

МИНИСТЕРСТВО НАУКИ И ВЫСШЕГО ОБРАЗОВАНИЯ РОССИЙСКОЙ
ФЕДЕРАЦИИ
ФЕДЕРАЛЬНОЕ ГОСУДАРСТВЕННОЕ БЮДЖЕТНОЕ ОБРАЗОВАТЕЛЬНОЕ
УЧРЕЖДЕНИЕ ВЫСШЕГО ОБРАЗОВАНИЯ
«РЯЗАНСКИЙ ГОСУДАРСТВЕННЫЙ РАДИОТЕХНИЧЕСКИЙ
УНИВЕРСИТЕТ
ИМЕНИ В.Ф. УТКИНА»

Кафедра «Радиоуправления и связи»

МЕТОДИЧЕСКОЕ ОБЕСПЕЧЕНИЕ
по дисциплине

«Системы сигнализации и синхронизации в сетях связи»
Специальность подготовки – 11.04.02 «Инфокоммуникационные технологии и
системы связи»

Специальность (профиль) подготовки
Интеллектуальные системы и сети телекоммуникаций

Квалификация выпускника – магистр
Форма обучения – очная

Рязань 2025г.

4921

МИНИСТЕРСТВО ОБРАЗОВАНИЯ И НАУКИ РОССИЙСКОЙ ФЕДЕРАЦИИ

ПЕЧАТНИК ГОСУДАРСТВЕННЫЙ РАДИОТЕХНИЧЕСКИЙ УНИВЕРСИТЕТ

ИССЛЕДОВАНИЕ ЛИНЕЙНОЙ СЛЕДЯЩЕЙ САУ

Методические указания к лабораторной работе

Рязань 2015

Исследование линейной следящей САУ: методические указания к лабораторной работе / Рязань, гос. радиотехн. ун-т, доц. А.А. Смирнов. – Рязань, 2015. – 16 с.

Изложены основные методы машинного моделирования и анализа следящих систем автоматического управления.

Предназначены для студентов старших курсов специальности 11.05.01 «Радиотехнические системы и комплексы» радиотехнического факультета.

Ил. 3. Библиогр.: 9 назв.

Системы автоматического управления, периодические функции, аналитические характеристики, численные методы решения дифференциальных уравнений

Печатается по решению редакционно-издательского совета Рязанского государственного радиотехнического университета.

Рецензент: кафедра Радиотехники и связи Рязанского государственного радиотехнического университета (зав. кафедрой проф. С.Н. Кирпичев)

Исследование линейной следящей САУ

Составитель: Смирнов Александр Александрович

Редактор Н.А. Орлова

Корректор С.Н. Мамулина

Подписано в печать 30.04.15. Формат бумаги 60х84 1/16

Бумага белая. Печать трафаретная. Усл. печ. л. 1,0.

Тираж 50 экз. Заказ 3034

Рязанский государственный радиотехнический университет.

390005, Рязань, ул. Гагарина, 59/1.

Редакционно-издательский центр ИТРТУ

МАТЕМАТИЧЕСКОЕ ОПИСАНИЕ СИСТЕМ АВТОМАТИЧЕСКОГО УПРАВЛЕНИЯ

1. Математическая модель САУ

На этапе разработки и исследования системы автоматического управления (САУ) получают ее математическое описание, которое может быть аналитическим (с помощью уравнений), графическим (с помощью графиков, структурных схем и графиков) и табличным (с помощью таблиц).

Для получения математического описания системы обычно составляют описание ее отдельных элементов. В частности, для получения уравнений системы составляют уравнения для каждого входного в нее элемента. Совокупность всех уравнений элементов и дает уравнения системы.

Уравнения (а также структурные схемы) системы автоматического управления называют ее математической моделью. Математическая модель одной и той же системы в зависимости от цели исследования может быть разной. Более того, иногда полезно при решении данной и той же задачи на разных этапах принимать разную математическую модель: начать исследование с простейшей модели, а затем ее постепенно усложнять с тем, чтобы учесть дополнительные явления и связи, которые на начальном этапе были отброшены как несущественные. Сказанное обуславливается тем, что к математической модели предъявляются противоречивые требования: она должна, с одной стороны, как можно полнее отражать свойства объекта ориентации, а с другой – быть по возможности простой, чтобы не усложнять исследование.

Во многих автоматических системах процессы описываются дифференциальными, разностными, дифференциально-разностными, интегральными и интегро-дифференциальными уравнениями.

2. Передаточные функции. Временные характеристики. Оценка качества переходного процесса

Расмотрим линейную стационарную САУ, имеющую одно входное управляющее воздействие $u(t)$ и один выходной сигнал $x(t)$. В общем случае подобные системы описываются линейными дифференциальными уравнениями произвольного порядка с постоянными коэффициентами:

$$Q(p)x(t) = R(p)u(t), \quad (1)$$

где p – оператор дифференцирования, т.е. $\frac{d}{dt} = p$, $\frac{d^2}{dt^2} = p^2$,

$\mathcal{L}\{p\} = \sum_{i=0}^{n-1} a_i p^i$ - дифференциальный оператор при входной величине,

который называют собственным оператором, $R(p) = \sum_{i=0}^{m-1} a_i p^i$ - дифференциальный оператор при выходной величине, который называют оператором воздействия, при этом $n \geq m$.

Отношение оператора воздействия $R(p)$ к собственному оператору $\mathcal{L}\{p\}$ называют передаточной функцией или передаточной функцией в операторной форме $W(p) = R(p)/\mathcal{L}\{p\}$.

Исходную передаточную функцию $W(p)$, уравнение (1) записывают в виде

$$x(t) = W(p)u(t).$$

Это уравнение, представляющее условную, более компактную форму записи исходного уравнения (1), называют уравнением в символической или операторной форме записи.

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 при нулевых начальных условиях.

Если звено (система) имеет несколько входов, то при определении передаточной функции относительно какой-либо одной входной величины остальные величины принимают равными нулю.

Другой важной характеристикой автоматических систем (звеньев) является переходные и импульсные переходные функции и их графики - временные характеристики.

Переходной функцией системы (звена) называют функцию, описывающую реакцию системы (звена) на единичную функцию $h(t)$ при нулевых начальных условиях.

График переходной функции - кривая зависимости функции $h(t)$ от времени t - называют переходной характеристикой.

Импульсной переходной или весовой функцией системы (звена) называют функцию, описывающую реакцию системы (звена) на единичное импульсное воздействие при нулевых начальных условиях; обозначают эту функцию $w(t)$. Математически единичное импульсное воздействие описывается дельта-функцией $\delta(t)$.

График импульсной переходной функции называют импульсной

переходной характеристикой.

Временные характеристики, как и передаточные функции, являются неперывающими характеристиками системы (звена) при нулевых начальных условиях. По ним можно однозначно определить выходную величину $x(t)$ при произвольном входном воздействии $u(t)$, используя формулу свертки:

$$x(t) = \int_0^t w(\tau)u(t-\tau)d\tau.$$

При исследовании систем автоматического управления приходится решать задачу обеспечения требуемых показателей качества переходного процесса: быстроты действия, колебательности, перерегулирования, характерных точек точности и плавности протекания процесса.

При этом показатели качества, определяемые непосредственно по кривой переходного процесса, называют прямыми оценками качества.

Прямые оценки качества получают по кривой переходной характеристики $h(t)$ (рис. 1), т.е. при воздействии на систему единичной ступенчатой функции $u(t)$, и нулевых начальных условиях.

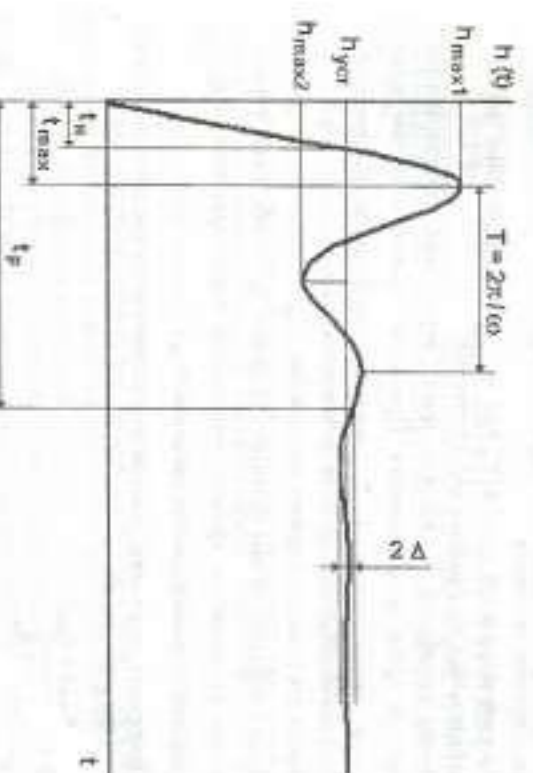


Рис. 1. Типичный вид переходной характеристики

К прямым показателям качества относятся следующие характеристики:

1. Время регулирования t_p – минимальное время, по истечении которого выходящая (регулируемая) величина будет отличаться от заданной к установленному значению с заданной точностью $|h(t) - h_{уст}| \leq \Delta$, где Δ – минимальное значение, значение которой задается в процентах от установившегося значения выходной величины $h_{уст}$.
2. Перегуливание σ – максимальное отклонение переходной характеристики от установившегося значения выходной величины, выраженное в относительных единицах или процентах: $\sigma = \frac{h_{max} - h_{уст}}{h_{уст}} \cdot 100\%$,

где h_{max} – значение первого максимума $h(t)$. Допустимое значение перегуливания в каждом конкретном случае определяется опытом эксплуатации системы, обычно $\sigma = 10 - 30\%$, но в некоторых случаях допускается и до 70% . Иногда перегуливание не допускается совсем.

3. Частота колебаний $\omega = 2\pi/T$, где T – период колебаний для колебательных переходных характеристик.
4. Число колебаний n , которое имеет переходная характеристика $h(t)$ за время регулирования. При проектировании систем чаще всего допускается $n = 1 - 2$, а иногда и до $3 - 4$, но в некоторых случаях колебания в системе не допускаются.
5. Время достижения первого максимума t_{max} .
6. Время нарастания переходного процесса t_0 – абсцисса первой точки пересечения кривой переходной характеристики $h(t)$ с уровнем установившегося значения $h_{уст}$.
7. Декремент затухания, равный отношению модулей двух смежных перегуливаний:

$$\chi = \frac{|h_{max1} - h_{уст}|}{|h_{max2} - h_{уст}|}$$

Перечисленные показатели качества могут быть дополнены другими, но это обусловлено спецификой конкретной системы.

Необходимо отметить, что в настоящее время при бурном развитии вычислительной техники трудности, связанные с расчетом переходных процессов и выбором возможных вариаций параметров систем, уменьшаются, поэтому роль прямых оценок качества при проектировании систем автоматического управления существенно возрастает.

3. Применение ПЭВМ для анализа и синтеза САУ

Решение задач анализа и синтеза сложных САУ привело к необходимости использования персональных электронных вычислительных машин различных классов. ПЭВМ отличается более высокой точностью вычислений, определением длины разрывной сетки машины, универсальностью и решением различных классов задач, широким диапазоном возможностей.

В развитии вычислительных методов анализа и синтеза автоматических систем существуют два основных направления [1].

1. Матричные реализации сложившихся при ручном счете и хорошо зарекомендовавших себя на практике методов с резким увеличением количества обрабатываемой информации.
2. Разработка и постановка на ПЭВМ новых или известных, но не применявшихся ранее метода большой трудности методов исследования систем.

К первому направлению относятся постановка на ПЭВМ частотных методов, широкое использование алгебраических критериев устойчивости, а также анализ и синтез линейных систем большой размерности.

Ко второму направлению относят:

- методы линейного и нелинейного программирования, динамическое программирование безданных;
- методы статистического анализа систем управления, основанные на использовании метода статистических испытаний (Монте-Карло);
- численные методы решения дифференциальных уравнений и др.

Существующие численные методы интегрирования обыкновенных дифференциальных уравнений позволяют непосредственно получить кривые переходных процессов.

Наиболее распространенным в настоящее время способом решения задач на ПЭВМ является использование пакетов прикладных программ, обеспечивающих работу проектировщиков в диалоговом режиме, и удобный графический интерфейс пользователя.

4. Численные методы решения дифференциальных уравнений

Многие важные задачи анализа и синтеза САУ решаются нахождением корней переходных процессов (выявление интервала устойчивого функционирования автоматической неустойчивой системы, оптимальный синтез). Построить переходный процесс — это значит проинтегрировать дифференциальное уравнение и получить решение, удовлетворяющее заданным начальным условиям и возможным дополнительным. Интегрирование может быть осуществлено различными численными методами. К таким методам относятся методы Эйлера, Рунге-Кутты, Адамса, Хамминга, Гира.

Рассмотрим скалярное дифференциальное уравнение

$$\dot{x} = f(x, y); \quad x(0) = x_0.$$

Получить точное решение уравнения аналитическими методами удается весьма редко, поэтому становится задача приблизить точное решение с помощью вычислительных (численных) методов.

Используются для обширных классов вычислительных методов. К первому относятся одношаговые (одноступенчатые) методы. В этих методах для нахождения следующей точки x_{k+1} кривой требуется информация только в одной предыдущей точке (x_k, t_k) :

$$x_{k+1} = f(x_k, t_k).$$

К этому классу относятся решение с помощью разложения в ряд Тейлора, метод Эйлера, Эйлера-Коши, Рунге-Кутты. Простейшим является метод Эйлера, основанный на вычислении точки x_{k+1} посредством приращенной экстраполяции из предыдущей точки x_k .

Метод Эйлера можно рассматривать как приближенное значение двух членов ряда Тейлора. Наилучшее решение $x(t)$ в начальной точке определяется по формуле

$$x_0 = f(x_0, t_0).$$

Приближение x_1 к $x(t)$ находится с помощью двух первых членов ряда:

$$x(t_1) = x_0 + hf'(x_0, t_0).$$

Подставив $t_2 = t_1 + h$, находим $x(t_2) = x_1 + hf'(x_1, t_1)$ и т.д. Этот процесс можно продолжать по формуле

$$x_{k+1} = x_k + hf'(x_k, t_k), \quad k = 0, 1, 2, \dots$$

Погрешность метода имеет порядок $O(h^2)$, так как члены ряда Тейлора, содержащие h во второй и более высоких степенях, отбрасываются.

Точность метода можно увеличить на порядок, если использовать среднее значение производной в начале и конце интервала шага. Геометрически это означает, что найден касательной на середине шага. Такой усовершенствованный метод Эйлера $x_{k+1} = x_k + hf(x_k, t_k + h)$ считается с разложением в ряд Тейлора вплоть до членов степени h^2 . Порядок ошибки составляет $O(h^3)$.

Расчетная формула имеет вид:

$$x_{k+1} = x_k + 0.5(K_1 + K_2),$$

где

$$K_1 = hf(x_k, t_k); \quad K_2 = hf(x_k + K_1, t_k + h), \quad K = 0, 1, \dots, k-1.$$

Таким образом, простой и усовершенствованный метод Эйлера можно рассматривать как приближенное, использующее два и три члена ряда Тейлора соответственно.

Если использовать большее число членов ряда Тейлора

$$x(t+h) = x(t) + hf(t) + \frac{h^2}{2!} x'(t) + \dots$$

то можно получить методы более высокого порядка точности. Использование первых пяти членов ряда Тейлора дает классический метод Рунге-Кутты четвертого порядка точности

$$x_{k+1} = x_k + \frac{h}{6}(K_1 + 2K_2 + 2K_3 + K_4),$$

где

$$K_1 = f(x_k, t_k); \quad K_2 = f(t_k + h/2, x_k + K_1/2); \quad K_3 = f(t_k + h/2, x_k + K_2/2);$$

$$K_4 = f(t_k + h, x_k + K_3).$$

В методе Рунге-Кутты четвертого порядка не требуется вычисления производных, функции вычисляются четыре раза для приращения на один шаг вперед. Так как формулы описывают метод четвертого порядка точности, то порядок погрешности метода составляет

$$O(h^5). \text{ Для выбора шага может быть использована оценка } \left[\frac{K_3 - K_4}{K_4 - K_2} \right],$$

которая не должна превышать нескольких сотых. Имеется модифицированная формула Рунге-Кутты

Можно построить формулы Рунге-Кутты высших степеней, при этом основная часть расчетов приходится на счет правой части уравнения. Формулы степени точности p требуют p -кратного вычисления правой части. Это может привести к значительному увеличению затрат машинного времени. С другой стороны, увеличение порядка метода

допускает использование большего шага h . Методы Рунге-Кутты легко программируются.

Перечисленные методы могут быть как явными, так и неявными. Явные методы называются по той причине, что исходное значение x_{k+1} на $(k+1)$ -м шаге выражается явно, через значения x_k и f_k , полученные на предыдущих шагах. Например, переходные процессы для явного метода Эйлера рассчитывают по формуле

$$x_{k+1} = x_k + hf'(x_k, t_k).$$

Неявные методы — это такие, в которых исходное значение x_{k+1} определяется неявно, т.е. через значения x_{k+1} и f_{k+1} на том же шаге. Для неявного метода формула Эйлера имеет вид:

$$x_{k+1} = x_k + hf'(x_{k+1}, t_{k+1}).$$

Видно, что в этом методе можно брать любой шаг, меняя только шаг построения прямых. Метод устойчив при любых значениях $h(h > 0)$.

Вычисление x_{k+1} в неявных методах сложнее, чем в явных, так как приходится решать систему алгебраических уравнений. Так как неявные методы устойчивы при любом h , то при интегрировании одностепенных кинематических систем общая трудоемкость может быть меньше.

Ко второму классу относятся многошаговые (многоуравнительные) методы. Их отличительная черта — использование информации при вычислении следующей точки (x_{k+1}, t_{k+1}) не только в точке (x_k, t_k) , но и в предыдущих точках.

Многошаговые методы послужили базой для создания методов с протозом и коррекцией. Как следует из названия, вначале протозом вычисляется значение x_{k+1} (протоз), а затем оно каким-либо способом исправляется (коррекция). Для корректировки можно использовать ту же самую формулу. Итерационный процесс повторяется до тех пор, пока не достигнута заданная точность. Однако, как правило, метод зурится для формулы, используемые соответственно формулами протоза и коррекции. Так как многошаговые методы не обладают «стартовыми» свойствами, то начинать решение надо с помощью одностепенных методов. Чаще всего для начала решения используется метод Рунге-Кутты. В настоящее время для интегрирования систем $\dot{x} = f(x, t)$ широко используются методы Адамса-Башфорта и Хамминга.

Общая формула протоза для методов четвертого порядка точности имеет вид:

$$x_{k+1} = A_0 x_k + A_1 x_{k-1} + A_2 x_{k-2} + h(B_0 x'_k + B_1 x'_{k-1} + B_2 x'_{k-2} + B_3 x'_{k-3}) + O\left(\frac{h^5 x^{(5)}}{5!}\right)$$

где $x'_k = f(x_k, t_k)$;

$$A_0 = 1 - A_1 - A_2; B_0 = (55 + 9A_1 + 8A_2)/24;$$

$$A_1 = A_2; B_1 = (-59 + 19A_1 + 32A_2)/24;$$

$$A_2 = A_2; B_2 = (37 + 5A_1 + 8A_2)/24;$$

$$B_3 = (-251 - 19A_1 - 8A_2)/6; B_1 = (-9 + A_0)/24.$$

Формула протоза типа Адамса-Башфорта может быть получена интегрированием обратной интерполяционной формулы Ньютона.

Протоз по методу Адамса-Башфорта осуществляется по формуле

$$x_{k+1} = x_k + \frac{1}{24}h(55x'_k - 59x'_{k-1} + 37x'_{k-2} - 9x'_{k-3}) + \left[\frac{251}{720}h^2 x^{(2)}\right].$$

Коррекция выполняется по формуле

$$x_{k+1} = x_k + \frac{1}{24}h(9x'_{k+1} + 19x'_k - 5x'_{k-1} + x'_{k-2}) + \left[\frac{19}{720}h^2 x^{(2)}\right].$$

Последние члены в обеих формулах в действительности в вычислениях не используются и служат для оценки ошибок дискретизации (усечения).

В распространенном в настоящее время методе Хамминга используются следующие формулы протоза и коррекции:

$$x_{k+1} = x_{k-2} + \frac{4}{3}h(2x'_k - x'_{k-1} + 2x'_{k-2}) + \frac{28}{90}h^2 x^{(2)};$$

коррекция:

$$x_{k+1} = \frac{1}{8}[9x_k - x_{k-2} + 3h(x'_{k+1} + 2x'_k - x'_{k-1})] - \frac{1}{40}h^2 x^{(2)}.$$

Для получения требуемой точности формулы протоза и коррекции должны быть одного порядка.

Особенность методов с протозом и коррекцией состоит в том, что они позволяют находить разность между прогнозируемым и скорректированным значениями и устранять ошибку. Многошаговые методы более экономичны в смысле затрат машинного времени, так как используют дифференциалы о ранее вычисленных точках. Однако при любом изменении величины шага h приходится временно вводить шаг к одношаговым методам.

Методы, разработанные в самое последнее время, позволяют

менять порядок точности и др. В качестве корректирующей часто используется некая формула, в которую подставляются данные процесса.

ПРОГРАММНАЯ МОДЕЛЬ СЛЕДЯЩЕЙ САУ

1. Структура следящей САУ

В лабораторной работе исследуется программная модель следящей САУ. Структурная схема исследуемой системы приведена на рис. 2.

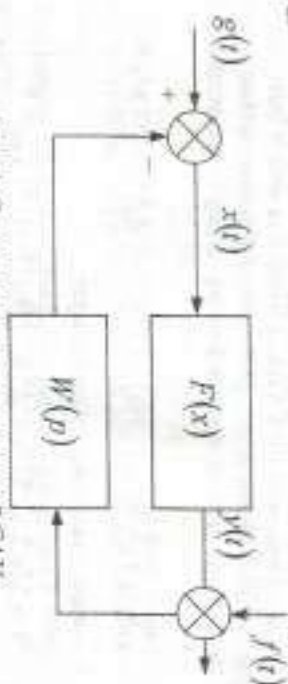


Рис. 2. Структурная схема следящей САУ

Система состоит из нелинейного элемента со статической характеристикой $y(t) = F(x(t))$, фильтра и сумматора. В качестве нелинейного элемента применяется дискриминатор с функцией Хьюбера, при этом используется линейный участок его дискриминирующей характеристики, т.е. $y(t) = \alpha x(t)$, где $\alpha = \text{const}$.

В состав модели входят 3 вида фильтров:

- фильтр первого порядка $W_1(p) = \frac{K}{Tp+1}$;
- фильтр второго порядка $W_2(p) = \frac{K}{T^2 p^2 + 2qTp + 1}$;
- фильтр третьего порядка $W_3(p) = \frac{K_1}{(T_1 p + 1)(T_2 p + 1)p}$

и три типа воздействия – постоянное $g_1(t) = g$, линейно-нарастающее $g_2(t) = at$ и гармоническое $g_3(t) = A_m \sin(\omega t)$, а также помеха $f(t)$ и иные безлобные.

Необходимо для каждого фильтра и типа воздействия $g(t)$, а также помехи $f(t)$ найти сигнал рассогласования $x(t)$, как следствие

влияния воздействия на систему полезного сигнала и помехи. Для этой цели запишем дифференциальные уравнения следящей системы:

$$x(t) = W_{g2}(p)g(t) + W_{g1}(p)f(t).$$

После этого найдем передаточные функции $W_{g2}(p)$ и $W_{g1}(p)$

для каждого фильтра.

- Для фильтра первого порядка:

$$W_{g2}(p) = \frac{1}{1 + \alpha W_1(p)} = \frac{1}{1 + \frac{\alpha K}{Tp+1}} = \frac{Tp+1}{Tp + \alpha K + 1},$$

$$W_{g1}(p) = \frac{-K_1(p)}{1 + \alpha K(p)} = \frac{-\frac{K}{Tp+1}}{1 + \frac{\alpha K}{Tp+1}} = \frac{-K}{Tp + \alpha K + 1}$$

- Для фильтра второго порядка:

$$W_{g2}(p) = \frac{1}{1 + \alpha W_2(p)} = \frac{1}{1 + \frac{\alpha K}{T^2 p^2 + 2qTp + 1}} = \frac{T^2 p^2 + 2qTp + 1}{T^2 p^2 + 2qTp + \alpha K + 1},$$

$$W_{g1}(p) = \frac{-K_1(p)}{1 + \alpha W_2(p)} = \frac{-\frac{K}{T^2 p^2 + 2qTp + 1}}{1 + \frac{\alpha K}{T^2 p^2 + 2qTp + 1}} = \frac{-K}{T^2 p^2 + 2qTp + \alpha K + 1}.$$

- Для фильтра третьего порядка:

$$W_{g2}(p) = \frac{1}{1 + \alpha W_3(p)} = \frac{1}{1 + \frac{\alpha K_1}{(T_1 p + 1)(T_2 p + 1)p}} = \frac{(T_1 p + 1)(T_2 p + 1)p}{(T_1 p + 1)(T_2 p + 1)p + \alpha K_1},$$

$$W_{g1}(p) = \frac{-W_3(p)}{1 + \alpha W_3(p)} = \frac{\frac{-K_1}{(T_1 p + 1)(T_2 p + 1)p}}{1 + \frac{\alpha K_1}{(T_1 p + 1)(T_2 p + 1)p}} = \frac{-K_1}{(T_1 p + 1)(T_2 p + 1)p + \alpha K_1}.$$

Далее запишем дифференциальные уравнения относительно

$x(t)$.

- Для фильтра первого порядка:

$$x(t) = \frac{T_p + 1}{T_p + \alpha K + 1} g(t) - \frac{K}{T_p + \alpha K + 1} f(t) = \frac{1}{T_p + \alpha K + 1} [(T_p + 1)g(t) - Kf(t)],$$

$$(T_p + \alpha K + 1)x(t) = (T_p + 1)g(t) - Kf(t),$$

$$\dot{x}(t) = g'(t) + \frac{1}{T} [g(t) - (\alpha K + 1)x(t) - Kf(t)].$$

- Для фильтра второго порядка:

$$x(t) = \frac{T^2 p^2 + 2qTp + 1}{T^2 p^2 + 2qTp + \alpha K + 1} g(t) - \frac{K}{T^2 p^2 + 2qTp + \alpha K + 1} f(t) =$$

$$= \frac{1}{T^2 p^2 + 2qTp + \alpha K + 1} [(T^2 p^2 + 2qTp + 1)g(t) - Kf(t)],$$

$$(T^2 p^2 + 2qTp + \alpha K + 1)x(t) = (T^2 p^2 + 2qTp + 1)g(t) - Kf(t),$$

$$\dot{x}(t) = g'(t) + \frac{2q}{T} [g(t) - x(t)] + \frac{1}{T^2} [g(t) - (\alpha K + 1)x(t) - Kf(t)].$$

- Для фильтра третьего порядка:

$$x(t) = \frac{(T_1 p + 1)(KT_2 p + 1)p}{(T_1 p + 1)(T_2 p + 1)p + \alpha K_1} g(t) - \frac{K_1}{(T_1 p + 1)(T_2 p + 1)p + \alpha K_1} f(t) =$$

$$= \frac{1}{(T_1 p + 1)(T_2 p + 1)p + \alpha K_1} [(T_1 p + 1)(T_2 p + 1)p g(t) - K_1 f(t)],$$

$$[(T_1 p + 1)(T_2 p + 1)p + \alpha K_1]x(t) = [(T_1 p + 1)(T_2 p + 1)p]g(t) - K_1 f(t),$$

$$\dot{x}(t) = g'(t) + \frac{1}{T_1 T_2} [(T_1 + T_2)g(t) - x(t)] + g(t) - \alpha K_1 x(t) - K_1 f(t).$$

Таким образом, исходными данными для программной модели САУ являются параметры фильтров и воздействия. По заданным параметрам воздействия строится сигнал воздействия $g(t)$. Параметры фильтра используются при решении дифференциальных уравнений, описывающих следящую САУ. Решением системы дифференциальных уравнений является искомым сигнал рассогласования $x(t)$.

2. Пользовательский интерфейс программной модели следящей САУ

При работе с программной моделью следящей САУ используются следующие:

1. Выбрать тип воздействия;
- постоянное;

- линейно нарастающее;
- гармоническое;
- 2. Ввести параметры воздействия:
 - амплитуду постоянного воздействия — g ;
 - скорость нарастания линейно нарастающего воздействия — a ;
 - амплитуду A_0 и частоту ω гармонического колебания;
 - среднеквадратическое отклонение (СКО) помех;
 - начальные условия $x(t_0)$;
- 3. Выбрать тип передаточной функции фильтра:
 - 1-го порядка;
 - 2-го порядка;
 - 3-го порядка;
- 4. Ввести параметры фильтра — $\alpha, q, T, K, K_1, T_1, T_2$;

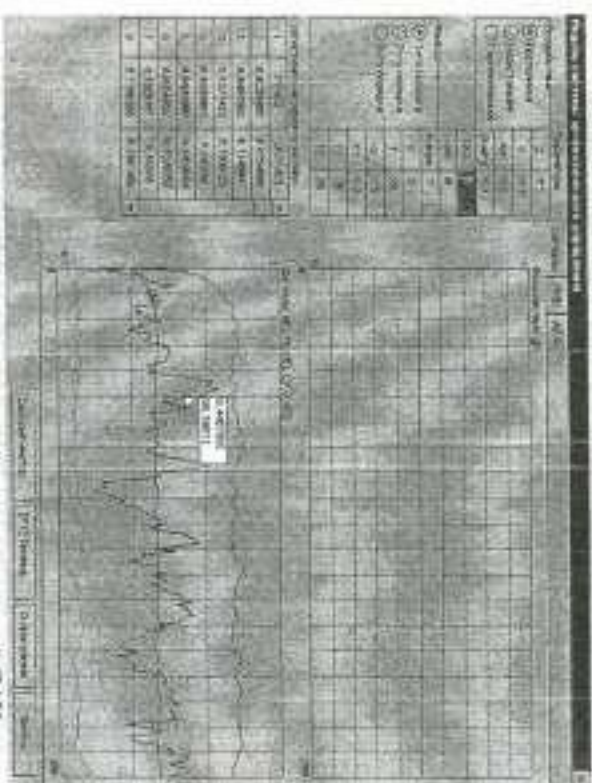


Рис. 3. Главное окно программной модели следящей САУ

После запуска программной модели следящей САУ на экране появляется главное окно — основной элемент интерфейса (рис. 3). Управление осуществляется посредством манипулятора типа "мышь". В окне расположены остальные элементы интерфейса, отвечающие за ввод и вывод данных. Переход между эле-

ментами с помощью клавиатуры осуществляется клавишами "TAB" - перейти к следующему элементу и "SHIFT+TAB" - вернуться на один элемент назад.

Перемещение между элементами таблицы или составными элементами "рабочей зоны" можно осуществлять посредством нажатия стрелок на клавиатуре. Ввод параметров в элементе "таблица" осуществляется посредством нажатия цифровых клавиш и символов "и".

В целом интерфейс интуитивно понятен каждому, кто работал в операционной среде Windows/NT/UNIX/ME/XP, поэтому его освоение не должно привести к возникновению дополнительных трудностей.

Тип воздействия и тип фильтра выбирается с помощью элементов "разновидности", который выбирает одно значение из множества представленных. Остальные параметры вводятся с помощью элементов "таблица". При этом осуществляется контроль соответствия введенных параметров заданному типу данных. При нарушении заданных пределов программа выдает соответствующее предупреждение.

Воздействие и результаты анализа выносятся в виде графиков и цифровой части экрана с помощью элемента "график", который обеспечивает представление графической информации и координатных сеток. Для удобства измерения и считывания координатных значений используется электронный маркер курсора "мышь".

Над элементом "график" располагается ряд шкалок, с помощью которых можно переключаться для просмотра графиков:

- сигналов - воздействия $g(t)$, раскоординатные $x(t)$, и также математического значения и СКО сигнала раскоординатности;
- ФНЧ сигнала раскоординатности в рассматриваемый момент времени;
- АКФ сигнала раскоординатности.

В левой нижней части экрана в виде таблицы приводятся значения математического ожидания и СКО сигнала раскоординатности.

Следует отметить, что после введения исходных данных входное воздействие и результаты решения отображаются мгновенно в графическом масштабе времени.

ПОРЯДОК ВЫПОЛНЕНИЯ ЛАБОРАТОРНОЙ РАБОТЫ

1. Исследовать экспериментально импульсную переходную характеристику системы первого порядка.
 - 1.1. Выбрать режим работы программы, обеспечивающий подачу на систему воздействия в виде $x(t) = \sin t$ при $g(t) = 0$.
 - 1.2. Определить, какие параметры системы влияют на исследуемую функцию, записать вид функции при нескольких зна-

чений входных параметров.

2. Исследовать экспериментально переходный процесс в системе первого порядка как реакцию на скачок $g(t)$ (в программе выдать $g(t) = g$ при нулевых начальных условиях).

- 2.1. Запустить соответствующий режим системы первого порядка, определить параметры, влияющие на качество переходного процесса.

- 2.2. Записать переходный процесс при различных значениях параметров системы.

- 2.3. Снять зависимость времени регулирования t_p от постоянной времени фильтра T при фиксированных остальных параметрах. Время регулирования определить как минимальное время, по истечении которого сигнал раскоординатности будет оставаться близким к установившемуся значению с заданной точностью.

3. Исследовать экспериментально импульсную переходную характеристику системы второго порядка.

- 3.1. Определить параметры, влияющие на вид функции.

- 3.2. Изменить соответствующий параметр, настроить фильтр системы на режим аperiodического звена второго порядка, нарисовать вид функции.

- 3.3. Настроить фильтр системы на режим колебательного звена, записать вид функции.

4. Исследовать экспериментально переходный процесс в системе второго порядка при воздействии скачка $g(t)$.

- 4.1. В режиме фильтра как аperiodического звена второго порядка снять зависимость времени регулирования от параметров системы, влияющих на эту характеристику.

- 4.2. В режиме фильтра как колебательного звена второго порядка снять зависимость от параметров системы параметров качества переходного процесса: t_p , σ , n , χ .

КОНТРОЛЬНЫЕ ВОПРОСЫ

1. Что в общем случае является математической моделью системы автоматического управления?
2. Как определяется передаточная функция САУ в операторной форме?
3. Что представляет собой передаточная функция САУ в форме изображений Лапласа?
4. Как определяется импульсная характеристика САУ?

5. Раскройте смысл переходной характеристики САУ.
6. Что относится к прямым оценкам качества переходного процесса?
7. Раскройте смысл основных прямых оценок качества переходного процесса.
8. Как связаны между собой импульсная и переходная характеристики САУ?
9. Как используются численные методы решения дифференциальных уравнений в задачах анализа САУ?
10. В чем заключается различие между явными и неявными численными методами решения дифференциальных уравнений?
11. Поясните принципы работы методов Эйлера.
12. Опишите принципы работы методов Рунге-Кутты.
13. Объясните принципы работы многоступенчатых методов. В чем их достоинства и недостатки?
14. Раскройте сущность методов с прогнозом и коррекцией. Объясните преимущества этих методов по сравнению с одношаговыми методами.

БИБЛИОГРАФИЧЕСКИЙ СПИСОК

1. Митрошкин И.В. Теория автоматического управления. Линейные системы: учеб. пособие для вузов. - СПб.: Питер, 2005.
2. Пеллегр Д.Д. Теория систем управления. - М.: Московский государственный горный университет, 2002.
3. Методы классической и современной теории автоматического управления. В 3-х томах / под ред. Н.Д. Егузова. - М.: МГТУ им. Н.Э. Баумана, 2000.
4. Теория автоматического управления, в 2-х ч. / под ред. Воронкова А.А. М.: Высшая школа, 1986.
5. Теория автоматического управления / под ред. Соломенцева Ю.М. М.: Машиностроение, 1992.
6. Александров А.Г. и др. Справочник по теории автоматического управления. М.: Наука, 1982.
7. Ксенянин И.П., Тарасик В.П. Теория и проектирование автоматических систем. М.: Машиностроение, 1996.
8. Периашев С.В., Валчев А.А., Чиликин В.М. Статистическая динамика радиотехнических следящих систем. М.: Сов. радио, 1973.
9. Айвазян С.А., Енюков И.С., Мешалкин Л.Д. Прикладная статистика: Основы моделирования и первичная обработка данных. - М.: Финансы и статистика, 1983.