии покоя и при этом суммарная сила F_{sum} не превышает по модулю F_{static} , то брусок остается в состоянии покоя; в противном случае он находится в состоянии движения. В соответствии с этими условиями алгоритм вычисления скорости бруска, реализованный в блоке **Язык программирования**, имеет вид

Листинг 3

```
input Fsum;
init V=0;
var Vold=V;
if (V*Vold<=0) and (abs(Fsum)<=Fstatic)
then begin V'=0; V=0 end      //покой
else V'=(Fsum-Fsliding*sign(V))/M; //движение
if goodstep then Vold=V;
//Vold - скорость на предыдущем успешном шаге
output V;
```

Здесь `goodstep` – системная логическая переменная, которая принимает значение `true` в случае успешного шага интегрирования и `false` в противном случае. На каждом шаге интегрирования производится оценка ошибки. Шаг считается успешным (`goodstep=true`), если эта оценка меньше допустимой. В противном случае (`goodstep=false`) происходит возврат к предыдущему шагу, после чего выполняется шаг меньшего размера. Изменение состояния (покой или движение) фиксируется только при успешном шаге. Благодаря использованию языка программирования модель оказалась более простой и наглядной, чем аналогичная модель в среде Simulink+Stateflow. Отметим, что и время счета такой модели в ПК «МВТУ» в несколько десятков раз меньше, чем в Simulink (для определения времени счета следует использовать пример без анимации – `Сухое_трение.mrgj`).

Язык программирования ПК «МВТУ» позволяет каждому пользователю создавать собственные функции на основе стандартных конструкций языка. Такие функции могут быть объединены в библиотеки, вызов которых осуществляется оператором вида

Листинг 4

```
include "filename.txt";
```

где filename.txt – имя файла, содержащего тексты пользовательских функций и процедур. Например, алгоритм расчета годографа Найквиста можно записать в виде

Листинг 5

```
include "procedures.txt";  
input B[M],A[N];  
//массивы коэффициентов передаточной функции  
w=logspace(-1,3,200);  
//массив частот в логарифмическом масштабе  
Nyquist(B,A,w,X,Y);  
output X[200],Y[200]; //массивы точек годографа
```

где процедура расчета точек годографа содержится в файле procedures.txt и имеет вид

Листинг 6

```
procedure Nyquist(B[1],A[1],w[1],out Re[1],out Im[1])  
var z:complex,i:integer;  
for (i=1,cols(w))  
begin  
z=1j*w[i]; z=polyval(B,z)/polyval(A,z);  
Re[i]=real(z); Im[i]=imag(z);  
end;  
end;
```

Размерности массивов В и А (М и N) задаются в окне глобальных параметров модели. Для отображения годографа следует использовать типовой блок **График Y от X**, на вход которого подаются векторные сигналы X и Y. Расчет производится на каждом шаге интегрирования, что позволяет наблюдать изменение годографа в процессе моделирования нестационарных и нелинейных систем.

2.6.3 Результаты и выводы:

Программный комплекс внедрен в ряд проектных разработок предприятий Минатома России:

- разработка структуры и алгоритмов управления в АСУ ТП энергоблоков с реактором типа ВВЭР и на Представительном комплексе АСУ ТП Минатома РФ;
- моделирование процессов в системах управления и защиты для расчетного обоснования алгоритмов комплексной системы контроля, управления и защиты (КСКУЗ) реакторов типа РБМК-1000;
- расчетное обоснование ядерной безопасности проектов ядерных паропроизводящих установок (ЯППУ) с реактором интегрального типа для плавучих АЭС в переходных режимах и в проектных аварийных ситуациях;
- моделирование нестационарных процессов в проекте реакторной установки БРЕСТ-ОД-300 со свинцовым теплоносителем применительно к проектному обоснованию технологических систем автоматического управления и защиты;
- расчетное обоснование ядерной безопасности проекта АС «УниTERM», предназначенной для тепло- и электроснабжения удаленных районов Дальнего Востока и Крайнего Севера.

2.7 Практическое занятие №15,16,17

Тема: «Анализ систем управления с ЭВМ в качестве управляющего устройства»

2.7.1 Задание для работы:

1. Анализ систем управления с ЭВМ в качестве управляющего устройства

2.7.2 Краткое описание проводимого занятия:

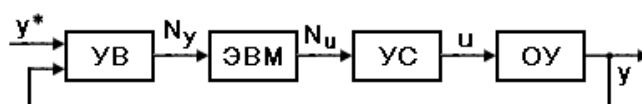


Рис. 7.1.1.

Укрупненная схема цифровой системы управления приведена на рис. 7.1.1. Она содержит управляющую ЭВМ, объект управления ОУ, устройство ввода информации УВ и устройство, предназначенное для сопряжения ЭВМ с объектом, получившее название устройства сопряжения УС. Управляемый процесс (объект), как правило, имеет аналоговую природу, и связанные с ним сигналы $y(t)$ и $u(t)$ являются аналоговыми. Управляющая ЭВМ (а равно и любое другое цифровое устройство) имеет дело только с цифровой информацией, и сигналы на ее входах N_y и выходах N_u представлены цифровым кодом.

К современным измерительным устройствам относятся разнообразные датчики аналоговой природы, выходом которых являются электрические сигналы постоянного или переменного тока $y(t)$, кодовые датчики, обеспечивающие получение параллельного цифрового кода N_y , а также импульсные измерительные устройства, на выходе которых получается импульсная последовательность p_y . Цифровые измерительные устройства совместимы с цифровыми процессами в управляющей ЭВМ, что упрощает устройства ввода УВ.

Центральным элементом системы является управляющая ЭВМ, которая по заданному алгоритму осуществляет обработку информации от измерительных устройств и выполняет функции устройства управления (цифрового регулятора).

Важнейшими модельными особенностями управляющей ЭВМ как цифрового регулятора являются ее дискретность, циклический характер обработки информации и наличие запаздывания в процессе обработки сигналов. Дискретность обусловлена квантованием по уровню и времени всех вычислительных процессов, а, следовательно, и дискретным характером сигналов на входе $N_y(kT)$ и выходе ЭВМ $N_u(kT)$. Интервал квантования по времени задается с помощью таймера, а приращение по уровню зависит от разрядности ЭВМ. Для ЭВМ с достаточно большой разрядной сеткой квантованием по уровню обычно пренебрегают. Тогда сигналы $N_y(kT)$ и $N_u(kT)$ рассматриваются как стандартные амплитудно-модулированные импульсные последовательности (решетчатые функции).

Запаздывание, вносимое управляющей ЭВМ, вызвано потерями времени на ввод-вывод информации и вычисление управления по заданному алгоритму. С учетом запаздывания выходом ЭВМ следует считать дискретный сигнал N_u . Для упрощения модели системы запаздыванием либо пренебрегают, либо полагают равным одному интервалу дискретизации с выходным сигналом $N\tau$), смещенный относительно идеального сигнала на величину $\tau(kT - u((k-1)T))$.

В дальнейшем будем полагать, что работа всех устройств цифровой системы синхронизирована и происходит с интервалом дискретности T , а их разрядные сетки одинаковы.

В функции устройств сопряжения с объектом входит промежуточное хранение цифровой информации и (при необходимости) преобразование аналоговых сигналов в цифровые и обратно.

Эквивалентная схема цифровой системы управления. Для построения математической модели цифровой системы введем в рассмотрение некоторые специальные блоки:

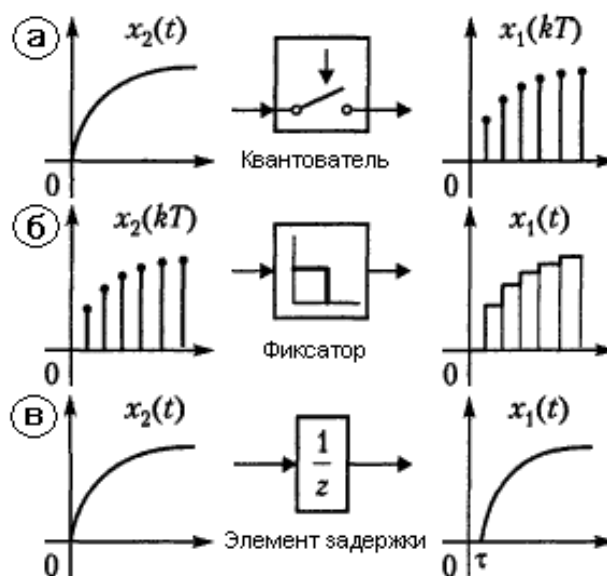


Рис. 7.1.2.

- квантователь непрерывных сигналов (рис. 7.1.2, а), имеющий характеристику

$$x_1(kT) = x_2(t) \text{ при } t = kT; \quad (7.1.1)$$

- фиксатор, или экстраполятор нулевого порядка (рис. 7.1.2, б), описываемый выражением

$$x_1(t) = x_2(kT) \text{ при } t \in [kT, (k+1)T); \quad (7.1.2)$$

- звено запаздывания (элемент задержки на время

$$x_1(t) = x_2(t - \tau). \quad (7.1.3)$$

Функциональная схема цифровой системы с объектом управления аналоговой природы и сигналы в различных ее точках приведены на рис. 7.1.3 и 7.1.4. Схема представлена самим ОУ с аналоговыми измерительными и исполнительными устройствами,

управляющей ЭВМ, таймером T , обеспечивающим тактирование процессов с интервалом T , и устройствами аналогового ввода-вывода. При рассмотрении пренебрежем эффектом квантования сигналов по уровню и различием между аналоговыми и цифровыми сигналами, принимая во внимание, что способ кодирования информации не влияет на информационное содержание сигналов. Работа цифровых систем управления аналоговыми процессами с цифровыми измерительными и исполнительными устройствами, инкрементными датчиками и иными типами цифровых устройств может рассматриваться по той же схеме и приводит к идентичной математической модели.

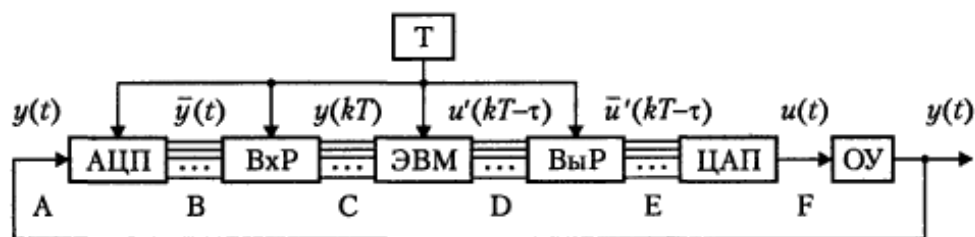


Рис. 7.1.3.

Функциональная схема содержит АЦП, входным сигналом которого является непрерывный сигнал $y(t)$ (точка А), а выходным кусочно-постоянный сигнал $\tilde{y}(t) = y(kT)$ (точка В), который поступает на вход следующего блока - входного регистра ВхР. Выходом последнего служит шина управляющей ЭВМ (точка С), на которой в моменты ввода информации $t = kT$ появляется импульсный сигнал $y(kT)$. Таким образом, первые два блока системы преобразуют непрерывный сигнал $y(t)$ в квантованный по времени дискретный сигнал $y(kT)$, т. е. представляют собой квантователь, при этом эффект квантования вызван периодическими обращениями ЭВМ к входному регистру.

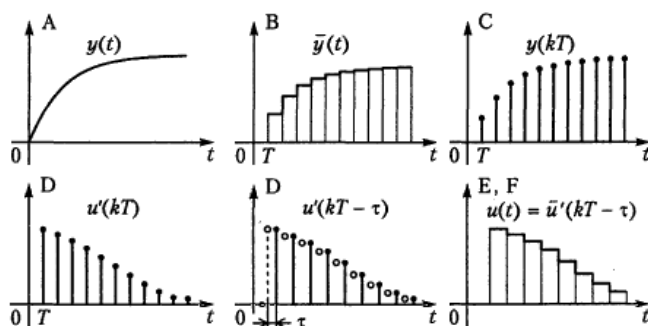


Рис. 7.1.4.

τ), где τ Дискретный сигнал $y(kT)$ поступает в процессор ЭВМ, где производится расчет текущих значений управляющего воздействия. В идеальном случае на выходе ЭВМ (точка D) мгновенно формируется дискретный сигнал $u'(kT)$. С учетом запаздывания - смещенная импульсная последовательность $u'(kT - \tau)$, сигнал $u'((k-1)T) \cdot \tau T$, или, полагая для простоты

) (точка E). Этот элемент схемы является фиксатором. τ) поступает на выходной регистр ВыР, который обеспечивает его сохранение в течение интервала T . Тем самым обеспечивается преобразование импульсной последовательности в кусочно-непрерывный сигнал $\bar{u}(kT - \tau)$ сигнал с выхода ЭВМ $u'(kT - \tau)$ в моменты времени $t = kT - \tau$

Цифроаналоговый преобразователь, как уже отмечалось, является пассивным элементом и поэтому сигнал на его выходе (точка F) по информационному содержанию совпадает с входным сигналом и является входным сигналом объекта управления.

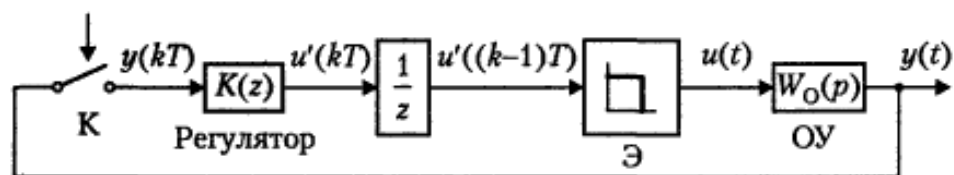


Рис. 7.1.5.

τT приведена на рис. 7.1.5. В состав схемы входит ОУ с передаточной функцией $W_O(p)$. Эквивалентная схема цифровой системы управления, соответствующая ее математической модели для случая линейного объекта управления, линейного регулятора и запаздывания τ , цифровой регулятор с передаточной функцией $K(z)$, квантователь K , элемент задержки $1/z$ и экстраполятор $\bar{u}$. В общем случае модель может включать каналы задающих воздействий и обратные связи по различным переменным системы.

Особенности цифровых систем. Основной особенностью цифровой системы является способ обработки информации в регуляторе (управляющей ЭВМ), который предусматривает использование только арифметических операций и позволяет реализовывать алгебраические алгоритмы управления, включая рекуррентные процедуры решения разностных уравнений. При этом возможность непосредственной реализации динамических алгоритмов управления, записанных в виде дифференциальных либо интегральных уравнений, исключается, и подобные алгоритмы также должны быть приведены к рекуррентной форме.

Пример 1. Простейший пропорциональный алгоритм управления имеет вид:

$$u = y^* - y, \epsilon u = K$$

Выражения содержат операции сложения и умножения и легко реализуются на ЭВМ (рис. 7.1.6, а).

Пример 2. Наиболее распространенным элементом динамических регуляторов является интегрирующее звено, описываемое дифференциальным уравнением

$$u'(t) = Ky(t), u(0) = u_0.$$

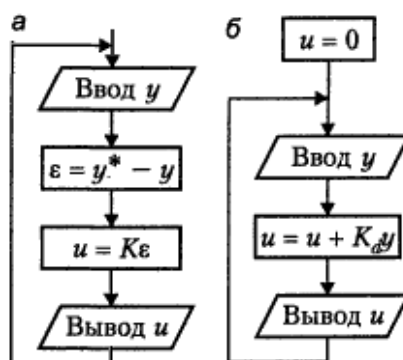


Рис. 7.1.6.

В интегральной форме:

$$u(t) = u_0 + K \int_0^t y(\tau) d\tau$$

Численное интегрирование:

$$u(kT) = u_0 + KT \sum_{i=0}^{k-1} y(iT).$$

Для получения рекуррентной формы найдем значение u в момент времени $(k+1)T$:

$$u((k+1)T) = u_0 + KT \sum_{i=0}^k y(iT) = u(kT) + KT y(kT).$$

Выражение реализуется алгоритмом, приведенным на рис. 7.1.6, б.

Таким образом, цифровой способ обработки информации вызывает необходимость использования дискретных моделей регуляторов. Учитывая непрерывную природу большинства реальных управляемых процессов, модельная особенность цифровой системы заключается в том, что она является дискретно-непрерывной, и описывается как разностными, так и дифференциальными уравнениями. Сопряжение этих двух частей модели осуществляется с помощью квантователя и экстраполятора нулевого порядка, а также звена запаздывания для учета задержки обработки информации.

Указанные выше особенности моделей цифровых систем и их дискретно-непрерывная природа обуславливают основные трудности анализа и проектирования. В связи с этим нашли распространение два подхода к исследованию цифровых систем:

- с использование теории непрерывных систем;
- с использование теории дискретных систем.

Первый подход предусматривает построение непрерывного регулятора, и его последующую дискретизацию. Основной недостаток такого подхода заключается в наличии определенной методической ошибки при замене непрерывной функции $y(t)$ кусочно-постоянной функцией, и не позволяет учесть эффекта запаздывания цифрового регулятора. Тем не менее, этот подход получил широкое распространение ввиду его простоты и возможности достижения хорошего качества процессов при использовании быстродействующих вычислительных устройств с малым значением интервала квантования T .

Второй подход предполагает дискретизацию самого объекта управления, а затем синтез дискретного регулятора. Можно считать его более перспективным, хотя и несколько более сложным.

7.2. ЭВМ В КОНТУРАХ СИСТЕМ УПРАВЛЕНИЯ [10, 11].

Универсальность цифровых вычислительных машин как средства решения самых разнообразных задач, огромные объемы информации, перерабатываемые и хранимые в ЭВМ, мощные алгоритмические возможности сделали ЭВМ эффективным средством решения современных задач управления.

В современной теории и практике управления динамическими системами используются электронно-вычислительные машины (ЭВМ) различных типов, отличающиеся принципом действия, составом элементной базы, возможностями использования в системах управления.

ЭВМ общего назначения. Это такая архитектура вычислительных средств и программного обеспечения, которая позволяет единообразно решать большинство возникающих технических задач, включая задачи сопряжения с ЭВМ широкой номенклатуры внешних устройств и датчиков.

Использование ЭВМ общего назначения упрощает и ускоряет процесс разработки стандартного проекта в области автоматизации, однако конечное решение обычно не является оптимальным. ЭВМ общего назначения включает в себя стандартный набор компонентов:

- Центральный процессор (один или несколько) и арифметический сопроцессор.
- Быстродействующее запоминающее устройство.
- Внешние накопительные устройства различной природы.
- Мультимедийные (графическое и звуковое) устройства.
- Терминал пользователя (дисплей, клавиатура, мышь и т.п.).
- Средства сетевой поддержки.
- Возможность подключения дополнительных интерфейсных устройств, в том числе, и в виде контроллеров, присоединяемых к шине ЭВМ.
- Возможность установки разнообразного программного обеспечения.

Последние два свойства чрезвычайно важны, так как соответствуют открытости архитектуры такой ЭВМ. Именно открытость архитектуры РС совместимых компьютеров в 80-е годы 20 века сыграла решительную роль в повсеместном распространении этой техники. Свойство открытости архитектуры является неременным условием универсальности при широком применении.

На сегодняшний день этим требованиям в основном удовлетворяют персональные РС-совместимые компьютеры и контроллеры на базе их архитектуры. На такой базе строят системы автоматики, если к ним не предъявляются повышенные требования. Часто ПК используют на начальном этапе проектирования системы, когда требуется ускоренно получить работоспособную версию системы, необходимую для дальнейшей разработки. Обычно таким разработкам присущи следующие характерные недостатки:

- невысокая надежность, как аппаратной, так и программной части;
- узкий температурный диапазон, особенно в сторону отрицательных температур;
- низкое качество исполнения материнских плат и плат контроллеров;
- повышенный уровень помех и пульсаций по шинам питания.

Тем не менее, ПК с успехом используются в качестве интеллектуальных измерительных приборов. Например, осциллограф на базе ПК позволяет, помимо удобного и наглядного отображения процессов, вести их запись на диск для протоколирования и передавать по сети обобщающую информацию для диспетчерского управления более высокого уровня.

Специализированные ЭВМ и вычислительные комплексы. Это ЭВМ, имеющие функциональные возможности и конструктивные особенности, позволяющие использовать их для эффективного решения ограниченного класса задач в определённых условиях окружающей среды. Отличия от ЭВМ общего назначения могут быть разнообразными, например, процессор со специальной системой команд. Типичный пример - процессоры цифровой обработки сигналов (DSP), эффективные в задачах цифровой фильтрации в составе комплекса обработки данных ультразвуковой локации.

Вычислительный комплекс (ВК) - это комплекс средств ВТ, решающий прикладную задачу. В ВК могут входить разнородные компоненты. Обычно приходится применять

специализированные или проблемно-ориентированные вычислительные средства для оптимизации окончательного решения при проектировании систем автоматического управления.

Управляющие ЭВМ (УВМ), управляющие ВК (УВК) и промышленные ПК. УВМ и УВК характеризуются набором возможностей работы в режиме реального времени. Эти возможности касаются как подсистемы ввода-вывода, так и свойств операционной системы. Также следует отметить возможности обнаружения сбоев и быстрого восстановления после них. Промышленные (индустриальные) ПК - это специально спроектированные ПК, совместимые со стандартными архитектурно и программно, но отличающиеся конструктивным исполнением. Цель - повышение надёжности, помехозащищённости и расширения диапазона параметров окружающей среды нормального функционирования (температурный диапазон и т.п.). Преимущество таких ПК - возможность отладки программного обеспечения на обычных ПК.

Рабочие станции. Обычно это персональные компьютеры, находящиеся на рабочих местах сотрудников, решающих конкретную задачу с помощью ЭВМ. Поэтому рабочие станции оборудованы всеми необходимыми устройствами ввода-вывода. Обычно рабочие станции входят в сеть, в которой также имеются мощные серверы, поставляющие информационные ресурсы и необходимое сетевое программное обеспечение, хранение которого на рабочих станциях нецелесообразно. Рабочие станции не предназначены для работы в реальном времени и используются на диспетчерском уровне и на рабочих местах разработчиков.

Управление системами на базе ЭВМ. Использование ЭВМ в контуре управления динамическими автоматическими системами связано с решением ряда проблем, вытекающих из особенностей ЭВМ как дискретной системы. В САУ с ЭВМ необходимо решать вопросы связи ЭВМ с объектом управления и работы ЭВМ в реальном масштабе времени, в ритме работы объекта управления. Связь ЭВМ с объектами управления усложняется при использовании цифровых машин для управления непрерывными автоматическими системами.

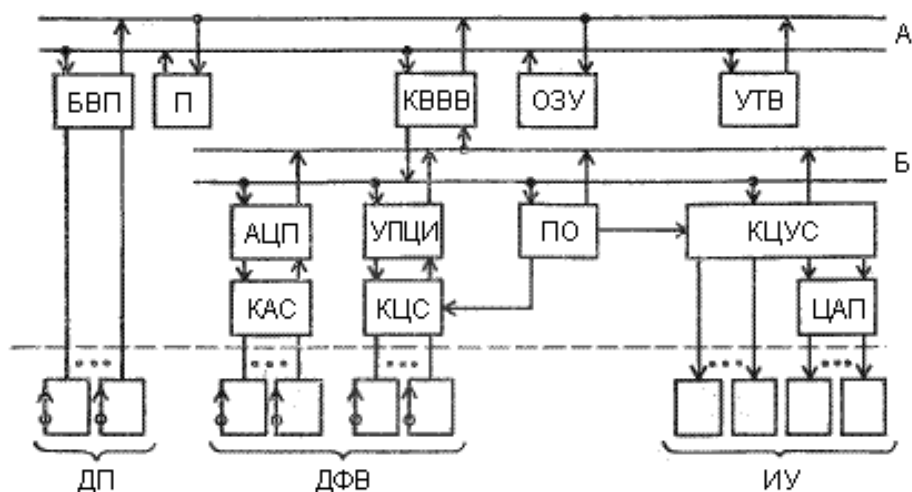


Рис. 7.2.1.

ЭВМ в системе автоматического управления осуществляет обработку информации о состоянии объекта, обеспечивает программное и оптимальное управление объектом. На рис. 7.2.1 приведен пример схемы автоматического управления технологическим процессом на базе ЭВМ.

Вся совокупность устройств, подсоединенная к интерфейсу Б, образует систему связи ЭВМ с объектом. Состояние объекта характеризует информация, поступающая от датчиков физических величин (ДФВ). Эта информация после преобразования в соответствующих звеньях системы связи с объектом поступает в ЭВМ и составляет поток измерительной информации. От ЭВМ на входы исполнительных устройств (ИУ), приводящих объект в требуемое состояние, поступает поток управляющей информации в виде цифровых или аналоговых сигналов. Управляющая информация с каналов ввода-вывода (КВВВ) поступает в коммутатор цифровых управляющих сигналов (КЦУС), с которого передается либо непосредственно на исполнительные устройства дискретного типа, либо в цифроаналоговый преобразователь (ЦАП) для преобразования и последующей передачи на входы аналоговых исполнительных устройств.

К интерфейсу А вместе с каналами ввода-вывода подключен блок внешних прерываний (БВП) процессора (П) и устройство текущего времени (УТВ). БВП по сигналам от датчиков прерывания (ДП), связанных с объектом управления, и сигналам от УТВ формирует различные циклы обработки информации и управления объектом.

Коммутатор аналоговых сигналов (КАС) и коммутатор цифровых сигналов (КЦС), связанный с устройством приема цифровой информации (УПЦИ), составляют входной

коммутатор системы управления, который осуществляет раздельное во времени подключение датчиков. Коммутатор цифровых управляющих сигналов (КЦУС) является выходным коммутатором, осуществляющим раздельное во времени подключение входов исполнительных устройств.

Исполнительные устройства используют либо аналоговые сигналы, либо дискретные, причем длительность дискретных сигналов обычно значительно превышает длительность сигналов управляющей информации. В связи с этим система связи ЭВМ с объектом управления должна содержать технические средства, запоминающие управляющую дискретную информацию до замены ее новой информацией или формирующие управляющие воздействия, воспринимаемые входами исполнительных устройств.

Связь ЭВМ с объектом в системе автоматического управления может быть синхронной, асинхронной и комбинированной.

При синхронной связи процесс управления с помощью тактовых сигналов устройства текущего времени (УТВ) разбивается на циклы одинаковой продолжительности. Каждый цикл начинается с появлением тактового сигнала на входе блока прерывания. В начале цикла осуществляется последовательный опрос датчиков, контролирующих состояние объекта управления. Сигналы датчиков преобразуются в форму, необходимую для ввода этих сигналов в ЭВМ. Поступившая в ЭВМ информация обрабатывается, и формируются управляющие воздействия на объект, которые после соответствующего преобразования в системе связи ЭВМ с объектом передаются на исполнительные устройства. Затем ЭВМ либо останавливается, либо выполняет другие программы, не связанные с системой автоматического управления. Выполнение этих программ прерывается следующим тактовым сигналом УТВ. Управляющие воздействия, сформированные в начале цикла, остаются неизменными в течение всего цикла.

При асинхронной связи с объектом ЭВМ реагирует на сигналы прерывания, поступающие от датчиков прерывания, непосредственно связанных с объектом. Каждому сигналу прерывания соответствует переход ЭВМ к выполнению соответствующей программы, определяемой характером прерывания. Сигналы прерывания отрабатываются ЭВМ с учетом уровня приоритета.

При комбинированной связи ЭВМ с объектом управление осуществляется как по тактовым сигналам УТВ, так и по сигналам прерывания, например по сигналам аварийного режима объекта управления.

В ряде случаев целесообразно использовать прямое цифровое управление объектом на базе ЭВМ. В этих случаях ЭВМ выполняет функции регулятора контура управления. Датчик заданных значений величин, сложение задающих сигналов, сигналов обратных связей и регулятора реализуются в виде программных алгоритмов, а устройство сбора и регистрации переменных состояния и выдачи управляющих воздействий - в виде программируемого функционального устройства. Алгоритмы прямого цифрового управления могут быть построены подобно алгоритмам аналогового регулирования.

Существенно расширяются возможности управления в системах, функционирующих на базе микро-ЭВМ. Здесь становится возможным использовать все преимущества микропрограммирования, позволяющего реализовать набор машинных команд стандартных ЭВМ, а также специальные наборы команд для определенных областей управления. Кроме того, можно реализовать конструкции языка программирования высокого уровня, ядро операционной системы реального времени, диагностические функции для быстрого обнаружения ошибок и сбоев. Возможность распараллеливания на микропрограммном уровне отдельных элементарных операций позволяет значительно повысить быстродействие исполнения алгоритмов.

2.7.3 Результаты и выводы:

1. Цифровые системы управления. Укрупненная схема. Эквивалентная схема цифровой системы управления. Особенности цифровых систем.

2. ЭВМ в контурах систем управления. ЭВМ общего назначения. Специализированные ЭВМ и вычислительные комплексы. Управляющие ЭВМ, управляющие ВК и промышленные ПК. Рабочие станции. Управление системами на базе ЭВМ.

3. Системы управления предприятием. Основные понятия. Уровни систем управления. Информационный продукт. Информационные системы. Информационная система управления предприятием. Задачи ИСУП. Контроллинг. Перспективы развития ИСУП и контроллинга. Рынок ИСУП. ИСУП в решении задач контроллинга.

4. Обеспечение работы систем управления. Техническое обеспечение СУ. Информационное обеспечение. Математическое обеспечение. Программное обеспечение. Лингвистическое обеспечение.

5. Программное обеспечение систем управления. Структура программного обеспечения. Системное программное обеспечение. Операционные системы реального времени. Прикладное программное обеспечение для САУ. Инструменты разработки и отладки программного обеспечения. Сопровождение программного обеспечения.