

**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 заочная

СОДЕРЖАНИЕ

1.	Конспект лекций	3
1.1	Лекция № 1,2 Фундаментальные принципы управления.....	3
1.2	Лекция № 3 Математические модели систем управления.....	11
2.	Методические материалы по проведению практических занятий	19
2.1	Практическое занятие № ПЗ-1,2,3 Знакомство с интерфейсом и принципами построения моделей в программном комплексе «МВТУ».....	19
2.2	Практическое занятие № ПЗ-4,5 Моделирование и исследование структурных схем вход-состояние-выход.....	23
2.3	Практическое занятие № ПЗ-6,7 Моделирование СУ с использованием блока «Язык программирования» (МВТУ).....	27
2.4	Практическое занятие № ПЗ-8 Анализ систем управления с ЭВМ в качестве управляющего устройства.....	34

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.

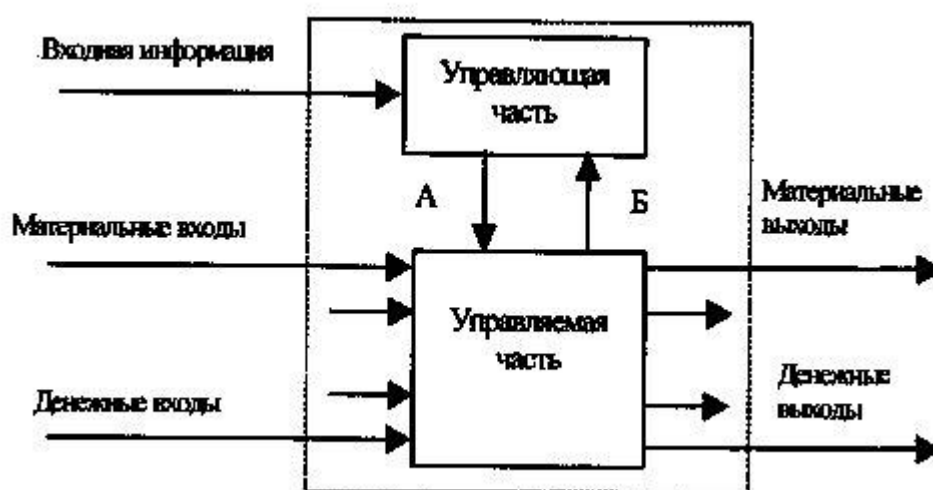


Рис. 29. Взаимодействие управляющей и управляемой частей в организации

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.

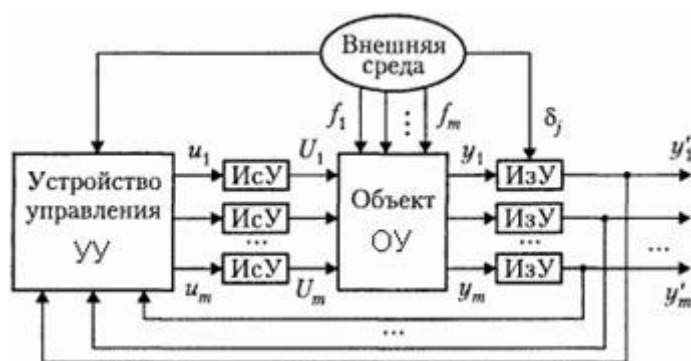
Число элементов, разнообразие связей, вероятностная природа законов функционирования делает эти системы настолько сложными, что их полное формальное описание не представляется возможным. Потребность в управлении сложными системами привела к созданию специальных методов.

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 состояниями, 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 $y_j = y_j(t)$ 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 альтернативны, 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. Пассивный 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 регрессионный 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 $W(jw)$, амплитудно-частотная характеристика $W(w)$, фазо-частотная характеристика (w) . может быть изображена на комплексной плоскости в виде годографа

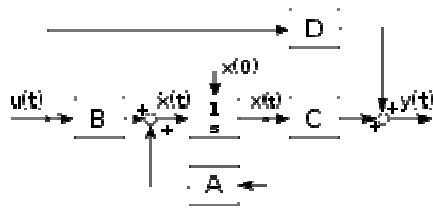
4. Метод пространства состояний.

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 состояния описание имеет вид:

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

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

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:

$$\begin{aligned}\dot{x}_1 &= f_1(x_1(t); \dots, x_n(t), u_1(t), \dots, u_m(t)) \\ &\vdots \\ \dot{x}_n &= f_n(x_1(t); \dots, x_n(t), u_1(t), \dots, u_m(t))\end{aligned}$$

или в более компактной форме:

$$\begin{aligned}\dot{\mathbf{x}}(t) &= \mathbf{f}(t, \mathbf{x}(t), \mathbf{u}(t)) \\ \mathbf{y}(t) &= \mathbf{h}(t, \mathbf{x}(t), \mathbf{u}(t))\end{aligned}$$

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

Линеаризация

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

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

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

Вводя обозначения:

$$\begin{aligned}\delta \mathbf{u} &= \mathbf{u} - \tilde{\mathbf{u}} \\ \delta \mathbf{x} &= \mathbf{x} - \tilde{\mathbf{x}}\end{aligned}$$

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

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

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:

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

Аналогично для функции выхода:

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

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

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

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

где

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

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:

$$\dot{x}_1(t) = x_2(t)$$

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

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:

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

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

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

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).

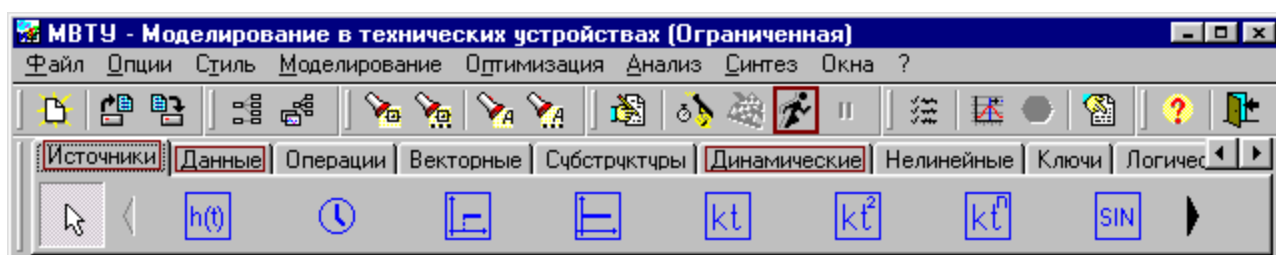


Рис. 1. Основная панель ПК "МВТУ". Выделены кнопка Пуск (Продолжить расчет) и три важных вкладки **Палитры** с наборами элементов (виртуальных блоков), которые будут использоваться при моделировании: **Источники** сигналов (генераторы) – вкладка открыта, **Данные** (индикаторы и регистраторы) и **Динамические**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

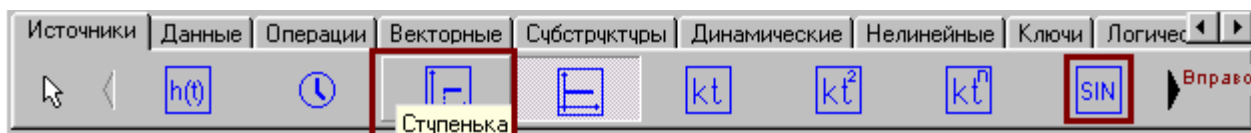


Рис. 2. Часть набора виртуальных генераторов, имеющих на вкладке **Источники**. Важными источниками сигналов являются генераторы ступенчатого и синусоидального сигналов. Кнопка со стрелкой Вправо позволяет посмотреть и другие источники сигналов.

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, аperiodическое 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.

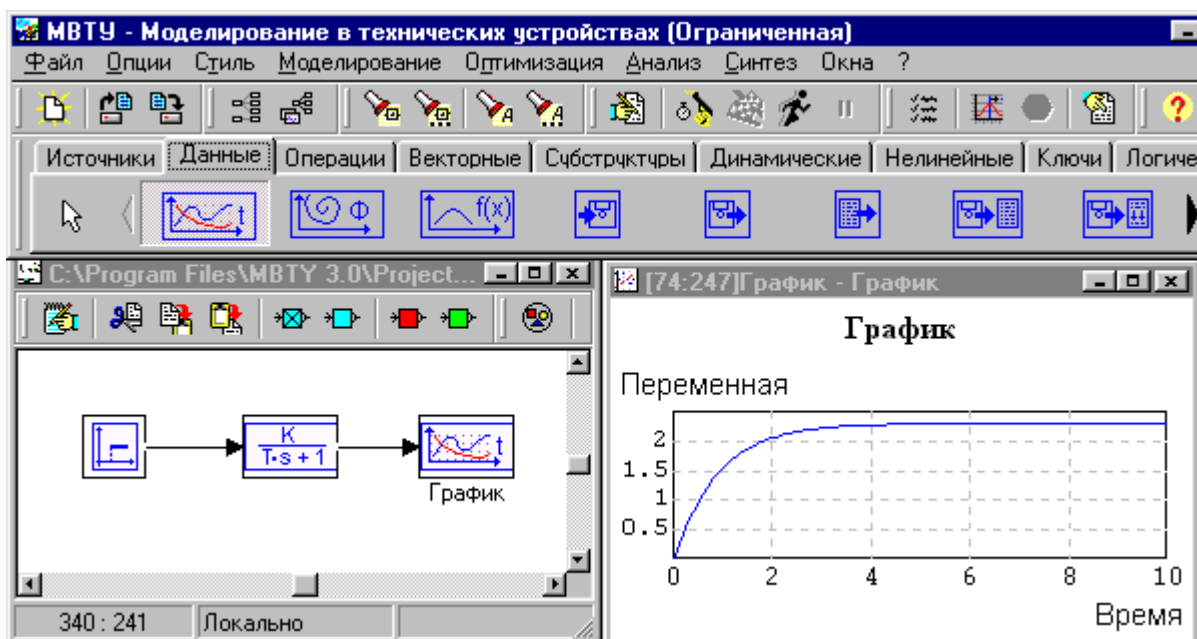


Рис. 5. Определение переходной функции апериодического звена. На левое нижнее окно модели вынесены и соединены друг с другом генератор ступенчатого сигнала, апериодическое звено и осциллограф. При запуске модели, нажатием на кнопку **Пуск** (Продолжить расчет CTRL+ F9) - бегущий человек, на осциллографе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

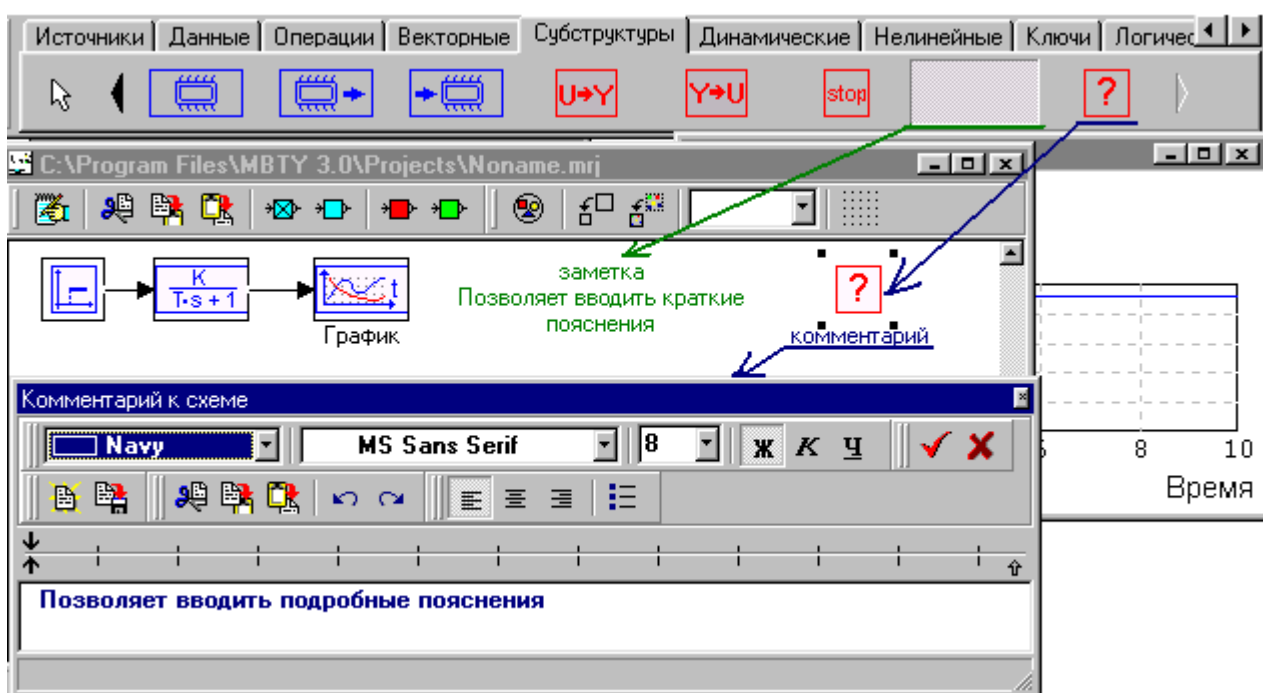


Рис.6. Блоки **заметка** и **комментарий** выносятся на рабочее пространство окна модели с вкладки **Субструктуры**. Внизу показано окно просмотра и редактирования комментария.

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

2.2.1 Задание для работы:

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

2.2.2 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 типовый блок **Дифференцирование**. Подобные схемы позволяют строить обратные модели (данная схема является обратной моделью для интегратора).

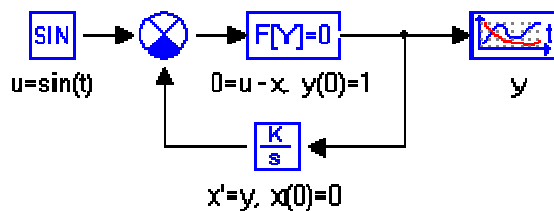


Рис. 7. Модель, описываемая системой ДАУ индекса 2
(дифференцирование входного сигнала).

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.

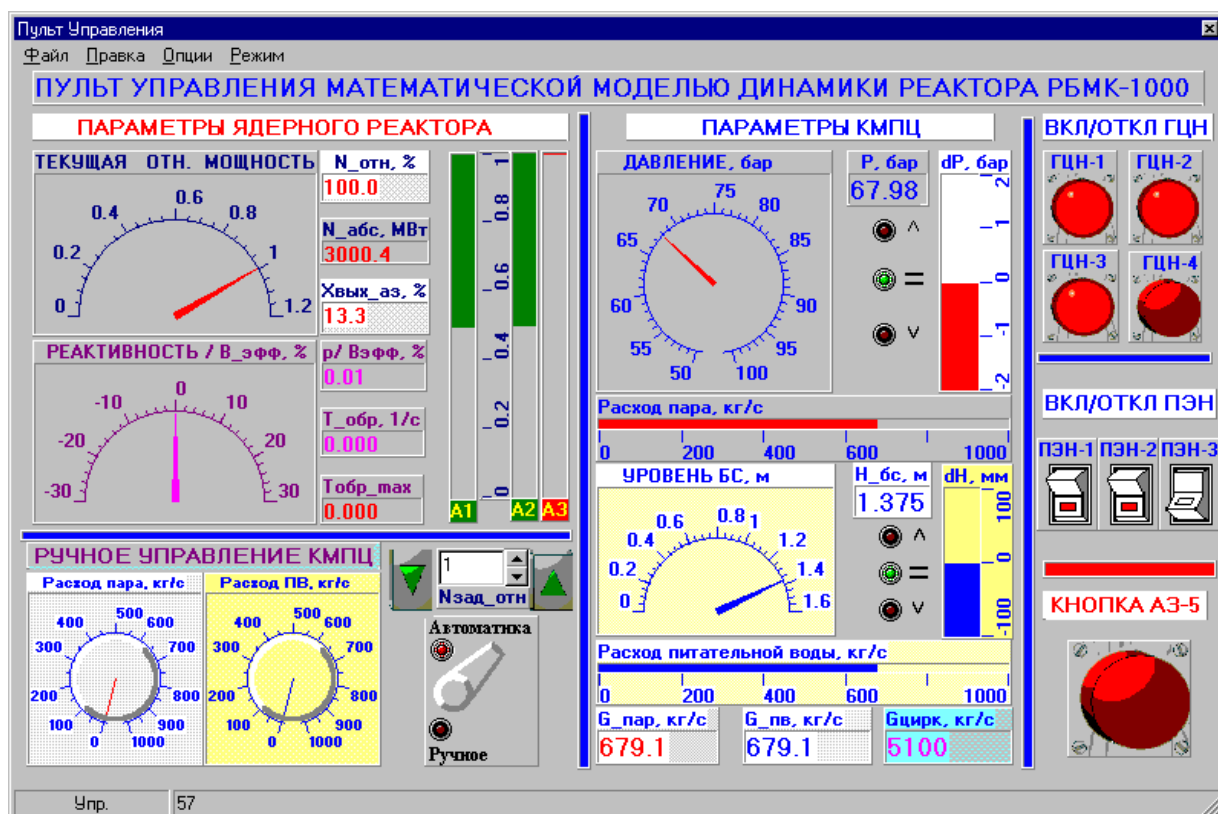


Рис. 8. Панель управления.

2.2.3 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.

2.3 Практическое занятие №6,7 (4 часа)

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

2.3.1 Задание для работы:

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

2.3.2 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.mtg). Применяя для дискретизации этого уравнения метод прямых, получим систему ОДУ

$$T_i' = K(T_{i-1} - 2T_i + T_{i+1}), \quad T_i(0) = T^0, \quad i = 2, \dots, N-1;$$
$$T_1 = u(t), \quad T_N = v(t), \quad K = \frac{\alpha}{\Delta x^2}, \quad \Delta x = \frac{1}{N-1}.$$

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 \Демо\Язык_программирования\Фильтр_БПФ.mtj). 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.

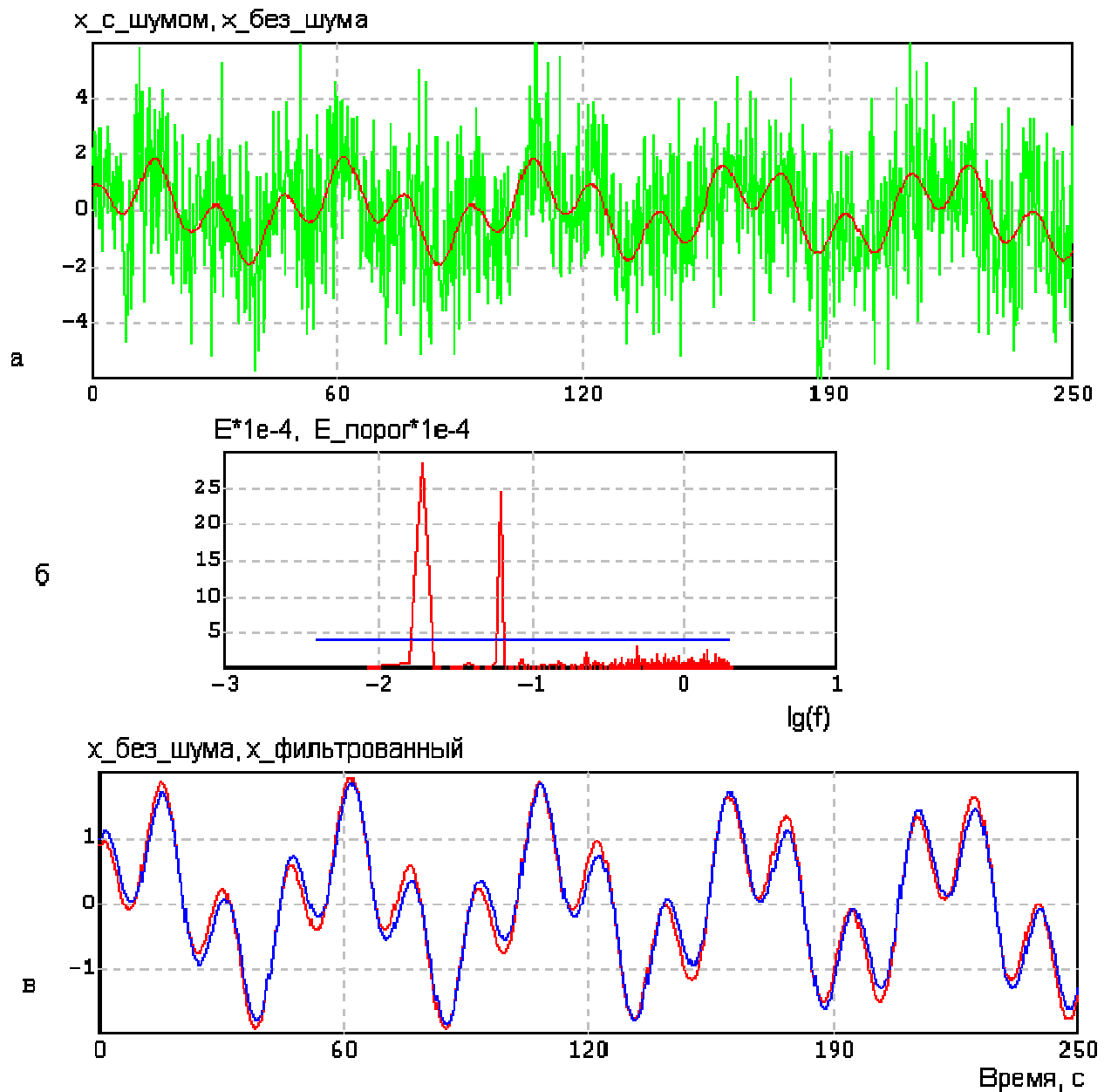


Рис. 2. Фильтрация сигнала с помощью БПФ: а - зашумленный сигнал (зеленая линия) и исходный сигнал (красная линия); б –спектральная плотность (красная линия) и порог для спектральной плотности (синяя линия); в – исходный сигнал (красная линия) и фильтрованный сигнал(синяя линия).

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.mrf), показана на рис. 3. В этом примере моделирование выполняется с использованием типового блока **Анимация**, демонстрирующего движение бруска в реальном масштабе времени.

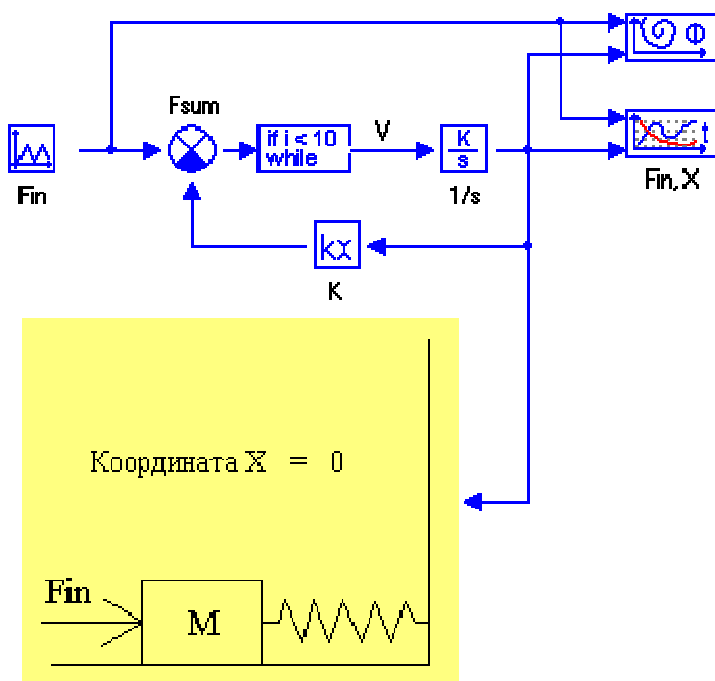


Рис. 3. Модель движения бруска с сухим трением.

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

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.

2.3.3 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 (2 часа)

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

2.4.1 Задание для работы:

1. Анализ систем управления с ЭВМ в качестве управляющего устройства

2.4.2 Краткое описание проводимого занятия:

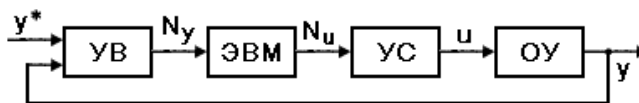


Рис. 7.1.1.

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, получившие 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 n_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_τ), 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:

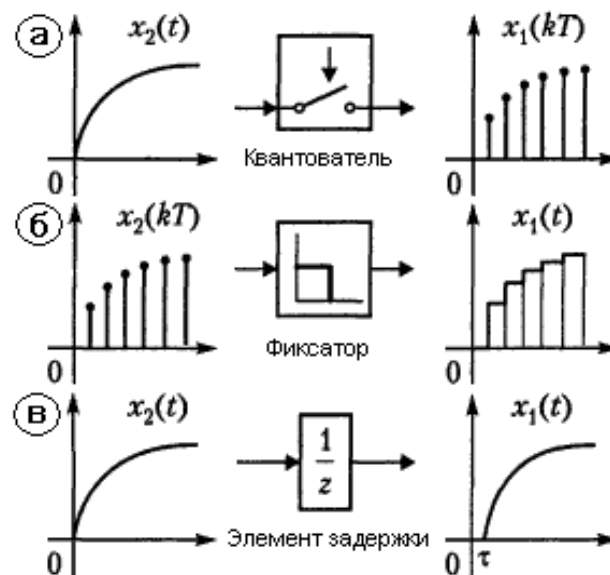


Рис. 7.1.2.

- 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 τ , рис. 7.1.2, в) с характеристикой

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

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.

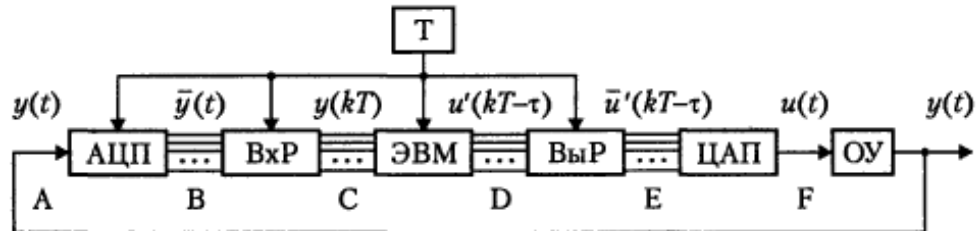


Рис. 7.1.3.

Функциональная схема содержит АЦП, входным сигналом которого является непрерывный сигнал $y(t)$ (точка А), а выходным кусочно-постоянный сигнал $\bar{y}(t) = y(kT)$ (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.

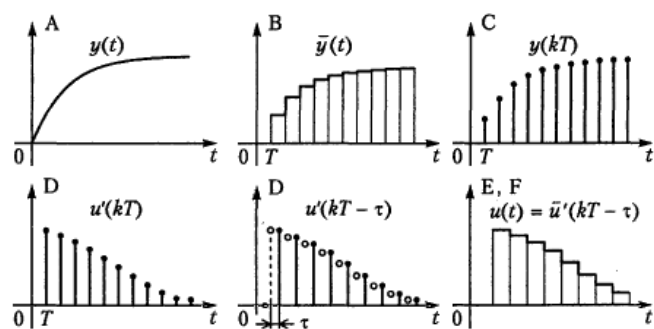


Рис. 7.1.4.

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 $u'(kT - \tau T)$, сигнал $u'((k-1)T) \cdot \tau T$, или, полагая для простоты

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

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.

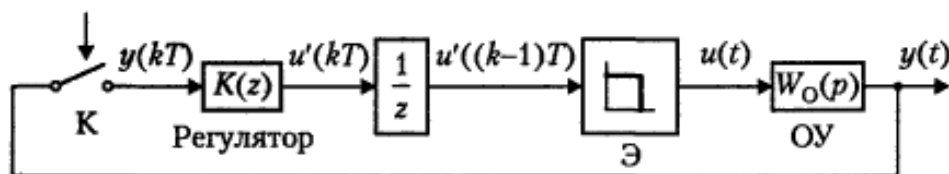


Рис. 7.1.5.

Рис. 7.1.5. 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:

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

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

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

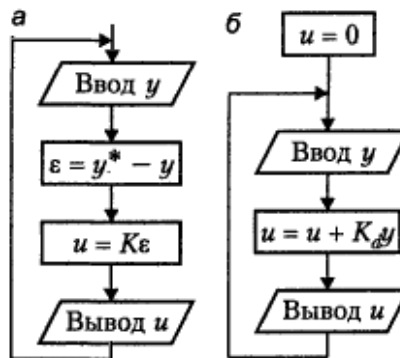


Рис. 7.1.6.

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 $(k+1)T$:

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

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 использованием теории непрерывных систем;
- с использованием 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.

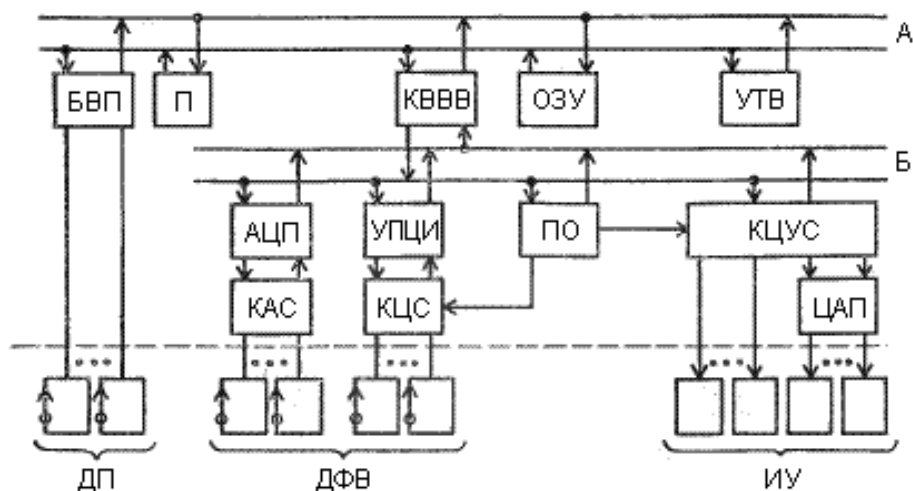


Рис. 7.2.1.

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 (ВВП) процессора (П) и устройство текущего времени (УТВ). ВВП 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. Вначале 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 обрабатываются 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.

2.4.3 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.