

МИНИСТЕРСТВО НАУКИ И ВЫСШЕГО ОБРАЗОВАНИЯ
РОССИЙСКОЙ ФЕДЕРАЦИИ
ВОЛЖСКИЙ ПОЛИТЕХНИЧЕСКИЙ ИНСТИТУТ (ФИЛИАЛ)
ФЕДЕРАЛЬНОГО ГОСУДАРСТВЕННОГО БЮДЖЕТНОГО
ОБРАЗОВАТЕЛЬНОГО УЧРЕЖДЕНИЯ ВЫСШЕГО ОБРАЗОВАНИЯ
«ВОЛГОГРАДСКИЙ ГОСУДАРСТВЕННЫЙ ТЕХНИЧЕСКИЙ
УНИВЕРСИТЕТ»

Л.И. Медведева

**МАТЕМАТИЧЕСКИЕ ОСНОВЫ ТЕОРИИ
УПРАВЛЕНИЯ.
ЛАБОРАТОРНЫЙ ПРАКТИКУМ**

Электронное учебное пособие



Волжский

2022

УДК 51(07)
ББК 22.1я73
М 42

Рецензенты:

канд. тех. наук, доцент кафедры «Энергетика» филиала ФГБОУ ВО НИУ
«МЭИ» в г. Волжском

Курьянов В.Н.;

канд. тех. наук, начальник Волжского филиала ФБУ «Волгоградский ЦСМ»
Бельчанская Е.Н.

Издается по решению редакционно-издательского совета
Волгоградского государственного технического университета

Медведева, Л.И.

Математические основы теории управления. Лабораторный практикум [Электронный ресурс] : учебное пособие / Л.И. Медведева; Министерство науки и высшего образования Российской Федерации, ВПИ (филиал) ФГБОУ ВО ВолгГТУ. – Электрон.текстовые дан. (1 файл: 1,9 МБ). – Волжский, 2022. – Режим доступа: <http://lib.volpi.ru>. – Загл. с титул.экрана.

ISBN 978-5-9948-4418-2

Учебное пособие содержит теоретический и практический материал, необходимый для выполнения и защиты лабораторных работ по дисциплине «Математические основы теории управления».

Предназначено для студентов, обучающихся по направлению магистратуры 15.04.04. «Автоматизация технологических процессов и производств» всех форм обучения.

Ил. 73, табл.23, библиограф.: 8 назв.

ISBN 978-5-9948-4418-2

© Волгоградский государственный
технический университет, 2022

© Волжский политехнический
институт, 2022

СОДЕРЖАНИЕ

Модуль 1. Методические указания по выполнению лабораторных работ	4
Лабораторная работа «Определение передаточной функции объекта управления методом активного эксперимента»	5
Лабораторная работа «Исследование качества переходных процессов замкнутой системы регулирования с обратной связью»	16
Лабораторная работа «Исследование динамических характеристик систем автоматического управления с управляющими устройствами различной структуры»	34
Лабораторная работа «Исследование эффективности каскадных систем автоматического регулирования»	44
Лабораторная работа «Исследование качества переходных процессов систем автоматического управления с компенсацией возмущения и отклонения»	54
Модуль 2. Программные продукты для выполнения лабораторных работ	63
Пакет программ VisSim	64
Программа SimInTech	73
Список литературы	87

МОДУЛЬ 1

Методические указания по выполнению лабораторных работ

Лабораторная работа: «Определение передаточной функции объекта управления методом активного эксперимента»

Цель работы: Изучение особенностей методов активного эксперимента для расчета математического описания элементов системы автоматического управления.

Задачи:

1. Рассчитать передаточную функцию объекта управления согласно предложенной методике с использованием графика переходного процесса, выданного преподавателем.
2. Реализовать в программном средстве структурную схему разомкнутой системы, используя в качестве объекта управления рассчитанную в п. 1 передаточную функцию.
3. Исследовать полученный в блоке визуализации переходный процесс и заполнить данными его изменения таблицу 1.4.
4. Исследовать исходный переходный процесс и заполнить данными его изменения таблицу 1.5.
5. Рассчитать относительную погрешность δ в процентах.
6. Сделать выводы по результатам работы.
7. Оформить протокол лабораторной работы.
8. Отчитать лабораторную работу.

Теоретический материал. Для определения оптимальных параметров настройки регуляторов необходимы сведения о статических и динамических характеристиках объектов регулирования и действующих в САР возмущений. Эти характеристики могут быть получены либо аналитически, либо экспериментально. Ввиду недостаточной изученности объектов регулирования и необходимости принимать при их математическом описании ряд упрощающих предположений наиболее достоверными следует признать статические и динамические характеристики объектов регулирования, полученные экспериментально. Статические характеристики действующих в САР возмущений могут быть получены только в результате эксперимента.

Выбор метода экспериментального исследования действующего регулируемого объекта определяется характером поставленной задачи, допустимыми по технологическим требованиям отклонениями исследуемых величин, характером эксплуатационных возмущений. При этом получение искомых характеристик возможно путем активного и пассивного эксперимента.

Метод пассивного эксперимента основан на регистрации контролируемых параметров процесса в режиме нормальной работы объекта без внесения в него каких-либо преднамеренных возмущений. Метод активного эксперимента основан на использовании определенных

- постоянной времени T_0 ;
- полным запаздыванием τ_0 , которое складывается из чистого запаздывания τ_q и переходного запаздывания τ_n , т. е. $\tau_0 = \tau_q + \tau_n$.

Параметры T_0 и τ_0 определяют проведением касательной AB к наиболее крутому участку переходной характеристики $h_0(t)$.

При расчете настроечных параметров АСУ с объектами, имеющими *s-образные* переходные характеристики, ориентируются либо непосредственно на параметры k_0 , T_0 , τ_0 , τ_q и τ_n , которые обобщенно характеризуют статику и динамику реального объекта, либо используют *упрощенные модели* объекта, коэффициенты которых однозначно выражаются через указанные экспериментальные параметры.

Достаточно хорошее приближение к *s-образным* переходным характеристикам дает модель второго порядка с запаздыванием и **одинаковыми постоянными времени**:

$$W_0(p) = k_0 \exp(-p\tau'_0) \frac{1}{(T'_0 p + 1)^2},$$

где $T'_0 = 0,368T_0$; $\tau'_0 = \tau_0 - 0,107T_0$.

где $T'_0 = 0,64T_0$; $\tau'_0 = \tau_0 - 0,11T_0$.

Существуют и более сложные модели, например, модель второго порядка с запаздыванием и **разными постоянными времени**:

$$W_0(p) = k_0 \exp(-p\tau_q) \frac{1}{(T_{01}p + 1)(T_{02}p + 1)}.$$

Здесь параметры T_{01} и T_{02} определяются не через параметры T_0 и τ_0 , а по некоторым координатам характерных точек переходной характеристики.

В большинстве случаев модель обеспечивает достаточную для практических расчетов точность, если принять $T_{01} = 0,5T_{02}$. При этом постоянную времени T_{02} определяют следующим образом: по ординате $h(t_2) = 0,63 k_0$ экспериментальной переходной характеристики находят момент времени t_2 , отсчитываемый от точки D , а затем вычисляют $T_{02} = 0,64 t_2$. [1]

Методика расчёта передаточной функции объекта управления **методом активного эксперимента** заключается в следующем [2]. Непосредственно по графику переходного процесса (рис. 1.1.2) определяется численное значение коэффициента усиления k по формуле:

$$k = \frac{\Delta y(\infty)}{\Delta x} = \frac{15,2}{9} = 1,69,$$

где Δx – величина входного возмущающего воздействия.

На графике переходного процесса находится точка перегиба E , которая отмечает место перехода вогнутой части графика в выпуклую. К точке перегиба строится касательная и отсекает на оси абсцисс отрезки времени T_{ab} и T_{bd} : $T_{ab} : T_{bd} = 3,1$; $T_{bd} = 12,9$.

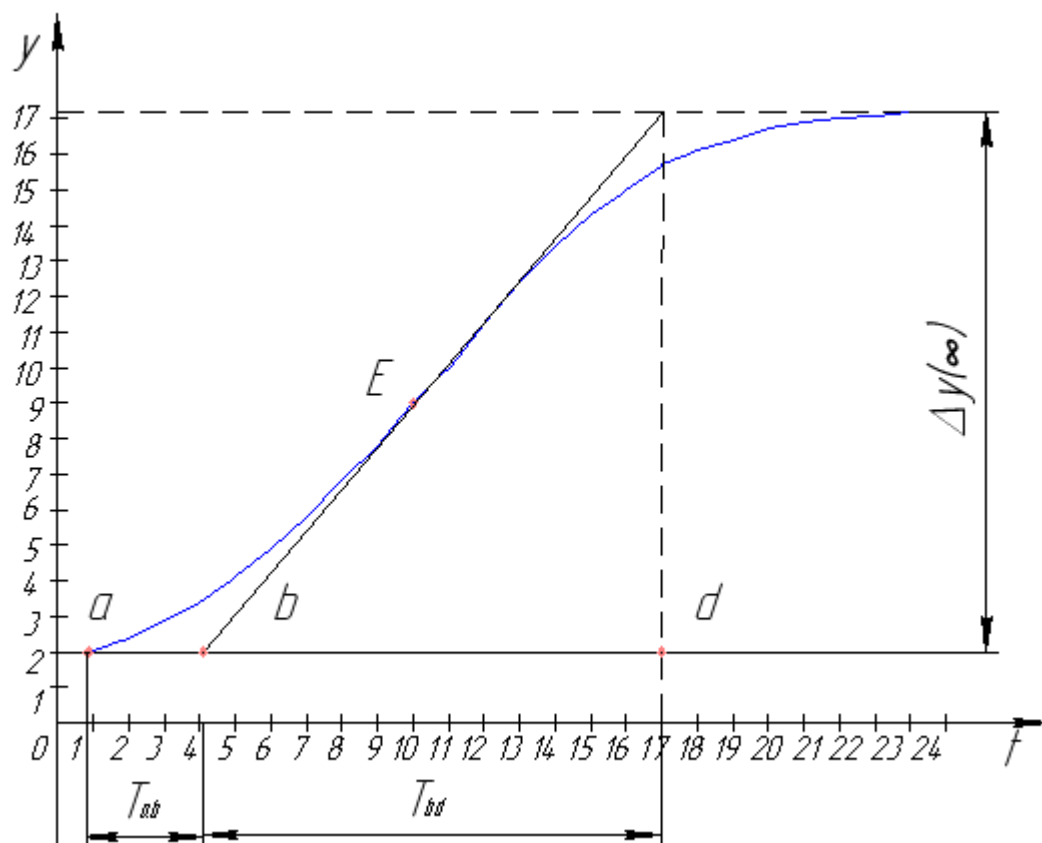


Рис. 1.1.2. Определение коэффициентов передаточной функции объекта по графику переходного процесса

По отношению $\frac{T_{ab}}{T_{bd}} = 0.24$ из таблицы 1 определяется порядок объекта управления n и значения вспомогательных коэффициентов k_1 и k_2 .

Таблица 1.1

$\frac{T_{ab}}{T_{bd}}$	n	k_1	k_2
0	1	1	0
0,104	2	2,718	0,282
0,218	3	3,695	0,805
0,319	4	4,463	1,425
0,41	5	5,119	2,1

$$n = 3$$

$$k_1 = 3.695$$

$$k_2 = 0.805$$

Передаточная функция объекта определяется выражением:

$$W(p) = \frac{k}{(Tp + 1)^n} e^{-p\tau},$$

где $T = \frac{T_{bd}}{k_1} = \frac{12.9}{3.695} = 3.491$ – постоянная времени, [с];

$\tau_y = T \cdot k_2 = 3.491 \cdot 0.805 = 2.81$ – условное время запаздывания, [с];

$\tau = T_{ab} - \tau_y = 3.1 - 2.81 = 0.29$ – абсолютное время запаздывания, [с].

Таким образом, передаточная функция объекта управления согласно расчётам имеет вид:

$$W(p) = \frac{1.69}{(3.49 \cdot p + 1)^3} \cdot e^{-p \cdot 0.29} = \frac{1.69}{42.53p^3 + 36.56p^2 + 10.47p + 1} \cdot e^{-p \cdot 0.29}.$$

«Метод площадей» (метод Симою М.П.) основан на предположении, что исследуемый объект может быть описан линейным дифференциальным уравнением с постоянными коэффициентами.

$$\begin{aligned} a_n \frac{d^n \sigma}{dt^n} + a_{n-1} \frac{d^{n-1} \sigma}{dt^{n-1}} + \dots + a_1 \frac{d\sigma}{dt} + \sigma &= b_m \frac{d^m \lambda}{dt^m} + b_{m-1} \frac{d^{m-1} \lambda}{dt^{m-1}} + \dots + b_1 \frac{d\lambda}{dt} + \lambda \\ a_n \frac{d^n \sigma}{dt^n} + a_{n-1} \frac{d^{n-1} \sigma}{dt^{n-1}} + \dots + a_1 \frac{d\sigma}{dt} + \sigma &= b_m \frac{d^m \lambda}{dt^m} + b_{m-1} \frac{d^{m-1} \lambda}{dt^{m-1}} + \dots + b_1 \frac{d\lambda}{dt} + \lambda \end{aligned}$$

где σ – приведенное к единице отклонение регулируемой величины в безразмерном виде;

λ – приведенное к единице возмущающее воздействие в безразмерном виде.

Передаточная функция объекта описываемого этим уравнением может быть представлена в следующем виде:

$$W(p) [-] = \frac{b_m p^m + \dots b_1 p + 1}{a_n p^n + \dots a_1 p + 1}.$$

Та же передаточная функция в размерном виде:

$$W(p) \left[\frac{x_{\text{вых}}^*}{x_{\text{вх}}^*} \right] = W(p) [-] \frac{\Delta x_{\text{вых}}(\infty) [x_{\text{вых}}^*]}{\Delta x_{\text{вх}}(\infty) [x_{\text{вх}}^*]},$$

где $x_{\text{вых}}^*, x_{\text{вх}}^*$ – размерность величины.

Практика расчетов показывает, что степень полинома знаменателя не следует брать более трех. Степень полинома числителя следует выбирать на единицу меньше степени полинома знаменателя.

Если регулируемая величина в начальный момент равна нулю, а первая производная в начальный момент не равна нулю, при этом передаточная функция может иметь вид:

$$W(p) = \frac{b_2 p^2 + b_1 p + 1}{a_3 p^3 + a_2 p^2 + a_1 p + 1}.$$

Если же и регулируемая величина в начальный момент равна нулю и первая производная тоже равна нулю, то порядок полинома числителя следует брать на две единицы меньше порядка полинома знаменателя:

$$W(p) = \frac{b_1 p + 1}{a_3 p^3 + a_2 p^2 + a_1 p + 1}$$

Практически в этом случае передаточную функцию можно выбирать более простого вида:

$$W(p) = \frac{1}{a_3 p^3 + a_2 p^2 + a_1 p + 1}$$

Задача состоит в том, чтобы определить неизвестные коэффициенты полиномов числителя и знаменателя из следующей системы уравнений:

$$\begin{cases} a_1 = F_1 + b_1 \\ a_2 = F_2 + b_2 + b_1 F_1 \\ a_3 = F_3 + b_3 + b_2 F_2 + b_1 F_1 \end{cases}$$

Величины F_1 , F_2 , F_3 связаны с кривой разгона интегральными соотношениями:

$$\begin{aligned} F_1 &= \int_0^{\infty} (1 - \sigma) dt \\ F_2 &= F_1^2 \int_0^{\infty} (1 - \sigma)(1 - \theta) d\theta \\ F_3 &= F_1^3 \int_0^{\infty} (1 - \sigma)(1 - 2\theta + \frac{\theta^2}{2}) d\theta \end{aligned}$$

где $\theta = \frac{t}{F_1}$ – относительное время.

В реальных условиях невозможно вычислить эти интегралы, поэтому их значения определяются приближенно по формуле:

$$\begin{aligned} F_1 &\approx \Delta t \left\{ \sum_{i=0}^n [1 - \sigma(t)] - 0,5[1 - \sigma(0)] \right\} \\ F_2 &= F_1^2 \Delta \theta \left\{ \sum_{i=0}^n [1 - \sigma(t)] \cdot [1 - \theta] - 0,5[1 - \sigma(0)] \right\} \\ F_3 &= F_1^3 \Delta \theta \left\{ \sum_{i=0}^n [1 - \sigma(t)] \cdot \left[1 - 2\theta + \frac{\theta^2}{2} \right] - 0,5[1 - \sigma(0)] \right\} \end{aligned}$$

При расчетах возможны случаи, когда одна из величин F станет отрицательной, например, $F_3 < 0$.

Это будет означать, что коэффициент a_3 отрицательный и, значит, система регулирования неустойчива, что противоречит действительности, т.к. при снятии кривой разгона объект работал устойчиво. В этом случае нужно уменьшить не единицу степень полинома знаменателя, а степень полинома числителя увеличить на единицу. Многие промышленные технологические объекты имеют одну из следующих особенностей, влияющих на форму кривой разгона:

- объект характеризуется отсутствием транспортного запаздывания и наличием самовыравниванием;
- объект характеризуется отсутствием транспортного запаздывания и самовыравнивания;
- объект характеризуется наличием транспортного запаздывания и отсутствием или наличием самовыравнивания [3].

Найдем передаточную функцию объекта. Например, пусть регулируемая величина уровень в емкости $H1_{\text{вх}}$ (в метрах) в результате приложенного к объекту возмущения в виде изменения расхода жидкости на входе $\Delta Q2_{\text{вх}}$ (в м³/ч) при t стремящемся к ∞ , стремится к конечному значению $\Delta H1_{\text{вх}}(\infty)$ отличному от нуля (рис. 1.1.3, 1.1.4).

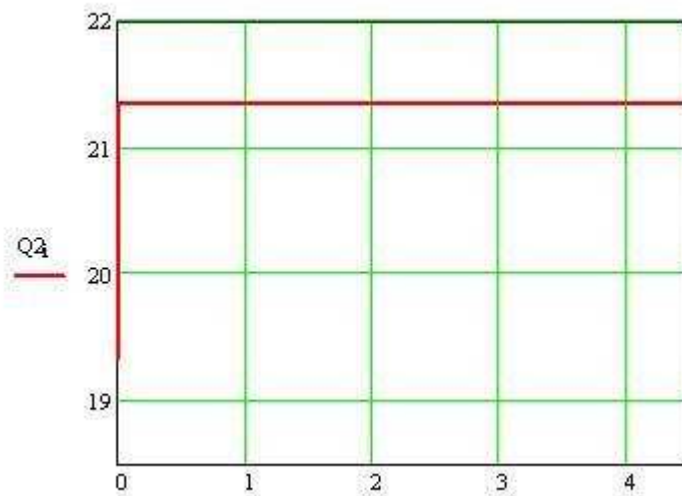


Рис.1.1.3. График изменения во времени расхода жидкости ($\Delta Q2_{\text{вх}}$)

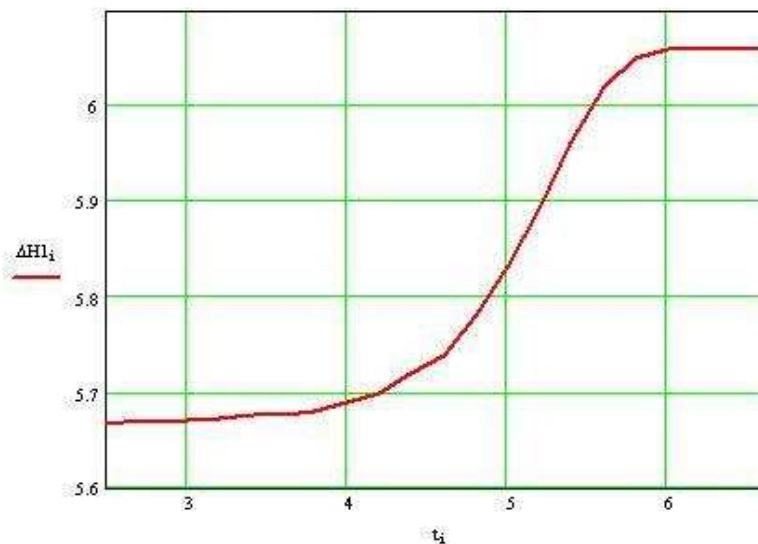


Рис.1.1.4. Графики изменения во времени уровня жидкости ($\Delta H1_{\text{вых}}$)

Последовательность расчета следующая:

1. Разбиваем ось времени на отрезки с интервалом $\Delta t = 0.2$, исходя из условия того, что на протяжении всего графика выходная функция в пределах $2\Delta t$ мало отличается от прямой.

2. Заполним таблицу 1.2. Для этого находим значения $\Delta X_{\text{вых}}$ (в данном случае изменение уровня) в конце каждого интервала Δt .

$$\sigma = \frac{\Delta X_{\text{вых}}}{\Delta X_{\text{вых}}(\infty)},$$

где $\Delta X_{\text{вых}}(\infty) = 0.41$.

Таблица 1.2

t	$\Delta X_{\text{вых}}$	$\sigma(t)$	$1-\sigma(t)$	$\theta = \frac{t}{F_1}$
0	...	...	...	...
0.2	...	...	...	...
...	...	...	...	...
...	...	...	...	...
3	0.41	1	.	0.55
			$\Sigma=10.18$	

Таким образом, функция приведена к безразмерному виду.

Тип передаточной функции можно определить, построив график зависимости $F(t) = \sigma(t)$ (рис. 1.1.5).

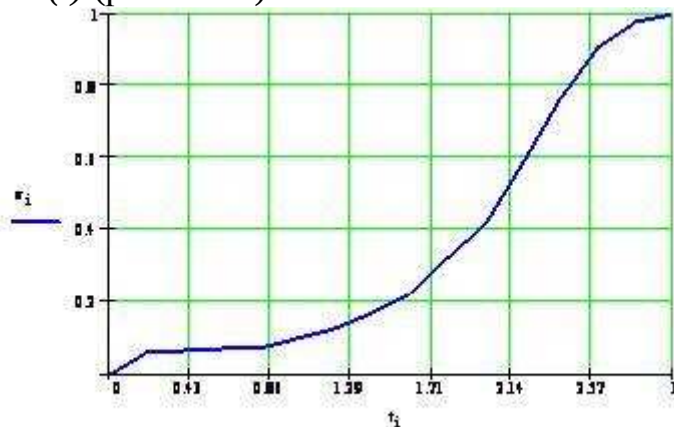


Рис.1.1.5. Переходный процесс функции, приведенной к безразмерному виду

По виду графика определим тип передаточной функции в безразмерном виде:

$$W(p) = \frac{1}{a_3 p^3 + a_2 p^2 + a_1 p + 1}.$$

Задача состоит в том, чтобы определить неизвестные коэффициенты полиномов знаменателя. Определим площади F_1 , F_2 , F_3 для нахождения неизвестных коэффициентов.

$$F_1 \approx \Delta t \left\{ \sum_{i=0}^n [1 - \sigma(t)]_i - 0.5[1 - \sigma(0)] \right\} = 0.2 \cdot (10.18 - 0.5) = 1.94$$

3. Перестраиваем функцию $(1 - \sigma)$ в другом масштабе времени (за независимую переменную примем переменную Θ) (рис. 1.1.6).

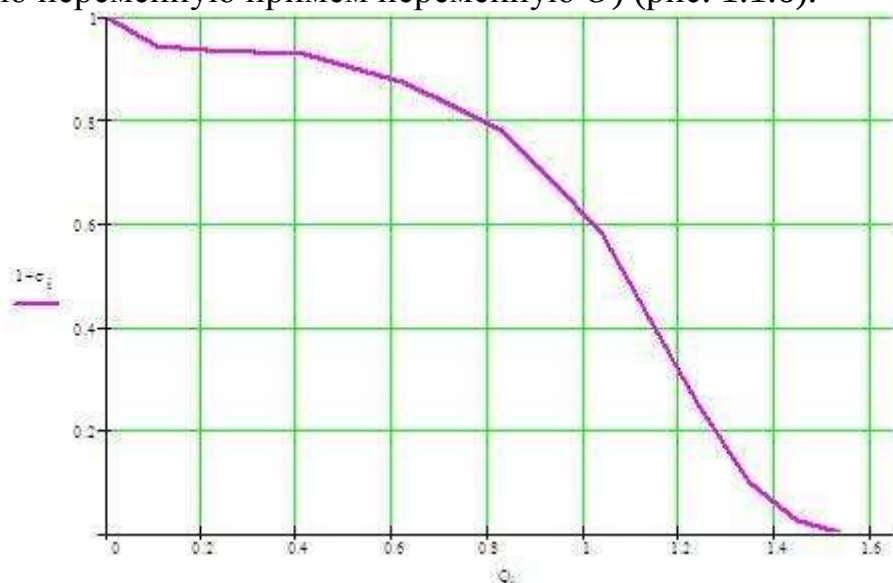


Рис.1.1.6. Переходный процесс функции в масштабе времени Θ

Заполняем таблицу 1.3 и находим коэффициент F_2, F_3 .

Таблица 1.3

Θ	$1 - \sigma$	$1 - \Theta$	$(1 - \sigma)(1 - \theta)$	$1 - 2\theta + \frac{\theta^2}{2}$	$(1 - \sigma)\left(1 - 2\theta + \frac{\theta^2}{2}\right)$
0	...	...	...	...	...
0.1	...	...	...	...	...
...	...	...	...	...	...
...	...	...	...	...	...
1.6	0	-0.6	0	-0.92	0
			$\Sigma=4.917$		$\Sigma=1.498$

$$F_2 = F_1^2 \Delta \theta \left\{ \sum_{i=0}^n [1 - \sigma(t)] \cdot [1 - \theta]_i - 0,5[1 - \sigma(0)] \right\} = (1,94)^2 \cdot 0,1 \cdot (4,917 - 0,5) = 1,66$$

$$F_3 = F_1^3 \Delta \theta \left\{ \sum_{i=0}^n [1 - \sigma(t)] \cdot \left[1 - 2\theta + \frac{\theta^2}{2}\right]_i - 0,5[1 - \sigma(0)] \right\} = (1,94)^3 \cdot 0,1 \cdot (1,498 - 0,5) = 0,73$$

4. Записываем окончательное выражение исследуемого объекта в размерном виде

$$W(p) = \frac{1}{a_3 p^3 + a_2 p^2 + a_1 p + 1} = \frac{1}{0,73 p^3 + 1,66 p^2 + 1,94 p + 1}$$

где $a_1 = F_1$; $a_2 = F_2$; $a_3 = F_3$.

$$W(p) [-] \frac{\Delta x_{\text{вых}}(x) [x_{\text{вых}}^*]}{\Delta x_{\text{вх}}(x) [x_{\text{вх}}^*]} = \frac{1}{0,73 p^3 + 1,66 p^2 + 1,94 p + 1} \cdot \frac{0,41}{2,01} = \frac{0,2}{0,73 p^3 + 1,66 p^2 + 1,94 p + 1} \left[\frac{M}{M^3 / \text{ч}} \right]$$

Выполнение лабораторной работы. Передаточная функция объекта управления, рассчитанная одним из методов активного эксперимента (согласно варианту) реализуется в программном средстве. Структурная схема разомкнутой системы регулирования изображена на рисунке 1.1.7.

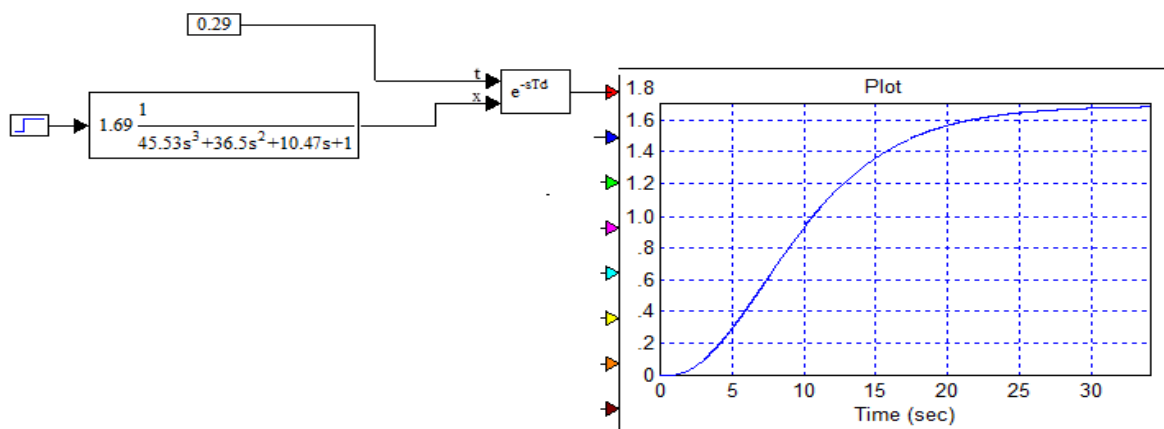


Рис.1.1.7. Программная реализация рассчитанной передаточной функции

Используя возможности программного средства, снимаются координаты полученного переходного процесса и заносятся в таблицу 1.4.

Таблица 1.4

t	0								t _{кон}
y _{рас} (t)	0								y _{max}
σ	0								1

Численное значение величины σ, которая характеризует переходный процесс приведенный к единичному состоянию, рассчитывается по формуле:

$$\sigma = \frac{y(t)}{y_{\max}}.$$

Аналогично снимаются координаты исходного графика переходного процесса, и заполняется таблица 1.5.

Таблица 1.5

t	0								t _{кон}
y _{исх} (t)	0								y _{max}
σ	0								1

По данным таблиц 1.4 и 1.5 рассчитывается величина относительной погрешности:

$$\delta = \left| \frac{S_1 - S_2}{S_1} \right| \cdot 100\%,$$

где: S_1 – площадь под исходным графиком переходного процесса ($S_1 = \sum \sigma_{исх}$);
 S_2 – площадь под расчетным графиком переходного процесса ($S_2 = \sum \sigma_{рас}$).

На основании проведенных исследований, делается вывод о результатах проведения лабораторной работы:

- если величина δ не превышает 10 %, то рассчитанная передаточная функция адекватна исходному объекту управления;
- если величина δ больше 10 %, то рассчитанная передаточная функция не адекватна исходному объекту управления.

Протокол лабораторной работы должен содержать:

- название лабораторной работы;
- цель лабораторной работы;
- исходный график переходного процесса, выданный преподавателем;
- последовательность расчетов передаточной функции объекта одним из методов (согласно варианту);
- заполненную таблицу 1.4;
- заполненную таблицу 1.5;
- расчет относительной погрешности;
- вывод.

Контрольные вопросы

1. Какие методы исследования математического описания элементов систем автоматического управления Вам известны?
2. Назовите характерные особенности методов пассивного эксперимента, какое другое название таких методов Вы знаете.
3. В чем заключаются методы активного эксперимента, назовите условия для их проведения.
4. Какой вид должна иметь переходная характеристика объекта для использования в расчетах по методу площадей?
5. Покажите на примере как определяются отрезки $T_{аб}$ и $T_{бд}$.
6. Из каких составляющих элементов состоит время запаздывания?
7. В чем заключается различие коэффициентов передаточной функции для расчета с одинаковыми постоянными времени и с для расчета с разными постоянными времени?
8. Из каких блоков состоит разомкнутая система автоматического управления, реализованная в программном средстве VisSim?
9. На основании чего делается вывод об адекватности рассчитанной передаточной функции исходному объекту?
10. С помощью какой формулы исходная функция приводится к безразмерному виду?

Лабораторная работа: «Исследование качества переходных процессов замкнутой системы регулирования с обратной связью»

Цель работы: Изучение поведения замкнутой системы автоматического регулирования с обратной связью при изменении параметров управляющего устройства.

Задачи:

1. Реализовать в программном средстве структурную схему системы автоматического управления с обратной связью, задавая параметры блока объекта управления согласно варианту.
2. Изменяя численное значение коэффициента пропорциональности привести систему к критическому режиму работы, признаком которого является автоколебательный вид переходного процесса.
3. Изменяя численное значение коэффициента пропорциональности привести систему управления к заданному показателю качества – заданной степени затухания – с численным значением 0,85.
4. Заполнить таблицу экспериментальных данных и построить по данным таблицы график.
5. Сделать выводы по результатам работы.
6. Оформить протокол лабораторной работы.
7. Отчитать лабораторную работу.

Теоретический материал. Одной из важнейших характеристик АСУ является ее устойчивость.

Устойчивость АСУ – свойство системы возвращаться в состояние равновесия после прекращения изменения воздействия, выведшего систему из этого состояния.

Неустойчивая АСУ не возвращается в состояние равновесия, а непрерывно удаляется от него.

От устойчивости АСУ зависит ее работоспособность. Система, не обладающая устойчивостью, вообще не способна выполнять функции управления и имеет нулевую или даже отрицательную эффективность. Неустойчивая система может привести управляемый объект в аварийное состояние. Поэтому проблема устойчивости систем является одной из *центральных* в теории автоматического управления.

Проявлением, по которому можно судить об устойчивости или неустойчивости системы, является характер изменения ее сигналов во времени, например, управляемой величины $x(t)$. Если управляемая величина $x(t)$ после прекращения изменения, например, задающего воздействия $x_z(t)$ становится с течением времени постоянной (рис. 1.2.1, а), то система ведет себя *устойчиво*. Если же управляемая величина $x(t)$ – возрастает, то система ведет себя *неустойчиво*.

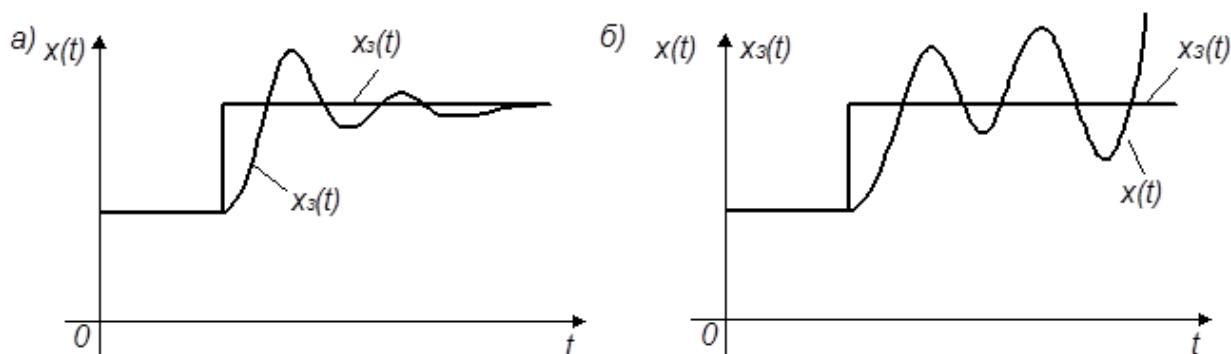


Рис.1.2.1. Графики изменения сигналов АСУ во времени
 а – устойчивая АСУ; б – неустойчивая АСУ

Неустойчивость АСУ возникает, как правило, из-за неправильного (*положительного*) или очень *сильного* действия главной обратной связи. В результате чего в систему в режиме гармонических колебаний непрерывно поступает (закачивается) энергия. Энергия системы увеличивается. Увеличиваются и связанные с ней режимные параметры, например, регулируемая величина. Такое явление в технике получило название *резонанса*.

Причинами неправильного действия главной обратной связи АСУ являются:

- выполнение главной обратной связи АСУ по ошибке положительной вместо отрицательной, что практически при любых параметрах делает систему неустойчивой;
- значительная *инерционность* элементов замкнутого контура АСУ (например, объекта управления), из-за которой в режиме колебаний системы сигнал главной обратной связи (например, управляемая величина) значительно отстает от входного сигнала (например, управляющего воздействия) и оказывается с ним в фазе. Это означает, что связь, выполненная конструктивно как отрицательная, в динамическом режиме (режиме гармонических колебаний) начинает на определенной частоте действовать как положительная. Это ведет к раскачиванию системы и нарушению ее устойчивости.

Задачами анализа устойчивости АСУ обычно являются:

- определение устойчивости или неустойчивости системы при заданных параметрах;
- определение допустимого по условиям устойчивости диапазона изменения некоторых незадаваемых параметров системы;
- выяснение принципиальной возможности устойчивости системы при заданной ее структуре.

Согласно данному выше физическому определению устойчивость определяется характером движения системы, когда воздействия, выведшие ее из состояния равновесия, прекратили действовать или изменяться во времени. Такое движение системы называют *свободным*. Оно происходит за

счет внутренней энергии самой системы и зависит только от ее свойств (параметров).

Свободное движение линейной или линеаризованной АСУ описывается однородным дифференциальным уравнением

$$a_0 \frac{d^n x(t)}{dt^n} + a_1 \frac{d^{n-1} x(t)}{dt^{n-1}} + \dots + a_n x(t) = 0, \quad (2.1)$$

где $x(t)$ – свободная составляющая выходной (управляемой) величины системы.

Вынужденная составляющая выходной величины, зависящая от вида внешнего воздействия на устойчивость системы не влияет.

С математической точки зрения:

- система устойчива, если свободная составляющая $x(t)$ переходного процесса с течением времени стремится к нулю;
- система неустойчива, если свободная составляющая $x(t)$ переходного процесса с течением времени неограниченно возрастает;
- система находится на границе устойчивости, если свободная составляющая $x(t)$ переходного процесса с течением времени не стремится ни к нулю, ни к бесконечности.

Решение уравнения (2.1) равно сумме:

$$x(t) = \sum_{k=1}^n C_k \exp(p_k t), \quad (2.2)$$

где C_k – постоянные, зависящие от начальных условий;

p_k – корни характеристического уравнения:

$$a_0 p^n + a_1 p^{n-1} + \dots + a_n = 0. \quad (2.3)$$

Корни характеристического уравнения могут быть действительными ($p_k = \alpha_k$), мнимыми ($p_k = j\beta_k$) и комплексными ($p_k = \alpha_k \pm j\beta_k$). При этом комплексные корни всегда попарно сопряжены между собой: если есть корень с положительной мнимой частью, то обязательно существует корень с такой же по модулю, но отрицательной мнимой частью.

Переходная составляющая (2.2) при времени $t \rightarrow \infty$ стремится к нулю лишь в том случае, если каждое слагаемое вида $C_k \exp(p_k t) \rightarrow 0$. Характер этой функции времени зависит от вида корня p_k . На рисунке 1.2.2. изображены возможные случаи расположения корней p_k на комплексной плоскости и соответствующие им функции $x_k(t)$, которые показаны внутри окружностей.

Анализ рисунка 1.2.2. позволяет сформулировать *общее математическое условие устойчивости*: для устойчивости линейной АСУ необходимо и достаточно, чтобы действительные части всех корней характеристического уравнения системы были отрицательными (или чтобы все корни характеристического уравнения системы располагались в левой части комплексной плоскости).

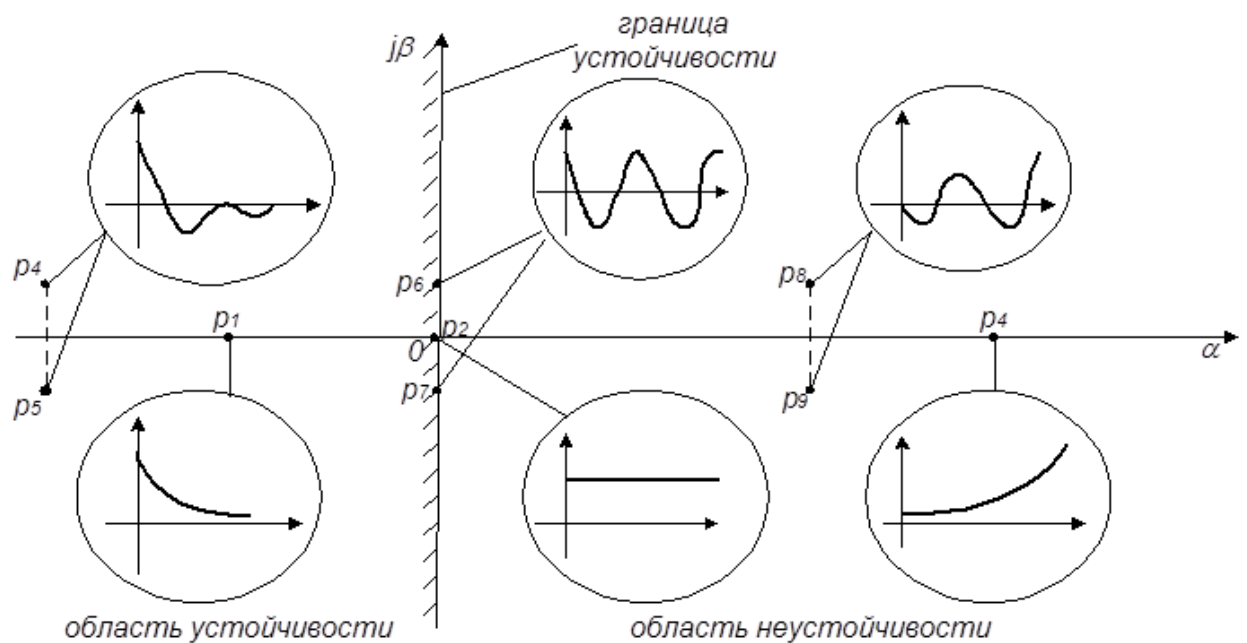


Рис.1.2.2. Влияние корней характеристического уравнения АСУ на составляющие ее свободного движения

Устойчивость системы зависит только от вида корней характеристического уравнения и не зависит от характера внешних воздействий на систему, т.е. устойчивость есть внутреннее свойство системы, присущее ей вне зависимости от внешних условий.

Если хотя бы один корень имеет положительную действительную часть (располагается в правой части комплексной плоскости), то система будет неустойчивой.

Мнимая ось $j\beta$ является границей устойчивости в плоскости корней. Если характеристическое уравнение имеет пару чисто мнимых корней ($p_k = +j\beta_k$, $p_{k+1} = -j\beta_k$), а все остальные корни находятся в левой части комплексной плоскости, то в системе устанавливаются незатухающие гармонические колебания с круговой частотой $\omega = |\beta_k|$. В этом случае говорят, что система находится на *колебательной границе устойчивости*.

Если характеристическое уравнение имеет нулевой корень ($\beta = 0$), то система находится на *апериодической границе устойчивости*. Если таких корней два, то система неустойчива.

Применяя сформулированное выше *условие* для оценки устойчивости реальных АСУ, не следует забывать, что линейные уравнения вида (1), как правило, получаются в результате упрощений и линеаризации исходных нелинейных уравнений. Возникает вопрос: в какой мере оценка устойчивости по линеаризованному уравнению будет справедлива для реальной системы, и не окажут ли существенное влияние на результат анализа отброшенные при линеаризации члены разложения? Ответ на него был дан русским математиком А. М. Ляпуновым в 1892 г. в работе «Общая задача об устойчивости движения». Он сформулировал и доказал следующую теорему:

если характеристическое уравнение линеаризованной системы имеет хотя бы один нулевой корень или одну пару мнимых корней, то судить об устойчивости реальной системы по линеаризованному уравнению нельзя. Отброшенные при линеаризации малые члены могут сделать систему неустойчивой, и поэтому устойчивость реальной системы необходимо оценивать по исходному нелинейному уравнению.

Характеристическое уравнение АСУ можно составлять не только по дифференциальному уравнению (2.1) ее свободного движения, но и по ее алгоритмической схеме с известными передаточными функциями звеньев.

Получим характеристическое уравнение разомкнутой АСУ, алгоритмическая схема которой приведена на рисунке 1.2.3, а.

Ее уравнение движения:

$$X(p) = W(p)X_3(p), \quad (2.4)$$

или представляя передаточную функцию системы в виде:

$$W(p) = \frac{K(p)}{D(p)}, \quad (2.5)$$

где $K(p)$ и $D(p)$ – входной и собственный операторы, уравнение движения приводим к виду:

$$X(p) = \frac{K(p)}{D(p)} X_3(p). \quad (6)$$

Полагая в уравнении (2.6) задающее воздействие $X_3(p) = 0$ записываем уравнение свободного движения АСУ:

$$D(p)X(p) = 0. \quad (2.7)$$

Откуда искомое характеристическое уравнение разомкнутой АСУ

$$D(p) = 0. \quad (2.8)$$

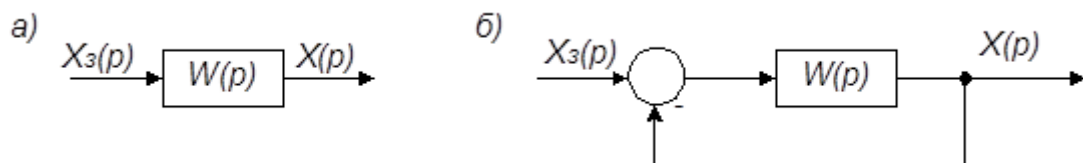


Рис.1.2.3. Алгоритмические схемы АСУ:
а – разомкнутой; б – типовой замкнутой

Получим характеристическое уравнение типовой замкнутой АСУ, алгоритмическая схема которой приведена на рисунке 1.2.3, б.

Ее уравнение движения:

$$X(p) = \frac{W(p)}{1 + W(p)} X_3(p), \quad (2.9)$$

или с учетом обозначения (2.5):

$$X(p) = \frac{K(p)}{D(p) + K(p)} X_3(p). \quad (2.10)$$

Полагая в уравнении (2.10) $X_3(p) = 0$, записываем уравнение свободного движения АСУ:

$$[D(p) + K(p)]X(p) = 0. \quad (2.11)$$

Тогда искомое характеристическое уравнение *типовой замкнутой АСУ*:

$$D(p) + K(p) = 0. \quad (2.12)$$

Как было показано выше, для суждения об устойчивости линейной АСУ достаточно определить лишь знаки действительных частей корней характеристического уравнения [1].

В ТАУ разработан ряд правил, с помощью которых можно судить о знаках действительных частей корней, не решая характеристическое уравнение и не находя числовые значения самих корней. Эти правила получили название *критериев устойчивости*.

Различают *алгебраические* и *частотные* критерии устойчивости.

Алгебраические критерии устанавливают необходимые и достаточные условия отрицательности вещественных частей корней в форме ограничений, накладываемых на определенные комбинации коэффициентов характеристического уравнения системы.

Частотные критерии определяют связь между устойчивостью системы и формой ее частотных характеристик.

Наибольшее распространение в инженерной практике нашли алгебраические *критерии Гурвица и Рауса*.

Из частотных критериев наибольшее распространение нашли *критерии Михайлова и Найквиста*.

При помощи критериев устойчивости можно установить факт устойчивости или неустойчивости АСУ, все параметры которой заданы. Однако часто при проектировании и наладке АСУ возникает более общая задача анализа устойчивости – определение допустимых (по условию устойчивости) пределов изменения некоторых *варьируемых параметров* системы. В качестве таких параметров обычно рассматривают коэффициенты и постоянные времени управляющего устройства (регулятора), которые можно *целенаправленно* изменять при настройке системы. Так как эти коэффициенты и постоянные времени однозначно определяют коэффициенты характеристического уравнения системы, то последние так же могут служить варьируемыми параметрами.

Допустимые пределы варьирования параметров системы можно определить путем построения *областей устойчивости*.

Область устойчивости АСУ – область в пространстве варьируемых параметров АСУ, каждой точке которой соответствуют только корни характеристического уравнения с отрицательными действительными частями (располагающиеся в левой части комплексной плоскости).

Область устойчивости выделяет из всех возможных значений варьируемых параметров лишь те значения, при которых система устойчива.

Поверхность, ограничивающая область устойчивости, называется *границей области устойчивости*.

Вид области устойчивости и ее границы определяется числом варьируемых параметров. Так при одном варьируемом параметре α область устойчивости – *отрезок прямой*, а граница – *точки α_1 и α_2* по концам этого отрезка (рис.1.2.4, а). При двух варьируемых параметрах α и β область устойчивости – *часть плоскости*, а граница – например, линия АВ, часть ОА оси параметра α и положительная ось параметра β (рис. 1.2.4, б). Граница со стороны области устойчивости штрихуется.

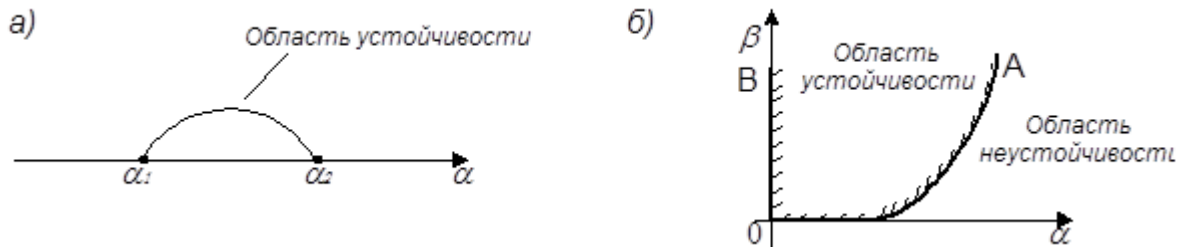


Рис.1.2.4 Области устойчивости АСУ:

а – при одном варьируемом параметре; б – при двух варьируемых параметрах

Для отыскания границы области устойчивости можно воспользоваться одним из критериев устойчивости, например, критерием Гурвица, а можно и другими способами, например, методом *D-разбиения*.

Устойчивость АСУ зависит как от вида ее характеристического уравнения, так и от конкретных числовых значений коэффициентов уравнения. Существуют системы, которые неустойчивы при любых значениях параметров. Такие системы называют *структурно неустойчивыми*. Структурно неустойчивую систему можно сделать устойчивой, только изменив ее структуру. У структурно неустойчивой системы в пространстве любых ее параметров области устойчивости не существует. Таковой, например, является АСУ, алгоритмическая схема которой приведена на рисунке 1.2.5. В ней T и k – соответственно постоянная времени и передаточный коэффициент инерционного звена.

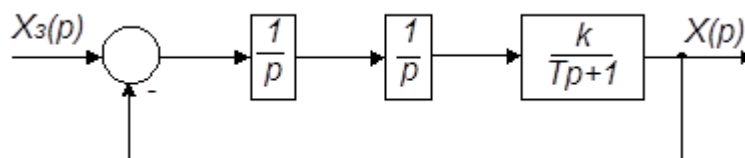


Рис. 1.2.5. Алгоритмическая схема структурно неустойчивой АСУ

Характеристическое уравнение такой системы, имеет вид:

$$Tp^3 + p^2 + k = 0. \quad (2.13)$$

По критерию Гурвица должны выполняться условия устойчивости:

$$\left. \begin{aligned} a_0 &= T > 0, \\ \Delta_1 &= a_1 = 1 > 0, \\ \Delta_2 &= \begin{vmatrix} a_1 & a_3 \\ a_0 & a_2 \end{vmatrix} = a_1 a_2 - a_0 a_3 = 1 \cdot 0 - T \cdot k = -T \cdot k > 0, \\ \Delta_3 &= a_3 \Delta_2 = k \Delta_2 > 0. \end{aligned} \right\} (2.14)$$

Однако ни при каких значениях постоянной времени T и передаточного коэффициента k определитель Δ_2 не может быть положительным. Поэтому рассматриваемая система является структурно неустойчивой.

Существуют *общие рекомендации* по влиянию на структурную устойчивость одноконтурной АСУ:

- звенья, уменьшающие инерционность системы, способствуют ее устойчивости (например, форсирующее звено первого порядка);
- звенья, увеличивающие инерционность системы, способствуют ее неустойчивости (например, идеальные интегрирующее и колебательное звенья).

Чем *передаточный коэффициент разомкнутой АСУ* больше, тем более резко изменяются сигналы и воздействия в системе, т.е. ее свободное движение происходит с большей частотой. Следствием этого является большее запаздывание по фазе сигнала обратной связи (управляемой величины) по отношению к сигналу ошибки. И при определенном передаточном коэффициенте обратная связь начинает работать уже как *положительная* и приводит к раскачиванию системы, т.е. к неустойчивости системы.

Таким образом, установлена общая закономерность: чем больше *передаточный коэффициент разомкнутой АСУ*, тем ближе замкнутая АСУ к *границе устойчивости*.

Предельное значение передаточного коэффициента разомкнутой АСУ зависит от соотношения постоянных времени звеньев, образующих контур системы. Рассмотрим, например, статическую АСУ, состоящую из трех инерционных звеньев первого порядка с передаточными коэффициентами k_1 , k_2 , k_3 и постоянными времени T_1 , T_2 , T_3 , алгоритмическая схема которой приведена на рисунке 1.2.6.

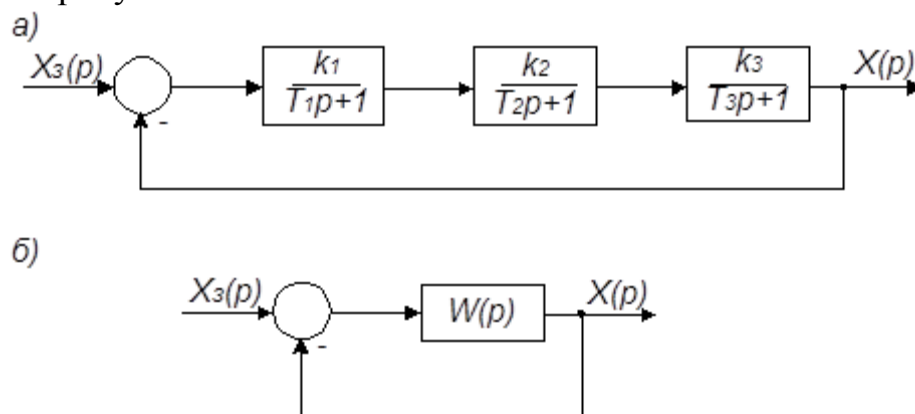


Рис. 1.2.6. Алгоритмическая схема статической одноконтурной АСУ:
а – развернутая; б – свернутая

Передаточная функция разомкнутой АСУ (обратная связь разомкнута):

$$W(p) = \frac{k_1 k_2 k_3}{(T_1 p + 1)(T_2 p + 1)(T_3 p + 1)} = \frac{k}{(T_1 p + 1)(T_2 p + 1)(T_3 p + 1)}, \quad (2.15)$$

где k – передаточный коэффициент разомкнутой системы.

Согласно (2.5 и 2.12) характеристическое уравнение замкнутой системы:

$$(T_1 p + 1)(T_2 p + 1)(T_3 p + 1) + k = 0. \quad (2.16)$$

Или:

$$a_0 p^3 + a_1 p^2 + a_2 p + a_3 = 0, \quad (2.17)$$

где:

$$a_0 = T_1 T_2 T_3; \quad a_1 = T_1 T_2 + T_1 T_3 + T_2 T_3; \quad a_2 = T_1 + T_2 + T_3; \quad a_3 = 1 + k. \quad (2.18)$$

Согласно критерию Гурвица система третьего порядка будет находиться на границе устойчивости при:

$$\Delta_2 = a_1 a_2 - a_0 a_3 = 0. \quad (2.19)$$

Подставляя в условие (2.19) значения коэффициентов a_0, a_1, a_2, a_3 из выражений (2.18), получаем:

$$(T_1 T_2 + T_1 T_3 + T_2 T_3)(T_1 + T_2 + T_3) - T_1 T_2 T_3 (1 + k_{np}) = 0. \quad (2.20)$$

Решая это уравнение, получаем искомое значение предельного коэффициента:

$$k_{np} = 2 + \frac{T_1}{T_2} + \frac{T_1}{T_3} + \frac{T_2}{T_1} + \frac{T_2}{T_3} + \frac{T_3}{T_1} + \frac{T_3}{T_2}. \quad (2.21)$$

Анализ зависимости (2.21) позволяет говорить, что предельный коэффициент тем больше, чем больше разность между двумя наиболее различающимися постоянными времени (например, T_1 и T_2) и чем ближе третья постоянная времени (T_3) к среднеарифметическому значению двух первых.

Сказанное выше справедливо для систем любого порядка, и поэтому всегда при конструировании АСУ стремятся как можно больше «раздвинуть» постоянные времени. Однако изменение постоянных времени с целью увеличения передаточного коэффициента во многих случаях оказывается невозможным или нецелесообразным. И тогда эффективным средством влияния на устойчивость системы является изменение ее структуры путем добавления специальных стабилизирующих и корректирующих устройств [1].

Качество АСУ – совокупность свойств, обеспечивающих эффективное функционирование системы в целом.

В свою очередь, свойства, из этой совокупности, выраженные в количественной форме, называют *показателями качества АСУ*.

Так АСУ можно характеризовать такими показателями качества, как вес системы, ее габариты, стоимость, надежность, долговечность и т.п. Эти показатели характеризуют качество АСУ в *широком* смысле.

В ТАУ же показатели качества рассматривают, как правило, в более узком смысле: рассматривают только *статические и динамические свойства системы*, характеризующие *точность* поддержания управляемой величины $x(t)$ на заданном уровне $x_3(t)$ соответственно в установившихся и переходных режимах, т.е. характеризующие *эффективность процесса управления*. Для такого более узкого понимания качества АСУ применяют термин «качество управления АСУ». Иными словами:

Качество управления АСУ – совокупность свойств АСУ, характеризующих точность поддержания управляемой величины на заданном уровне в установившихся и переходных режимах.

В свою очередь, свойства, из этой совокупности, выраженные в количественной форме, называют *показателями качества управления АСУ*.

Рассмотрим понятие *точности АСУ*.

Назначение АСУ заключается в поддержании равенства

$$x(t) = x_3(t) \quad (2.22)$$

при любых изменениях задающего и возмущающих воздействий. То есть АСУ должна воспроизводить задающее воздействие $x_3(t)$ и подавлять (компенсировать) действие возмущающих воздействий. Однако из-за инерционности объекта управления и регулятора обе эти функции выполняются АСУ с *погрешностью (ошибкой)*

$$\varepsilon(t) = x_3(t) - x(t), \quad (2.23)$$

которая и характеризует *точность АСУ*. Чем *меньше* мгновенные значения ошибки $\varepsilon(t)$, тем *выше точность АСУ*, т.е. ее *качество*.

Для типовой одноконтурной АСУ уравнение динамики в операторной форме для сигнала ошибки имеет вид:

$$\varepsilon(p) = X_3(p) - X(p). \quad (2.24)$$

Подставляя значение управляемой величины $X(p)$ в уравнение (2.24), приводим последнее к виду:

$$\varepsilon(p) = \frac{1}{1 + W_p(p)W_o(p)} [X_3(p) - X_b(p)] \quad (2.25)$$

Из полученного выражения следует, что *чем больше усилительные свойства регулятора ($W_p(p)$), тем ошибка $\varepsilon(p)$, а значит и $\varepsilon(t)$ будет меньше и в статике и в динамике*.

Точность АСУ в переходном режиме оценивают при помощи *прямых и косвенных* показателей качества.

Прямые показатели качества определяют по графику переходного процесса, возникающего в системе при ступенчатом внешнем воздействии.

Косвенные показатели качества определяют по распределению корней характеристического уравнения или по частотным характеристикам системы.

В настоящее время разработаны и получили широкое распространение мощные средства компьютерного моделирования АСУ, позволяющие точно и быстро вычислять переходный процесс, т.е. оценивать точность системы через *прямые показатели качества*.

Различают колебательный (1), апериодический (2) и монотонный (3) типовые переходные процессы (рис. 1.2.7).

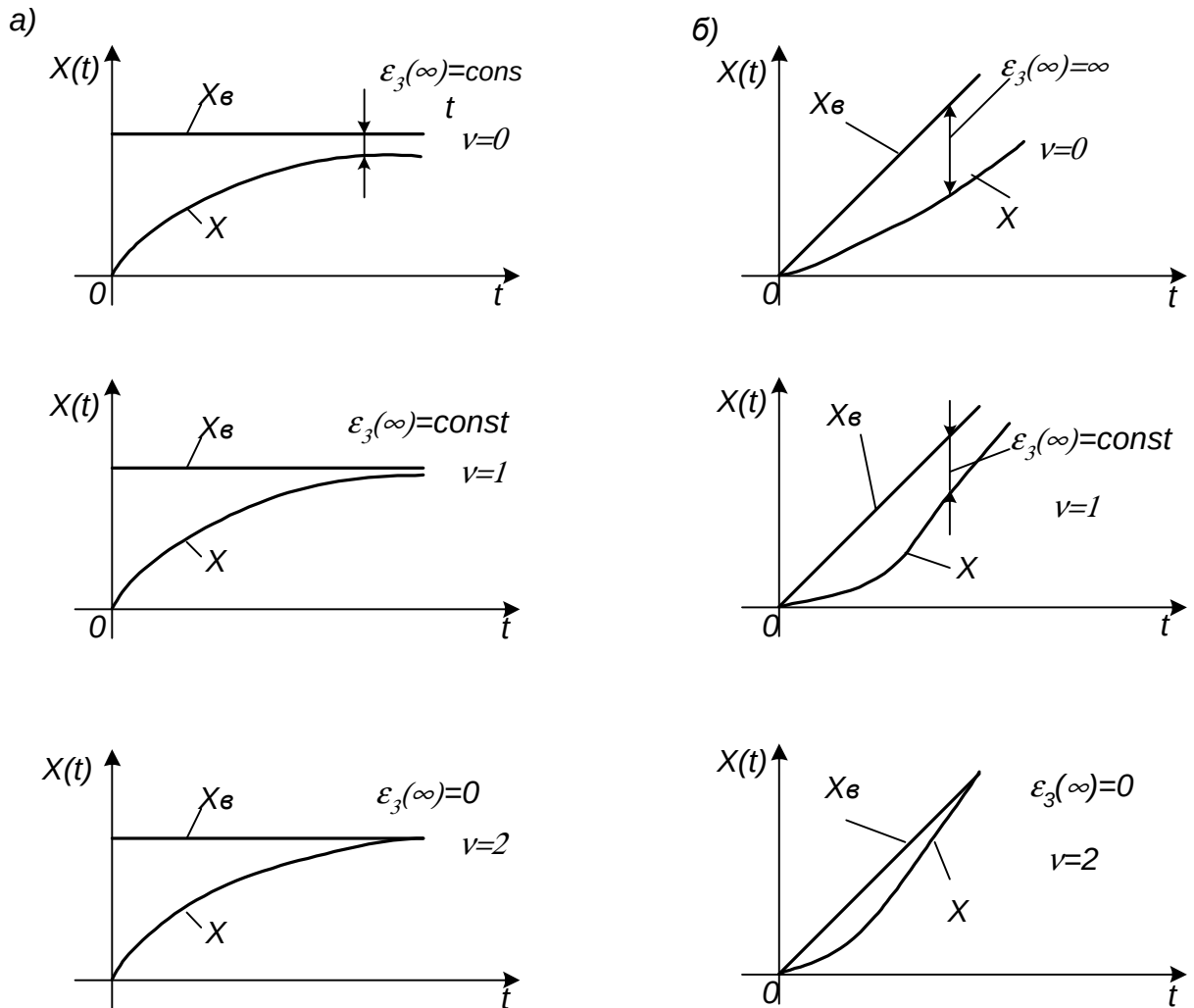


Рис. 1.2.7. Переходные процессы в статической и астатической АСУ при ступенчатом (а) и линейном (б) изменении задающего воздействия

Каждый из трех типовых переходных процессов имеет свои преимущества и недостатки, и предпочтение той или иной форме процесса отдают с учетом особенностей объекта управления. Так, например, в электромеханических системах, коими являются электрические системы, нежелательны резкие знакопеременные усилия, и поэтому при выборе настроек АСУ такими объектами стремятся к достижению апериодических и монотонных процессов.

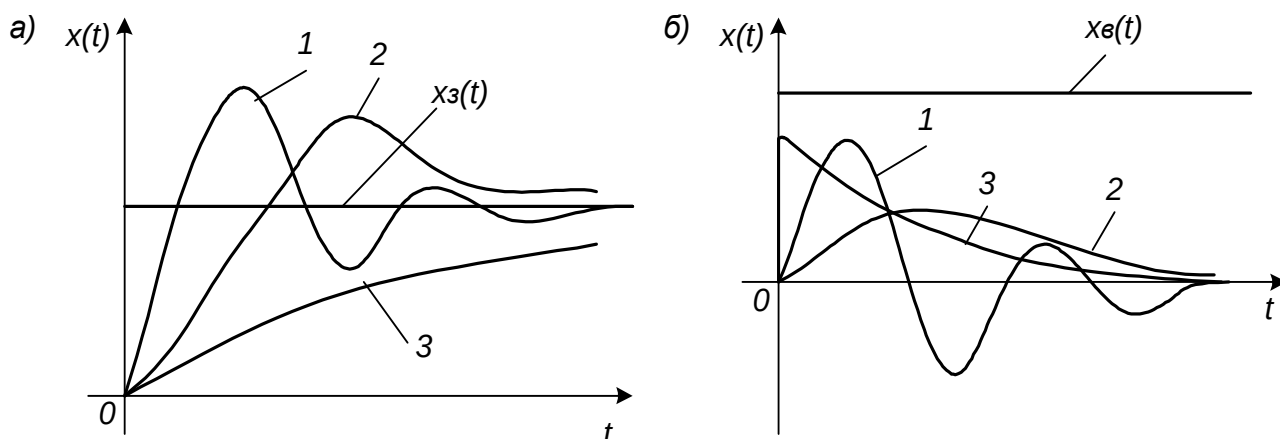


Рис. 1.2.8. Типовые переходные процессы
а – по заданию; б – по возмущению

Рассмотрим *основные прямые показатели качества управления АСУ* применительно к типовой одноконтурной системе регулирования. На графиках переходных процессов, вызванных ступенчатым изменением задающего воздействия $x_3(t)$ (рис. 1.2.8, а) и возмущения $x_6(t)$, действующего на выходе объекта (рис. 1.2.8, б), за начало отсчета для управляемой величины $x(t)$ принято значение $x(-0)$, которое было до подачи ступенчатого воздействия.

Прежде всего познакомимся с показателями качества переходного процесса, вызванного ступенчатым изменением задающего воздействия $x_3(t)$ (рис. 1.2.9.).

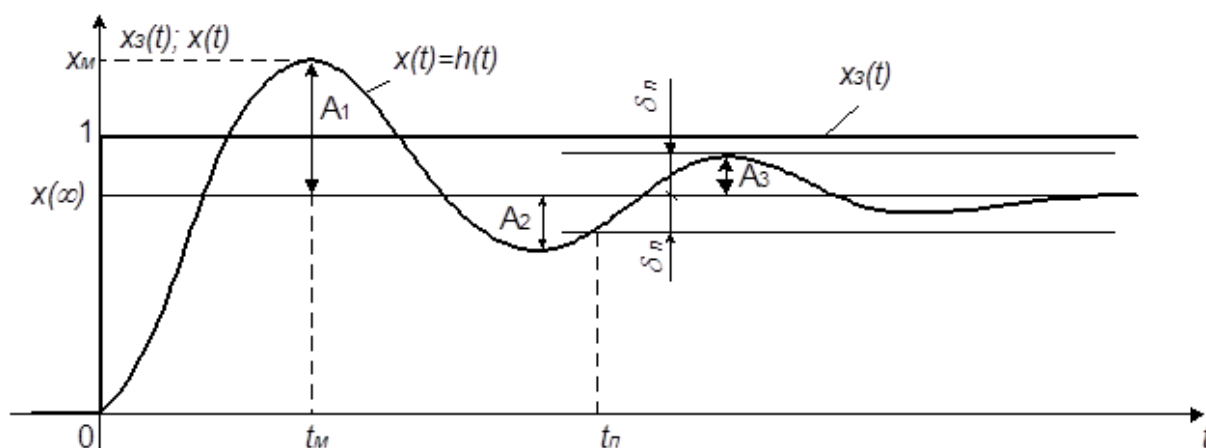


Рисунок 1.2.9. Прямые показатели качества процесса управления (регулирования) по каналу задания

Перерегулирование σ – величина, равная отношению первого максимального отклонения x_m управляемой величины $x(t)$ от ее установившегося значения $x(\infty)$ к этому установившемуся значению:

$$\sigma = \frac{x_m - x(\infty)}{x(\infty)} \cdot 100 = \frac{A_1}{x(\infty)} \cdot 100, \% \quad (2.26)$$

Качество управления считается удовлетворительным, если перерегулирование не превышает 30...40%.

Степень затухания

$$\psi = \frac{A_1 - A_3}{A_1} = 1 - \frac{A_3}{A_1}. \quad (2.27)$$

Интенсивность затухания колебаний в системе считается удовлетворительной, если $\psi = 0,75 \dots 0,95$.

Длительность переходного процесса (время регулирования) t_n – интервал времени от момента приложения ступенчатого воздействия до момента, после которого отклонения управляемой величины $x(t)$ от ее нового установившегося значения $x(\infty)$ становятся меньше некоторого заданного числа δ_n , т.е. до момента, после которого выполняется условие $|x(t) - x(\infty)| \leq \delta_n$.

В промышленной автоматике величину δ_n обычно принимают равной 5% от установившегося значения $x(\infty)$ [$\delta_n = 0,05 x(\infty)$].

Колебательность N – число переходов управляемой величины $x(t)$ через ее установившееся значение $x(\infty)$ за время переходного процесса t_n .

Три главных показателя качества – перерегулирование σ , первое максимальное отклонение x_m и длительность переходного процесса t_n – тесно связаны между собой. Они зависят от всех параметров системы, но наиболее сильно – от передаточного коэффициента k разомкнутой системы. Причем, с увеличением этого коэффициента максимальное отклонение по каналу возмущения всегда уменьшается (рис. 1.2.8, а), максимальное отклонение по каналу задающего воздействия всегда увеличивается (рис. 1.2.8, б), а перерегулирование и длительность переходного процесса, как правило, увеличиваются (рис. 1.2.9.). Отыскание компромисса между этими двумя противоречивыми тенденциями является одной из основных задач *синтеза АСУ*.

Еще раз отметим, что рассмотренные прямые показатели качества удобно использовать в тех случаях, когда график переходного процесса $x(t)$ можно получить *экспериментально* в реальной АСУ или путем *моделирования* системы на ЭВМ [1].

Каждый из рассмотренных выше прямых показателей качества характеризует лишь *одно* какое-либо свойство АСУ, лишь *один* признак переходного процесса. Причем, все показатели связаны с настроечными параметрами регулятора сложными зависимостями, имеющими, как правило, противоречивый характер: изменение параметра приводит к *улучшению* одних показателей качества и *ухудшению* других. Это обстоятельство существенно затрудняет выбор параметров регулятора. Поэтому в инженерной практике широко используются *интегральные показатели (оценки) качества*.

Интегральная оценка качества – определенный интеграл по времени (в пределах от 0 до ∞) от некоторой функции управляемой величины $x(t)$, а чаще сигнала ошибки $\varepsilon(t)$:

$$Q = \int_0^{\infty} f_0[x(t), t] dt. \quad (2.28)$$

Подынтегральная функция f_0 выбирается таким образом, чтобы интеграл (28) лучше характеризовал качество системы и проще выражался через коэффициенты передаточной функции замкнутой системы. Чтобы интеграл был сходящимся, в функцию f_0 вводят не абсолютные значения $x(t)$ или $\varepsilon(t)$, а их отклонения от конечных, установившихся значений.

Простейшей интегральной оценкой является *линейная интегральная оценка*

$$Q_L = \int_0^{\infty} [x(\infty) - x(t)] dt, \quad (2.29)$$

которая равна площади, заключенной между прямой $x(\infty)$ и кривой переходного процесса $x(t)$ (рис. 1.2.10, а). Интегральная оценка (2.29) учитывает как величину динамических отклонений, так и длительность их существования. Поэтому *чем меньше оценка, тем лучше качество процесса управления*.

Недостатком линейной интегральной оценки Q_L является то, что ее можно применять лишь для заведомо неколебательных, апериодических переходных процессов. Интеграл (2.29), вычисленный для знакопеременной кривой 1, (рис. 1.2.10, б) будет существенно меньше интеграла, вычисленного для апериодической кривой 2 (хотя качество переходного процесса 2 явно лучше).

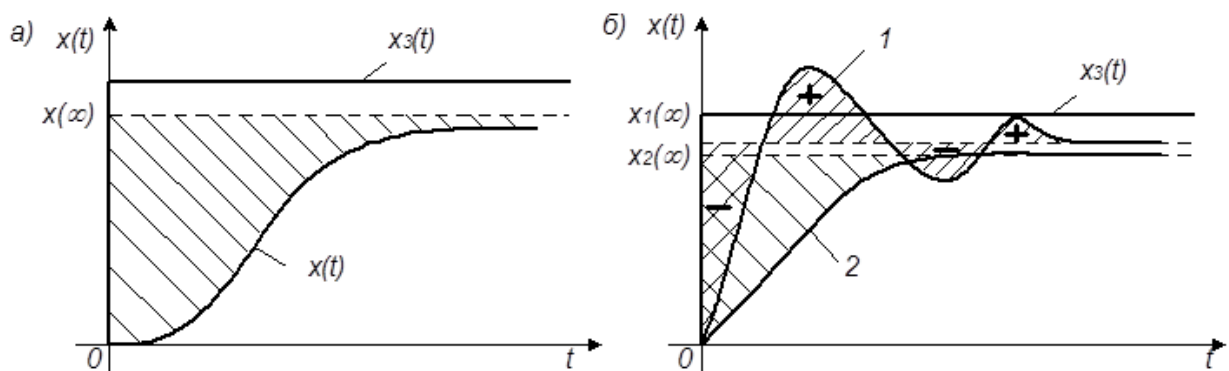


Рисунок 1.2.10. Интегральные оценки качества

В связи с этим, для колебательных переходных процессов применяют такие интегральные оценки, знакопеременность подынтегральной функции которых тем или иным способом устранена. Такой оценкой является, например, *модульная интегральная оценка*:

$$Q_M = \int_0^{\infty} |x(\infty) - x(t)| dt. \quad (2.30)$$

Все рассмотренные интегральные показатели используют не только для оценки качества, но и для *определения оптимальных значений настроечных параметров АСУ*. Оптимальными считают такие значения, которые соответствуют минимуму интегрального показателя $Q \rightarrow \min$ [1].

Выполнение лабораторной работы. Реализовать в программном средстве структурную схему замкнутой системы регулирования с обратной связью с заданными параметрами входящих в нее элементов (рис. 1.2.11.).

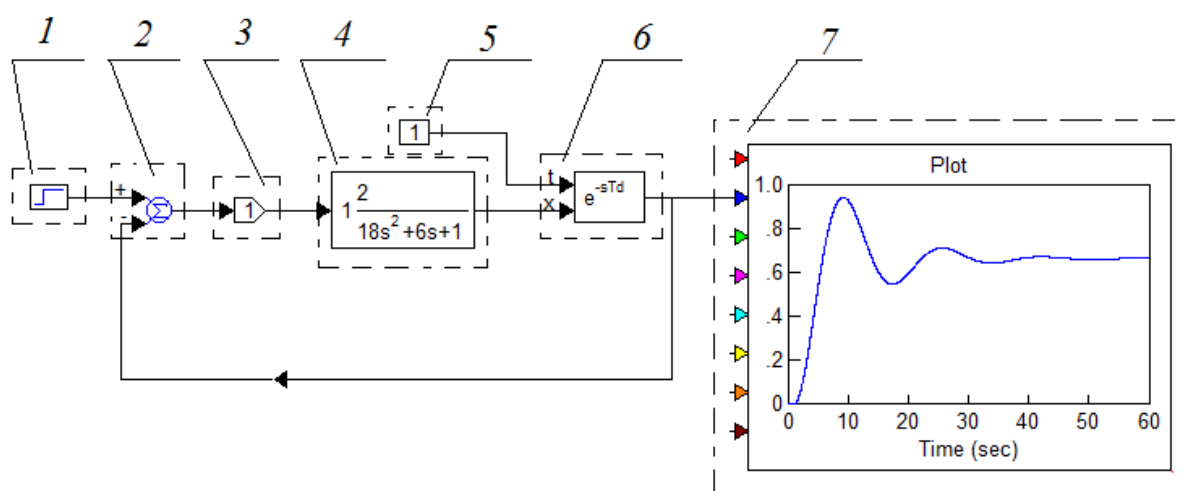


Рисунок 1.2.11. Структурная схема системы управления в программном средстве VisSim

Где: 1 – блок формирования входного воздействия (единичный скачек);
 2 – сумматор (для формирования отрицательного сигнала необходимо навести курсор на изменяемый знак и одновременно нажать Ctrl и правую кнопку мышки);
 3 – передаточная функция управляющего устройства (k_1 – переменный параметр в ходе лабораторной работы);
 4, 5, 6 – передаточная функция объекта управления (числовые значения коэффициентов выбираются согласно варианту из таблицы 2.1.);

$$W_o = \frac{k}{2Ts^2 + Ts + 1} \cdot e^{-s\tau}$$

7 – блок реализации переходного процесса системы управления.

Таблица 2.1

Номер варианта	K , коэффициент усиления	T , постоянная времени	τ , время запаздывания	Номер варианта	K , коэффициент усиления	T , постоянная времени	τ , время запаздывания	Номер варианта	K , коэффициент усиления	T , постоянная времени	τ , время запаздывания
1	2	23	2	13	3,1	24	1,5	25	0,5	21	1,1
2	5	19	3	14	2,7	31	2,3	26	2,7	25	1,3

3	4	14	1,6	15	1,5	16	0,5	27	3	32	0,2
4	1,2	21	4	16	1,8	20	0,8	28	2	15	0,4
5	3,7	16	5	17	3	14	2,7	29	1,6	19	2,1
6	4,2	26	3,5	18	4,2	18	3,6	30	3,1	27	2,4
7	0,9	31	4,2	19	2,9	27	5,1	31	2,3	22	1,7
8	0,7	18	0,8	20	1,2	23	4,6	32	1,2	16	1,6
9	1,8	15	1,9	21	2,2	36	0,3	33	1,3	35	2,5
10	5,3	27	2,5	22	1,3	17	0,7	34	1,8	31	3,1
11	2,2	33	3,7	23	0,9	11	1,2	35	2,4	21	3,3
12	3,9	12	0,9	24	1,6	34	1,6	36	0,7	13	4

Изменяя численное значение коэффициента пропорциональности k_1 в управляющем устройстве (блок 3), определить при каком численном значении k_1 система находится на границе устойчивости. Признаком границы устойчивости является наличие колебаний переходного процесса с одинаковой амплитудой (рис. 1.2.12.).

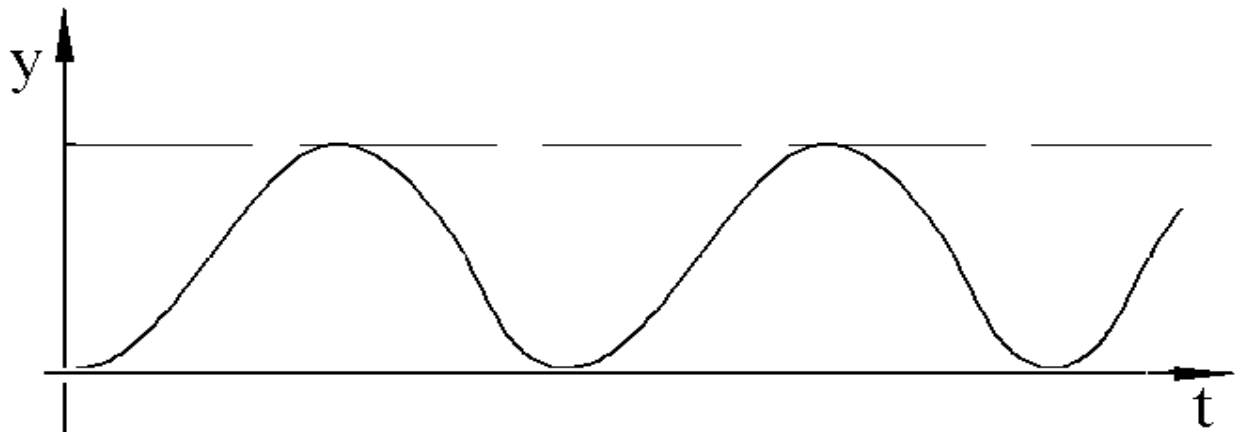


Рисунок 1.2.12. Переходный процесс системы с автоколебаниями

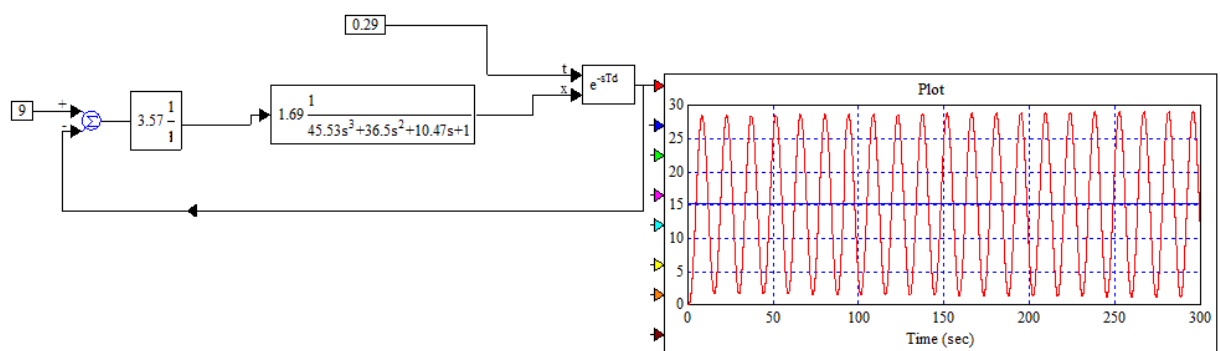


Рисунок 1.2.13. Структурная схема системы управления на границе устойчивости, реализованная в программном средстве VisSim

Схема системы управления при искомом коэффициенте пропорциональности копируется из программного средства и вставляется в «Протокол выполнения лабораторной работы» (файл Word).

Изменяя численное значение коэффициента пропорциональности k_1 в управляющем устройстве (блок 3), получить значение показателя качества «степень затухания» $\Psi=0,85$. Численное значение степени затухания рассчитывается по формуле:

$$\psi = \frac{A_1 - A_3}{A_1},$$

где $A_1=U1-U3$ и $A_3=U2-U3$ – параметры переходного процесса, определяемые на графике переходного процесса (рис. 1.2.14, 1.2.15).

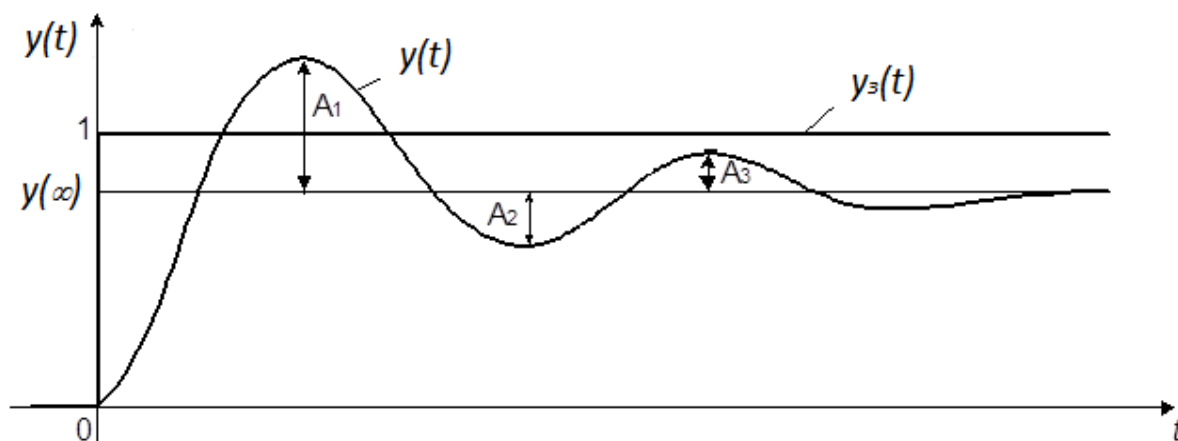


Рисунок 1.2.14. Определение численного значения A_i

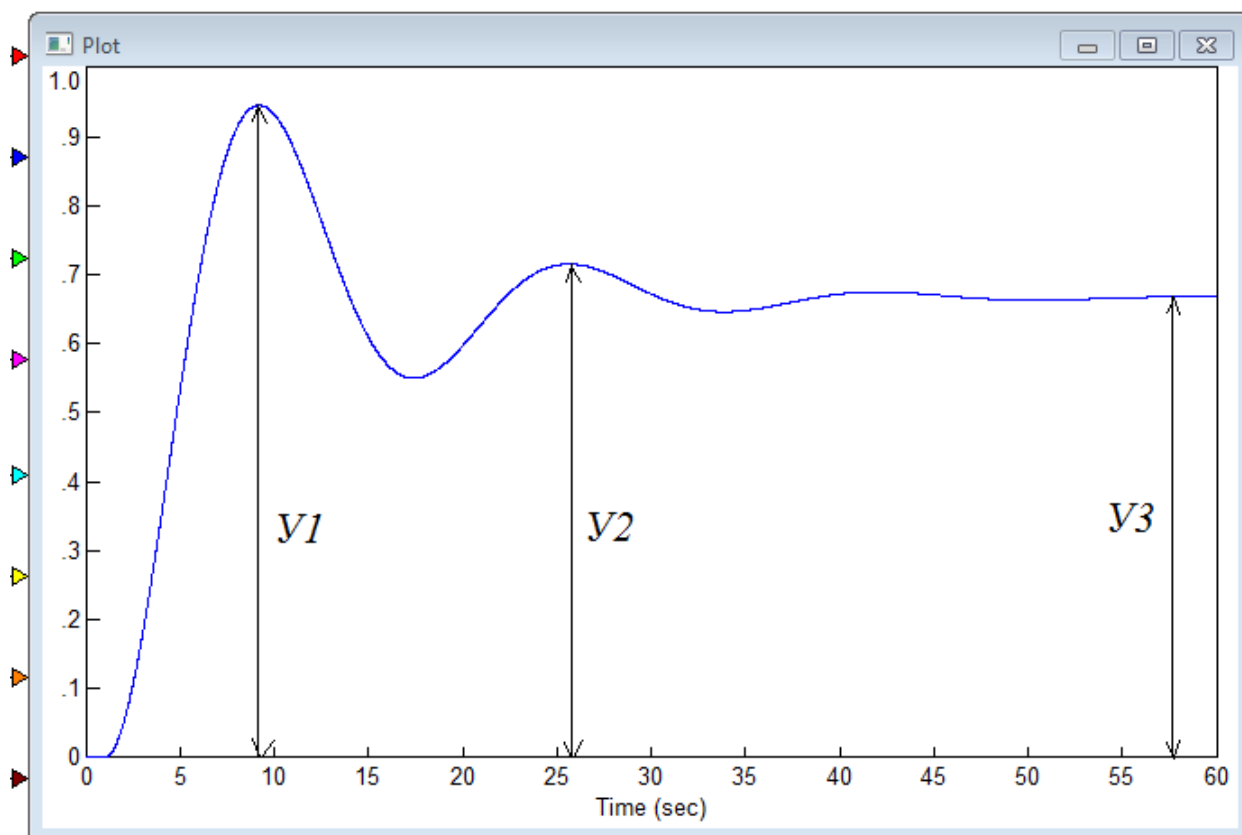


Рисунок 1.2.15. Определение численного значения u_i

В ходе выполнения лабораторной работы, заполнить таблицу значений степени затухания (таблица 2.2) и по данным таблицы построить график зависимости показателя качества Ψ от пропорционального коэффициента k_I .

Таблица 2.2

k_{Ii}												
Ψ_i												

Занести в протокол схему системы управления и переходный процесс, которые соответствуют требуемому качеству работы системы.

Протокол лабораторной работы должен содержать:

- шапку протокола с заполненными графами данных студента и даты выполнения лабораторной работы;
- цель лабораторной работы;
- передаточную функцию объекта управления в редакторе формул с численными значениями ее коэффициентов;
- схему системы управления (из программного средства), которая находится на границе устойчивости;
- схему системы управления (из программного средства), которая соответствует требуемому качеству работы системы;
- заполненную таблицу 2.2;
- график зависимости показателя качества Ψ от пропорционального коэффициента k_I (построенный в Excel).

Контрольные вопросы.

1. Что такое устойчивость линейной системы автоматического управления?
2. Назовите главное правило математической устойчивости.
3. Назовите причины возникновения неустойчивости.
4. Нарисуйте переходный процесс устойчивой системы автоматического управления.
5. Какие критерии устойчивости Вы знаете?
6. Дайте определение алгебраических критериев устойчивости.
7. Приведите пример определения устойчивости системы методом Рауса.
8. Опишите особенности частотных критериев устойчивости.
9. Дайте определение интегральных критериев качества.
10. Какие прямые показатели качества переходных процессов Вы знаете?
11. Покажите на переходном процессе порядок определения степени затухания.
12. По какому алгоритму рассчитывается численное значение времени регулирования?

Лабораторная работа: «Исследование динамических характеристик систем автоматического управления с управляющими устройствами различной структуры»

Цель работы: Повышение эффективности работы замкнутой системы регулирования путем изменения структуры управляющего устройства.

Задачи:

1. Реализовать в программном средстве структурную схему замкнутой системы регулирования с обратной связью с заданными параметрами входящих в нее элементов.
2. Изменяя численное значение коэффициента пропорциональности k_n в управляющем устройстве (блок 3), определить при каком численном значении k_n система находится на границе устойчивости.
3. Зафиксировать численные значения критического коэффициента k_n и периода колебаний T .
4. Рассчитать численные значения настроечных коэффициентов П-, ПИ- и ПИД-регуляторов.
5. Реализовать в программном средстве структурные схемы системы автоматического управления с рассчитанными коэффициентами управляющих устройств.
6. Рассчитать для каждой схемы численное значение показателя качества степень затухания Ψ .
7. Сделать выводы об эффективности того или иного управляющего устройства в системе автоматического управления.
8. Оформить протокол лабораторной работы.
9. Отчитать лабораторную работу.

Теоретический материал. Алгоритм управления (регулирования) в АСУ устанавливает связь ошибки $\varepsilon(p)$ и управляющего воздействия $Y(p)$ (рис. 1.3.1.).

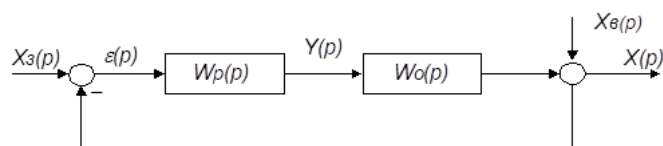


Рисунок 1.3.1. Обобщенная алгоритмическая схема АСУ

Эта связь в типовой одноконтурной АСУ определяется передаточной функцией регулятора:

$$W_p(p) = \frac{Y(p)}{\varepsilon(p)}.$$

В линейных АСУ применяются следующие типовые алгоритмы управления (регулирования):

- пропорциональный (П) алгоритм;

- интегральный (И) алгоритм;
- пропорционально-интегральный (ПИ) алгоритм;
- пропорционально-дифференциальный (ПД) алгоритм;
- пропорционально-дифференциально-интегральный (ПИД) алгоритм.

Пропорциональный алгоритм регулирования (П-алгоритм).

Это простейший алгоритм, который реализуется при помощи безинерционного звена с передаточной функцией:

$$W_p(p) = k_{II}.$$

Так как управляющее воздействие пропорционально сигналу ошибки, то и алгоритм получил название *пропорционального*, а регулятор – *П-регулятора*.

Преимущества П-регулятора – простота и быстроедействие, недостатки – ограниченная точность (особенно при управлении объектами с большой инерционностью и запаздыванием).

Интегральный алгоритм регулирования (И-алгоритм)

Этот алгоритм реализуется при помощи интегрального звена с передаточной функцией:

$$W_p(p) = \frac{k_{II}}{p}.$$

Так как управляющее воздействие пропорционально *интегралу* сигнала ошибки $Y(p) = \frac{k_{II}}{p} \varepsilon(p)$, то и алгоритм получил название *интегрального*, а регулятор *И-регулятора*.

При интегральном алгоритме регулирования управляющее воздействие у в каждый момент времени пропорционально интегралу от сигнала ошибки ε . Поэтому И-регулятор реагирует главным образом на длительные отклонения управляемой величины x от заданного значения $x_{3..}$. Кратковременные отклонения сглаживаются таким регулятором.

Преимущества И-регулятора – лучшая (по сравнению с П-регулятором) точность в установившихся режимах, недостатки – худшие свойства в переходных режимах (меньшее быстроедействие и более высокая колебательность).

Пропорционально-интегральный алгоритм регулирования (ПИ-алгоритм).

Этот алгоритм реализуется при помощи регулятора с передаточной функцией:

$$W_p(p) = k_{II} + \frac{k_{II}}{p}.$$

Так как управляющее воздействие пропорционально как самому сигналу ошибки, так и его интегралу $Y(p) = (k_{II} + \frac{k_{II}}{p}) \varepsilon(p)$, то алгоритм получил название *пропорционально-интегрального*, а регулятор – *ПИ-регулятора*.

Благодаря наличию интегральной составляющей в алгоритме, ПИ-регулятор обеспечивает высокую точность в установившихся режимах, а при

определенном соотношении коэффициентов k_{Π} и $k_{\text{Д}}$ обеспечивает хорошие показатели и в переходных режимах. Поэтому он получил наибольшее распространение в промышленной автоматике.

Пропорционально-дифференциальный алгоритм регулирования (ПД-алгоритм)

Этот алгоритм реализуется при помощи регулятора с передаточной функцией:

$$W_p(p) = k_{\Pi} + k_{\text{Д}} p.$$

Так как управляющее воздействие пропорционально как самому сигналу ошибки, так и его производной $Y(p) = (k_{\Pi} + k_{\text{Д}} p)\varepsilon(p)$, то алгоритм получил название *пропорционально-дифференциального*, а регулятор – *ПД-регулятора*.

ПД-регулятор реагирует не только на величину сигнала ошибки, но и на скорость его изменения. Благодаря этому при регулировании достигается *эффект упреждения*. Недостатком ПД-регулятора является невозможность обеспечения высокой точности регулирования.

Пропорционально-интегрально-дифференциальный алгоритм регулирования (ПИД-алгоритм)

Этот алгоритм реализуется при помощи регулятора с передаточной функцией:

$$W_p(p) = k_{\Pi} + \frac{k_{\text{И}}}{p} + k_{\text{Д}} p.$$

Так как управляющее воздействие пропорционально как самому сигналу ошибки, так и его интегралу и производной $Y(p) = (k_{\Pi} + \frac{k_{\text{И}}}{p} + k_{\text{Д}} p)\varepsilon(p)$,

то алгоритм получил название *пропорционально-интегрально-дифференциального*, а регулятор – *ПИД-регулятора*.

ПИД-алгоритм – наиболее гибкий алгоритм регулирования (в классе линейных алгоритмов). Он сочетает в себе преимущества более простых выше рассмотренных алгоритмов.

Коэффициенты k_{Π} , $k_{\text{И}}$, $k_{\text{Д}}$, входящие в передаточные функции типовых регуляторов, подлежат настройке при наладке АСУ и поэтому называются *настроечными параметрами*. Они имеют наименования: k_{Π} , $k_{\text{И}}$, $k_{\text{Д}}$ – коэффициенты пропорциональной, интегральной и дифференциальной частей АСУ [1].

На основании полученных общих соотношений между параметрами объекта управления и регулятора можно сформулировать *рекомендации по выбору типа регулятора и его настроечных параметров*:

- для объектов с запаздыванием, инерционная часть которых действительно близка звену первого порядка (а не просто аппроксимирована таким звеном!), целесообразно применять ПИ-регулятор.
- Для объектов с запаздыванием, инерционная часть которых имеет порядок $n \geq 2$, наилучшим регулятором является ПИД-регулятор.

Эмпирические формулы в таблице 3.1 обобщают результаты экспериментальных исследований по определению настроечных параметров типовых регуляторов для объектов с запаздыванием (при $\tau_o / T_o = 0 \dots 1$). Параметры определены путем моделирования систем при ступенчатом изменении задающего x_z воздействия. Обеспечиваемым показателем качества АСУ является перерегулирование σ (0 или 20%) на выходе объекта регулирования.

Таблица 3.1

Настроечные параметры типовых регуляторов

Тип регулятора	Настроечные параметры					
	k_{II}		k_{II}		k_D	
	$\sigma = 0$	$\sigma = 20\%$	$\sigma = 0$	$\sigma = 20\%$	$\sigma = 0$	$\sigma = 20\%$
П	$\frac{0,3 T_o}{k_o \tau_o}$	$\frac{0,7 T_o}{k_o \tau_o}$	0	0	0	0
ПИ	$\frac{0,35 T_o}{k_o \tau_o}$	$\frac{0,6 T_o}{k_o \tau_o}$	$\frac{0,29}{k_o \tau_o}$	$\frac{0,6}{k_o \tau_o}$	0	0
ПИД	$\frac{0,6 T_o}{k_o \tau_o}$	$\frac{0,95 T_o}{k_o \tau_o}$	$\frac{0,6}{k_o \tau_o}$	$\frac{0,7}{k_o \tau_o}$	$\frac{0,3 T_o}{k_o}$	$\frac{0,45 T_o}{k_o}$

Если необходимо обеспечить колебательный характер переходного процесса в АСУ, при котором амплитуда каждого последующего колебания должна быть в 4 раза меньше амплитуды предыдущего колебания, т.е. *степень затухания*:

$$\Psi = \frac{A_1 - A_3}{A_1} = \frac{A_1 - A_1/4}{A_1} = 0,75,$$

что соответствует нижней границе, при которой качество управления еще признается удовлетворительным, то следует воспользоваться рекомендациями по выбору настроечных параметров регуляторов, приведенных в таблице 3.2.

Таблица 3.2

Настроечные параметры типовых регуляторов

Тип регулятора	Настроечные параметры		
	k_{II}	k_{II}	k_D
П	$\frac{\tau_o + T_o}{k_o \tau_o}$	0	0
ПИ	$\frac{\tau_o + T_o}{1,1 k_o \tau_o}$	$\frac{\tau_o + T_o}{3,66 k_o \tau_o^2}$	0
ПИД	$\frac{\tau_o + T_o}{0,8 k_o \tau_o}$	$\frac{\tau_o + T_o}{1,6 k_o \tau_o^2}$	$\frac{\tau_o + T_o}{1,6 k_o}$

Проведенные исследования позволили также сформулировать следующие общие выводы о влиянии настроечных параметров на показатели качества регулирования:

- увеличение коэффициента k_{II} пропорциональной части регулятора приводит к увеличению перерегулирования σ , времени t_n переходного процесса и уменьшению степени затухания Ψ .
- Увеличение коэффициента k_{II} интегральной части регулятора приводит к уменьшению времени t_n переходного процесса и увеличению перерегулирования σ .
- Увеличение коэффициента k_D дифференциальной части регулятора приводит к уменьшению времени t_n переходного процесса и увеличению перерегулирования σ [1].

Порядок выполнения лабораторной работы

1. Реализовать в программном средстве структурную схему замкнутой системы регулирования с обратной связью с заданными параметрами входящих в нее элементов (рис. 1.3.2.).

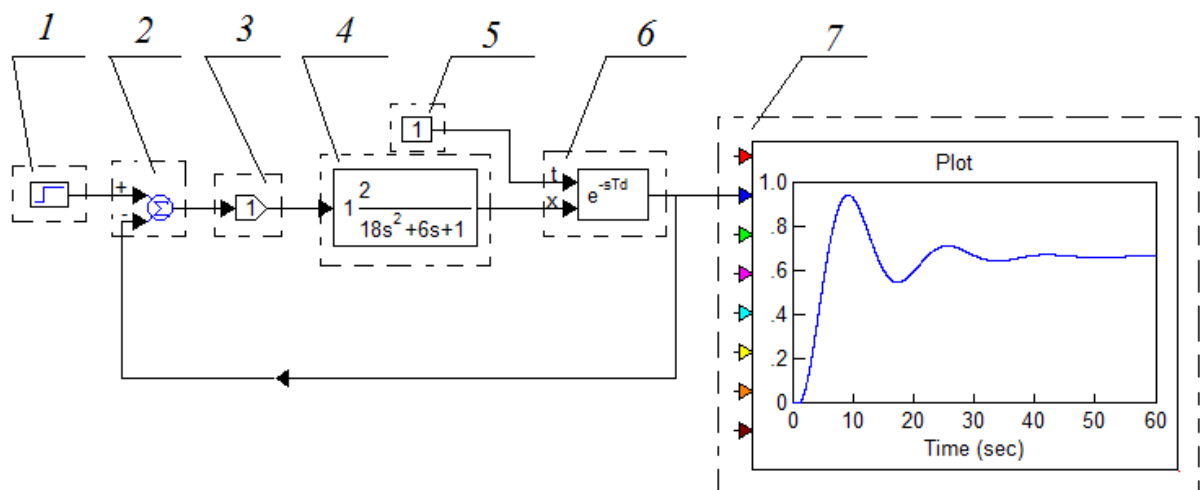


Рисунок 1.3.2. Структурная схема системы управления в программном средстве VisSim

Где: 1 – блок формирования входного воздействия (единичный скачек);

2 – сумматор (для формирования отрицательного сигнала необходимо навести курсор на изменяемый знак и одновременно нажать Ctrl и правую кнопку мышки);

3 – передаточная функция пропорционального управляющего устройства (k_1 – переменный параметр в ходе лабораторной работы);

4, 5, 6 – передаточная функция объекта управления (числовые значения коэффициентов выбираются согласно варианту из таблицы 3.3.);

$$W_o = \frac{k}{2Ts^2 + Ts + 1} \cdot e^{-s\tau}$$

7 – блок реализации переходного процесса системы управления.

Таблица 3.3

Номер варианта	k , коэффициент усиления	T , постоянная времени	τ , время запаздывания	Номер варианта	k , коэффициент усиления	T , постоянная времени	τ , время запаздывания	Номер варианта	k , коэффициент усиления	T , постоянная времени	τ , время запаздывания
1	2	23	2	13	3,1	24	1,5	25	0,5	21	1,1
2	5	19	3	14	2,7	31	2,3	26	2,7	25	1,3
3	4	14	1,6	15	1,5	16	0,5	27	3	32	0,2
4	1,2	21	4	16	1,8	20	0,8	28	2	15	0,4
5	3,7	16	5	17	3	14	2,7	29	1,6	19	2,1
6	4,2	26	3,5	18	4,2	18	3,6	30	3,1	27	2,4
7	0,9	31	4,2	19	2,9	27	5,1	31	2,3	22	1,7
8	0,7	18	0,8	20	1,2	23	4,6	32	1,2	16	1,6
9	1,8	15	1,9	21	2,2	36	0,3	33	1,3	35	2,5
10	5,3	27	2,5	22	1,3	17	0,7	34	1,8	31	3,1
11	2,2	33	3,7	23	0,9	11	1,2	35	2,4	21	3,3
12	3,9	12	0,9	24	1,6	34	1,6	36	0,7	13	4

2. Изменяя численное значение коэффициента пропорциональности k_n в управляющем устройстве (блок 3), определить при каком численном значении k_n система находится на границе устойчивости (рис. 1.3.3.). Признаком границы устойчивости является наличие колебаний переходного процесса с одинаковой амплитудой.

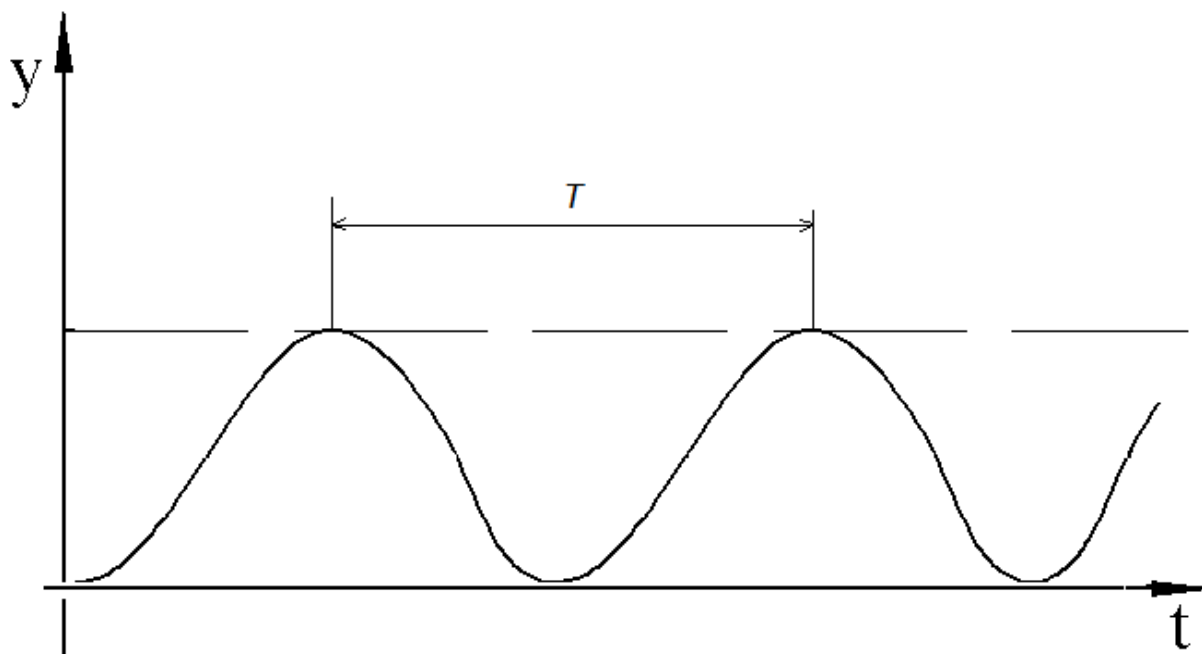


Рисунок 1.3.3. – Переходный процесс системы с автоколебаниями

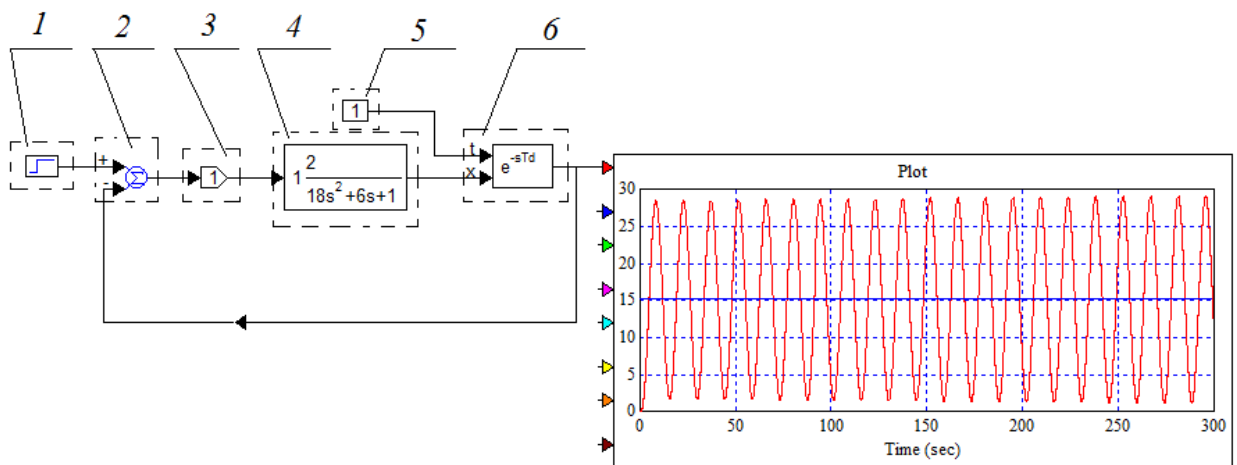


Рисунок 1.3.4. Структурная схема системы с автоколебаниями, реализованная в VisSim

При возникновении данного режима работы фиксируются значения критического коэффициента k_n и периода критических колебаний T . По значениям k_n и T рассчитываются параметры настройки пропорционально (П-регулятора), пропорционально-интегрального (ПИ-регулятора), пропорционально-интегрально-дифференциального (ПИД-регулятора) регулятора (табл. 3.4.).

Таблица 3.4

П-регулятор	$k_1^o = 0,55 k_1$
ПИ-регулятор	$k_1^o = 0,45 k_1; k_2^o = 1,2/T$
ПИД-регулятор	$k_1^o = 0,6 k_1; k_2^o = 2/T; k_3^o = T/8$

3. Численные значения рассчитанных коэффициентов регуляторов подставляются в структурную схему системы регулирования с различными типами регуляторов: П, ПИ, ПИД (рис. 1.3.5, 1.3.6, 1.3.7.).

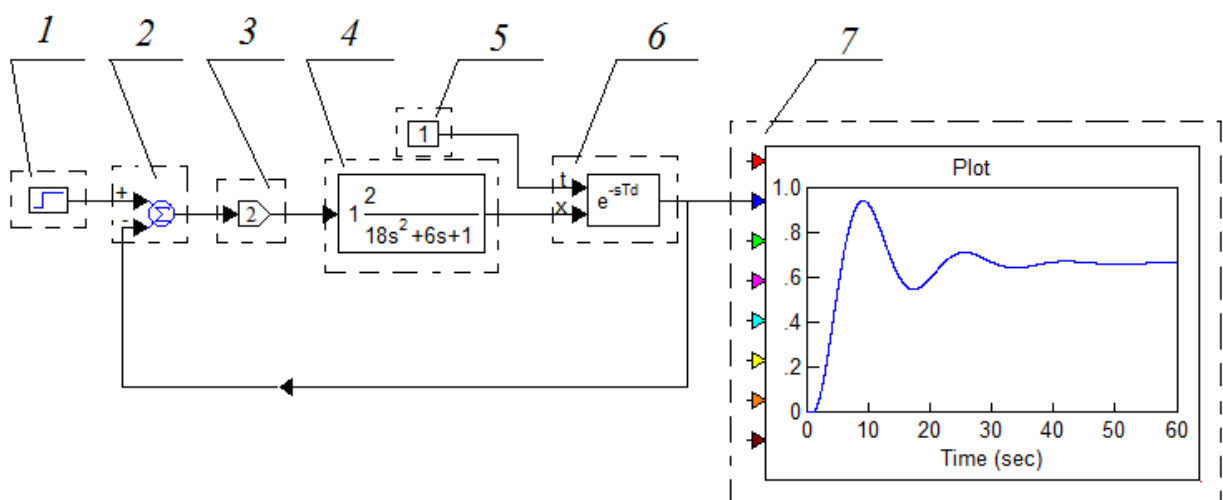


Рисунок 1.3.5. Структурная схема системы с П-регулятором

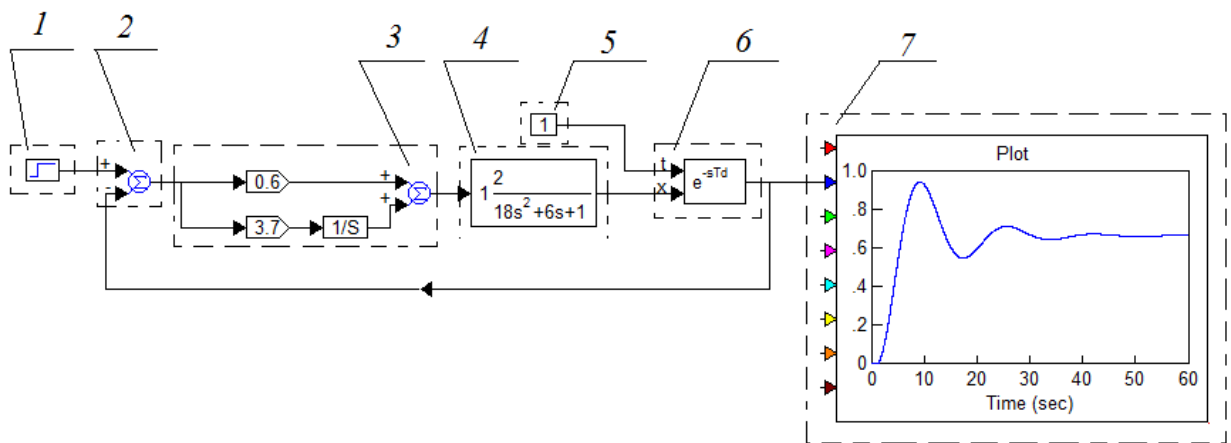


Рисунок 1.3.6. Структурная схема системы с ПИ-регулятором

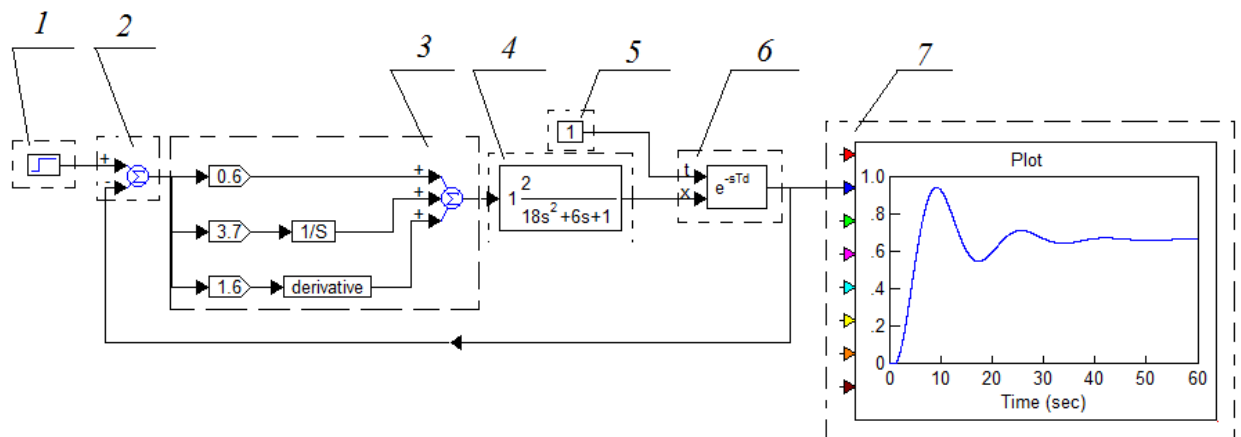


Рисунок 1.3.7. Структурная схема с ПИД-регулятором

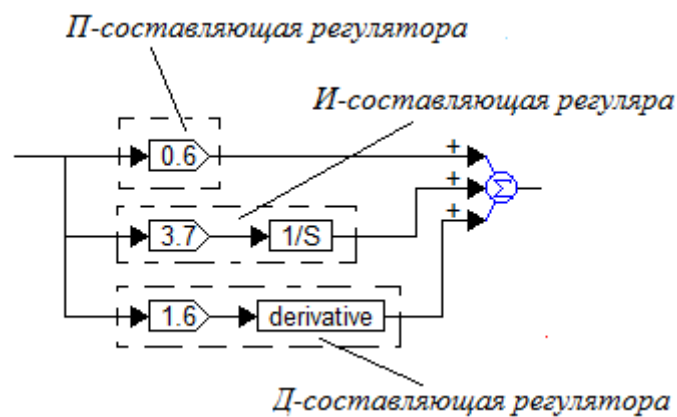


Рисунок 1.3.8. Структурная схема блока ПИД-регулятора

4. Каждый из полученных переходных процессов для регуляторов различных типов исследуется на качество с использованием степени затухания. Численное значение степени затухания рассчитывается по формуле:

$$\psi = \frac{A_1 - A_3}{A_1},$$

где $A_1 = U1 - U3$ и $A_3 = U2 - U3$ – параметры переходного процесса, определяемые на графике (рис. 1.3.9).

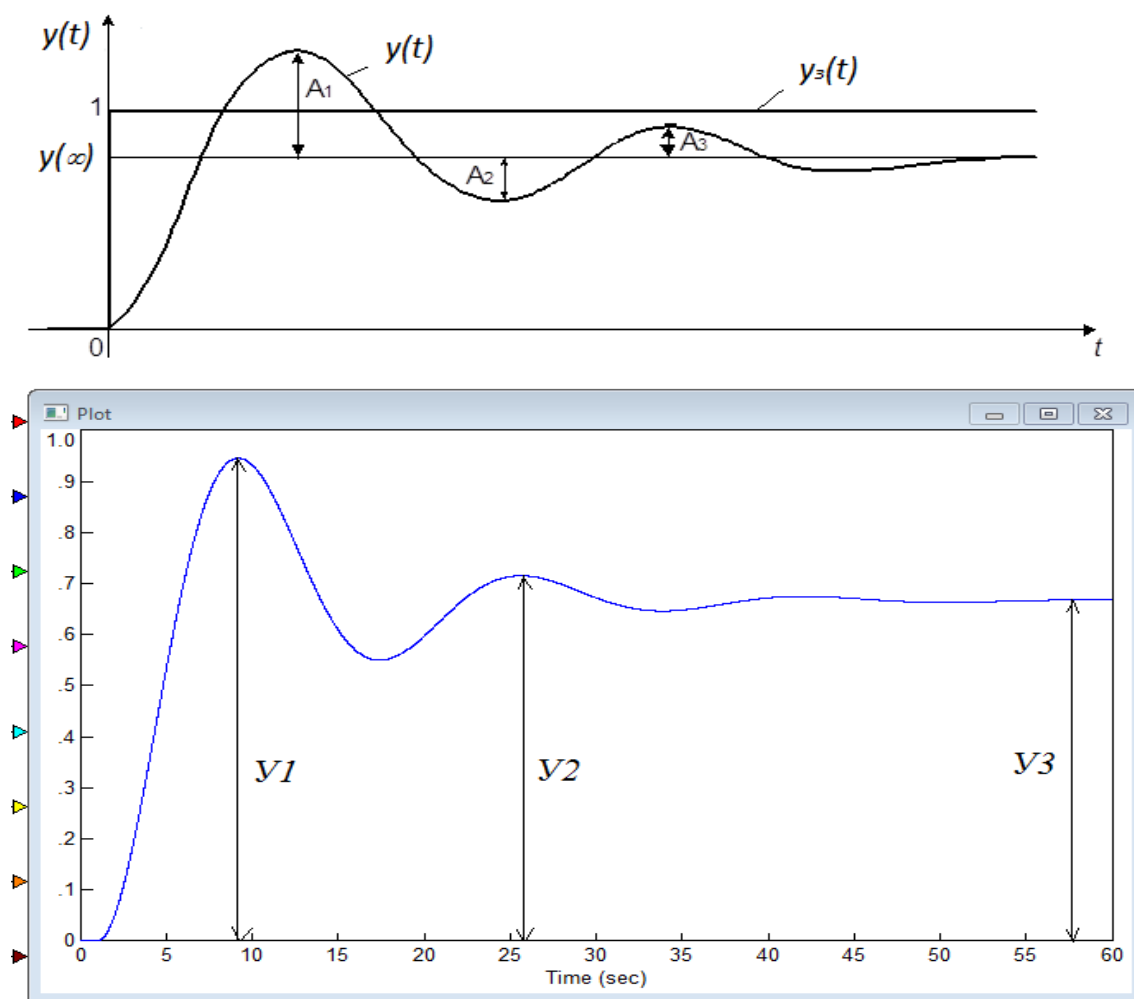


Рисунок 1.3.9. Данные для расчета степени затухания

На основании проведенных исследований, делается вывод о результатах проведения лабораторной работы: об эффективности того или иного регулятора исходя из близости рассчитанного значения Ψ к 0,85.

Протокол выполнения лабораторной работы должен содержать:

- заполненную шапку лабораторной работы (таблица в начале данного протокола);
- цель лабораторной работы;
- передаточную функцию объекта управления W_o с числовыми значениями коэффициентов в редакторе формул;
- структурную схему системы управления, переходный процесс которой имеет автоколебания (картинка из программного средства);
- таблицу с рассчитанными оптимальными коэффициентами П-, ПИ-, и ПИД-регуляторов;
- структурные схемы систем управления с П-, ПИ-, и ПИД-регуляторами с рассчитанными значениями коэффициентов (картинки из программного средства);
- расчёт степени затухания для каждого регулятора;

- вывод по результатам выполнения лабораторной работы.

Контрольные вопросы.

1. Что такое «типовой закон управления»?
2. Какие законы регулирования Вы знаете?
3. Дайте определение и напишите формулу передаточной функции П-регулятора.
4. Дайте определение и напишите формулу передаточной функции ПИ-регулятора.
5. Дайте определение и напишите формулу передаточной функции ПИД-регулятора.
6. Какие правила и рекомендации по выбору закона регулирования Вы знаете?
7. Назовите достоинства и недостатки известных Вам законов регулирования.
8. Как изменение структуры управляющего устройства влияет на качество переходных процессов системы управления?
9. Какой закон регулирования является наиболее эффективным по результатам выполнения лабораторной работы?
10. Какой показатель эффективности использовался в лабораторной работе?

Лабораторная работа: «Исследование эффективности каскадных систем автоматического регулирования»

Цель работы: Повышение эффективности и качественных характеристик каскадной системы автоматического регулирования путем изменения ее структуры.

Задачи:

1. Реализовать в программном средстве структурную схему каскадной системы регулирования с заданными параметрами входящих в нее элементов.
2. Изменяя численное значение коэффициента пропорциональности k_1 в управляющем устройстве внешнего контура R_2 , определить минимум среднеквадратичного показателя качества.
3. Изменяя численное значение коэффициента пропорциональности k_2 в управляющем устройстве внешнего контура R_2 , определить минимум среднеквадратичного показателя качества.
4. Изменяя численное значение коэффициента пропорциональности k_3 в управляющем устройстве внешнего контура R_2 , определить минимум среднеквадратичного показателя качества.
5. Сделать выводы по результатам работы.
6. Оформить протокол лабораторной работы.
7. Отчитать лабораторную работу.

Теоретический материал. Повышение динамической точности систем автоматического регулирования может быть достигнуто либо за счет усложнения алгоритма функционирования регулятора, либо за счет получения регулятором более своевременной (ценной) информации о возмущающих воздействиях. Последний вариант реализуется путем создания дополнительных информационных каналов. Каналы передачи дополнительной информации о возмущающих воздействиях могут образовывать в системе регулирования разомкнутые или замкнутые контуры. На практике наибольшее распространение получили два вида систем автоматического регулирования с дополнительными информационными каналами – каскадные системы и системы с компенсацией возмущений.

Каскадными называют системы автоматического регулирования, в которых с целью максимально эффективного подавления возмущений, идущих по каналу регулирующего воздействия, вспомогательную регулируемую величину выбирают в непосредственной близости от регулирующего органа.

Целесообразность ввода дополнительного информационного канала по вспомогательной регулируемой величине определяется тем, что вспомогательная регулируемая величина должна реагировать на поступающие возмущения, идущие по каналу регулирующего воздействия с

меньшим запаздыванием, чем основная регулируемая величина. Различают два вида каскадных систем:

- системы с двумя регуляторами (корректирующим и стабилизирующим);
- системы с вводом производной от промежуточной регулируемой величины.

Структурная схема непрерывной каскадной системы с корректирующим и стабилизирующим регуляторами представлена на рисунке 1.4.1. Здесь вспомогательная регулируемая величина z поступает на вход стабилизирующего регулятора $W_{p.c.}$, а основная регулируемая величина y поступает на вход второго (корректирующего) регулятора $W_{p.k.}$; λ – возмущение, действующее на объект и идущее по каналу регулирующего воздействия; s – сигнал задания; ε – ошибка регулирования; $W_{об}(p)$ и $W_{об1}(p)$ – соответственно передаточные функции объекта по каналам λ - y и λ - z ; v – прочие возмущения, действующие на объект регулирования; z – сигнал задания стабилизирующему регулятору.

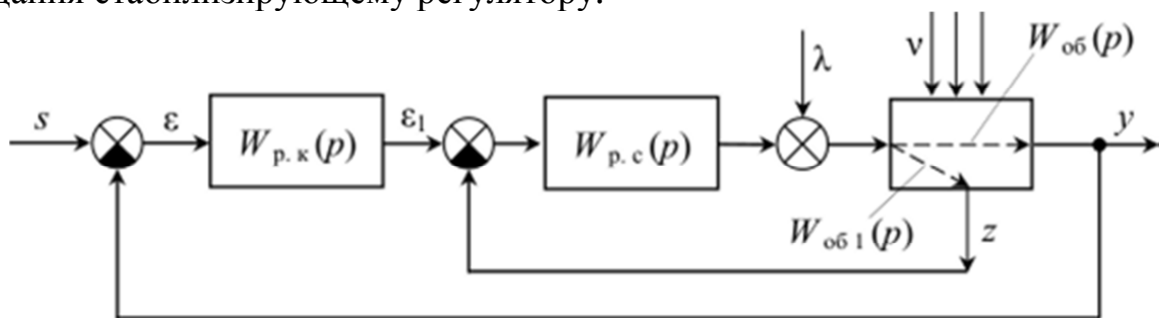


Рисунок 1.4.1. Структурная схема каскадной системы регулирования

Одним из эксплуатационных требований, предъявляемых к каскадной системе регулирования с корректирующим и стабилизирующим регуляторами, является требование сохранения ее работоспособности при отключении корректирующего регулятора. При отключении корректирующего регулятора система регулирования становится одноконтурной (рис. 1.4.2.) и синтез такой системы может быть осуществлен известными параметрическими методами.

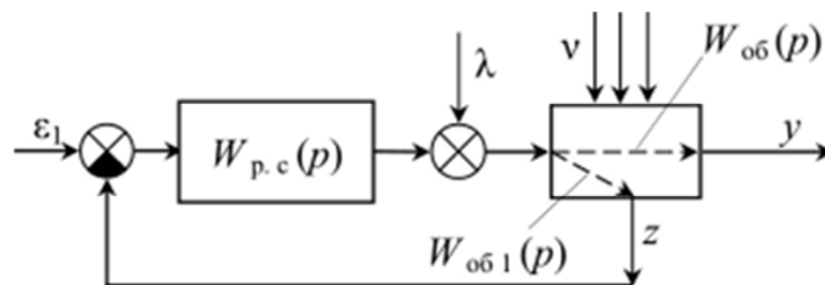


Рисунок 1.4.2. Структурная схема внутреннего контура каскадной системы

При найденном операторе $W_{p.c.}$ внутренний контур системы можно представить в виде эквивалентного объекта регулирования $W_{об. экв}(p)$ для

корректирующего регулятора в одноконтурной системе регулирования (рис. 1.4.3.), где:

$$W_{\text{об. экв}}(p) = \frac{W_{\text{р.с}}(p) \cdot W_{\text{об}}(p)}{1 + W_{\text{р.с}}(p) \cdot W_{\text{обл}}(p)}.$$

Синтез оператора $W_{\text{р.к}}$ в такой одноконтурной системе может быть осуществлен, как уже отмечалось выше, известными методами.

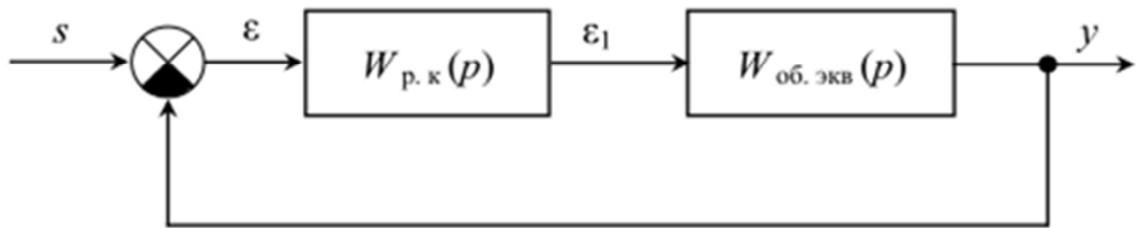


Рисунок 1.4.3. Структурная схема системы регулирования с эквивалентным объектом

Таким образом, синтез каскадной системы регулирования с корректирующим и стабилизирующим регуляторами состоит из двух этапов и каждый из этих этапов заключается в синтезе одноконтурной системы [4].

При наличии в каскадной системе n -го числа контуров (рис. 1.4.4.) метод эквивалентных функций используется следующим образом.

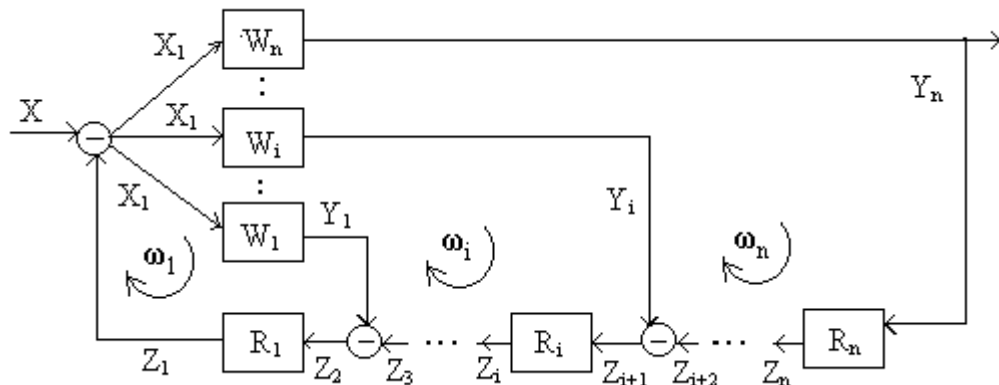


Рисунок 1.4.4. Структурная схема n -контурной САУ (W_1, W_i, W_n – передаточные функции объекта управления по каналам регулирования основной (Y_1) и вспомогательных (Y_i, Y_n) величин; R_1, R_i, R_n – передаточные функции управляющих устройств для поддержания основной и вспомогательных величин на заданном значении; $\omega_1, \omega_i, \omega_n$ – рабочие частоты основного и вспомогательных контуров управления)

Входной сигнал x , поступает на вход передаточных функций многосвязного объекта управления, где преобразовывается в зависимости от порядка объекта. Выходные сигналы y поступают на вход соответствующих управляющих устройств R для выработки сигнала рассогласования с заданием и формирования управляющих воздействий z . При этом

управляющее воздействие последующего управляющего устройства является заданием для предыдущего.

В каскадных системах (рис. 1.4.4.) при регулировании основной технологической величины в объекте с большим запаздыванием используются также вспомогательные величины, реагирующие на изменения основных возмущений объекта и регулирующего воздействия с меньшим запаздыванием. В таких случаях стабилизация вспомогательных величин способствует качественному управлению основной величиной. Каскадная система состоит из нескольких контуров регулирования, каждый из которых регулирует свою технологическую (основную или вспомогательную) величину.

В системах подобного типа качество управления улучшается при уменьшении соотношения времени запаздывания в основном и вспомогательных контурах, т.е. при выполнении условия: $\omega_1 > \omega_i > \omega_n$. Поэтому в начале основной контур регулирования рассматривается как независимый, т.к. инерционность вспомогательных контуров существенно превосходит инерционность основного контура и сигнал z_3 можно принимать постоянным и, следовательно, определять параметры R_1 .

Значения же коэффициентов внешнего вспомогательного регулятора R_n зависят от переменных всех предшествующих контуров – как основного, так и вспомогательных. Поэтому исходную структурную схему (рис. 1.4.4.) сначала необходимо привести к классическому виду одноконтурной САУ (рис. 1.4.3.).

Для этого внешний вспомогательный контур необходимо зрительно отсечь от схемы (рис. 1.4.5.).

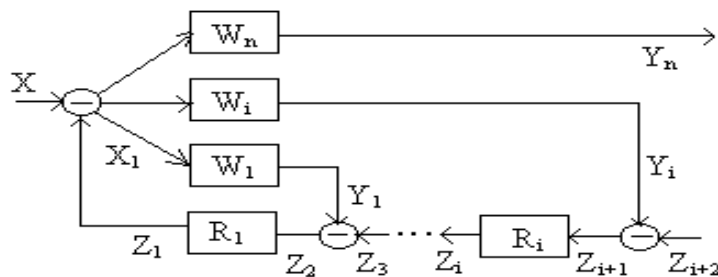


Рисунок 1.4.5. Структурная схема n-контурной САУ без внешнего контура управления

Принимая $x = const$ и следуя от входного сигнала z_{i+2} к выходному – y_n , схема преобразуется к виду на рисунке 1.4.6.

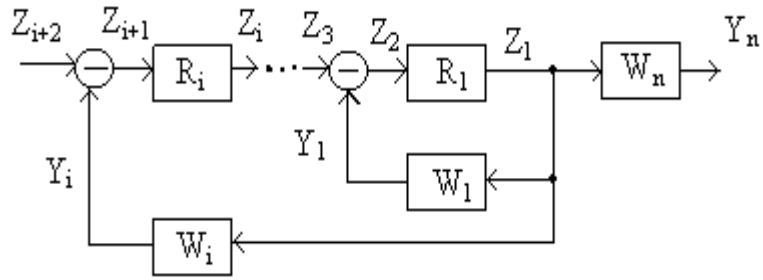


Рисунок 1.4.6. Преобразованная структурная схема n-контурной САУ

Использование методов структурных преобразований позволяет определить передаточную функцию эквивалентного объекта (4.1) для классической одноконтурной системы и рассчитать условия реализации внешнего управляющего устройства:

$$W_{R_n}^{экв} = \frac{W_n \cdot \prod_{i=1}^{n-1} R_i}{1 + W_{n-1} \cdot \prod_{i=1}^{n-1} R_i + W_{n-2} \cdot \prod_{i=1}^{n-2} R_i + K + W_k \cdot \prod_{i=1}^k R_i + K + W_1 \cdot R_1}. \quad (4.1)$$

При этом в выражении (4.1) используются настроечные коэффициенты промежуточных регуляторов R_i , которые предварительно находятся с использованием передаточных функций объектов управления, рассчитанных по формуле (4.2):

$$W_{R_i} = \frac{W_i}{W_{i-1}}. \quad (4.2)$$

Уравнение (4.2) отражает динамические особенности каскадных алгоритмов и соответствует условиям физической реализуемости динамических систем, т.е. предотвращает возникновение звеньев предварения сигналов.

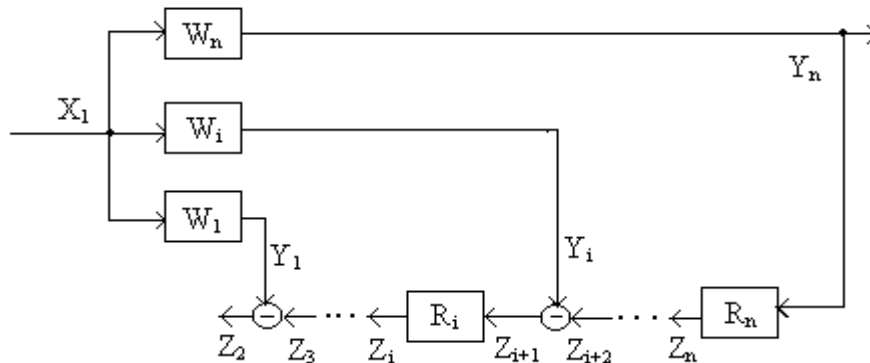


Рисунок 1.4.7. Структурная схема n-контурной САУ без внутреннего контура управления

Для проверки принятых ранее допущений находятся начальные условия функционирования основного регулятора R_1 с учетом влияния всех

вспомогательных контуров. Для этого он зрительно отсекается от исходной схемы (рис. 1.4.7.) и представляется в эквивалентном виде (рис. 1.4.8.).

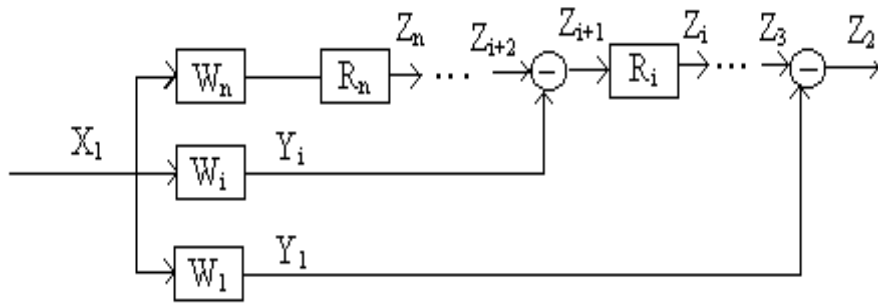


Рисунок 1.4.8. Преобразованная структурная схема n-контурной САУ

Методы структурных преобразований позволяют определить эквивалентную передаточную функцию основного контура (4.3) и использовать ее при расчете параметров основного управляющего устройства с учетом работы всей системы в комплексе:

$$W_{R_1}^{\text{экв}} = W_n \cdot \prod_{i=2}^n R_i - W_{n-1} \cdot \prod_{i=2}^{n-1} R_i - K - W_k \cdot \prod_{i=2}^k R_i - K - W_1. \quad (4.3)$$

Оптимальная работа каскадных алгоритмов управления в основном зависит от численных значений коэффициентов управляющих устройств (R_1, R_i, R_n) в структурной схеме (рис. 1.4.4.) [5].

Порядок выполнения лабораторной работы:

1. Реализовать в программном средстве структурную схему каскадной системы регулирования с заданными параметрами входящих в нее элементов (рис. 1.4.9.):

- 1 – блок формирования входного воздействия (единичный скачек);
- 2 – блок формирования передаточной функции внутреннего контура, которая имеет вид: $W_1(p) = e^{-p\tau_1}$. Величина времени запаздывания τ_1 рассчитывается из соотношения рабочих частот внешнего и внутреннего контуров $\omega_1 \gg \omega_2$, где ω_1 – рабочая частота внутреннего контура каскадной системы, а ω_2 – рабочая частота внешнего контура, которая, в свою очередь, рассчитывается по передаточной функции внешнего контура $W_2(p)$.
- 3 – блок формирования передаточной функции внешнего контура,

которая имеет вид: $W_2(p) = \frac{k}{2Ts^2 + Ts + 1} \cdot e^{-s\tau}$. Числовые значения коэффициентов k, T и τ выбираются согласно варианту из таблицы 4.1;

- 4 – блок формирования передаточной функции регулятора внутреннего контура (пропорциональный закон регулирования, численное значение коэффициента пропорциональности выдается преподавателем);
- 5 – блок формирования передаточной функции регулятора внешнего контура (изменяемая величина и структура входе лабораторной работы);
- 6 – блок для вычисления значений среднеквадратичного показателя качества I_c .

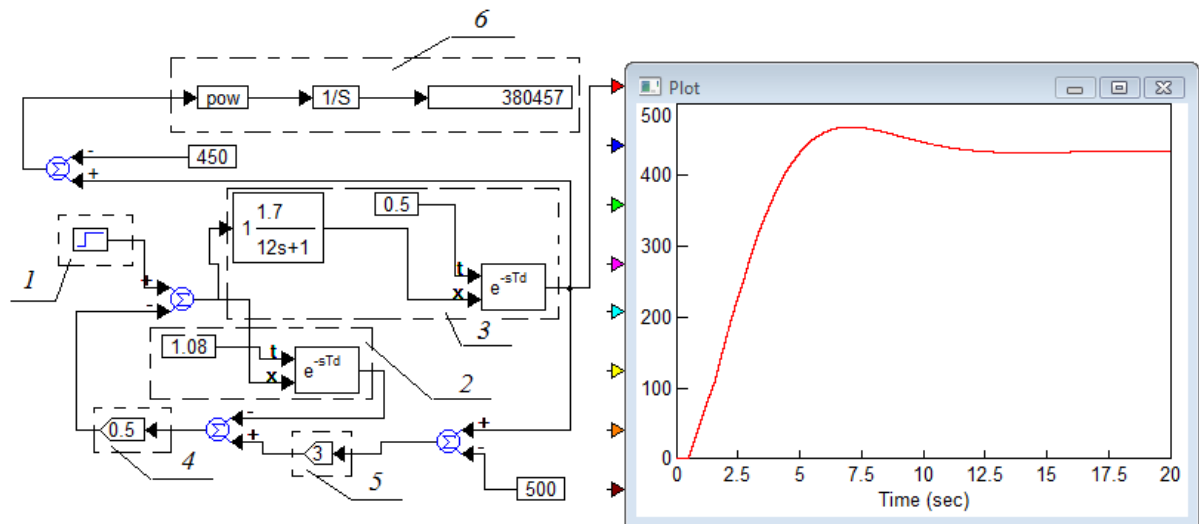


Рисунок 1.4.9. Структурная схема каскадной системы автоматического регулирования

Таблица 4.1

Номер варианта	K , коэффициент усиления	T , постоянная времени	τ , время запаздывания	Номер варианта	K , коэффициент усиления	T , постоянная времени	τ , время запаздывания	Номер варианта	K , коэффициент усиления	T , постоянная времени	τ , время запаздывания
1	3	19	4	13	3,1	24	1,5	25	0,5	21	1,1
2	2	16	3,9	14	2,7	31	2,3	26	2,7	25	1,3
3	1,3	21	2,6	15	1,5	16	0,5	27	3	32	0,2
4	3,2	25	1,7	16	1,8	20	0,8	28	2	15	0,4
5	1,1	31	3,3	17	3	14	2,7	29	1,6	19	2,1
6	2,9	33	4,2	18	4,2	18	3,6	30	3,1	27	2,4
7	4	26	4,5	19	2,9	27	5,1	31	2,3	22	1,7
8	2,5	25	2,9	20	1,2	23	4,6	32	1,2	16	1,6
9	3,3	17	2,7	21	2,2	36	0,3	33	1,3	35	2,5
10	1,4	23	1,8	22	1,3	17	0,7	34	1,8	31	3,1
11	1,7	14	3	23	0,9	11	1,2	35	2,4	21	3,3
12	1,2	20	5,1	24	1,6	34	1,6	36	0,7	13	4

2. Изменяя численное значение коэффициента пропорциональности k_1 в управляющем устройстве внешнего контура R_2 , определить минимум

среднеквадратичного показателя качества. Заполнить таблицу для значений среднеквадратичного показателя качества и построить график зависимости пропорционального коэффициента k_1 от среднеквадратичного показателя качества I_c .

График переходного процесса должен быть **устойчивым**, то есть не иметь расходящихся колебаний.

Заполнить таблицу 4.2 для значений среднеквадратичного показателя качества и построить график зависимости пропорционального коэффициента k_1 от среднеквадратичного показателя качества I_c (в Excel).

Таблица 4.2

k_{1i}												
I_{ci}												

При этом, выполнение лабораторной работы и заполнения таблицы 4.2 ведется до тех пор, пока зависимость I_c от k_1 не будет иметь вид параболы (рис. 1.4.10):

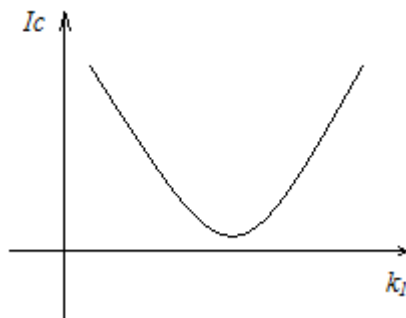


Рисунок 1.4.10. Вид экстремальной зависимости исследуемого параметра от показателя качества

3. Следующий этап лабораторной работы – изменение структуры управляющего устройства (блок 5), который теперь реализует ПИ-закон управления (рис. 1.4.11.):

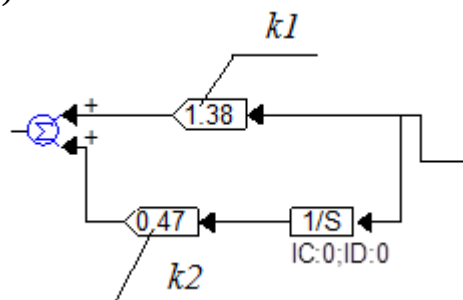


Рисунок 1.4.11. Структурная схема ПИ-регулятора

Численное значение коэффициента k_1 выбирается из п.2 данной лабораторной работы, которое соответствует минимуму I_c . Значение коэффициента k_2 меняется, пока не будет найден новый минимум I_c . Используемые значения коэффициента и среднеквадратичного критерия качества заносятся в таблицу 4.3, по данным которой строится график

зависимости интегрального коэффициента k_2 от среднеквадратичного показателя качества I_c (в Exel).

Таблица 4.3

k_{2i}												
I_{ci}												

4. Вновь меняется структура управляющего устройства (блок 5) и реализуется ПИД-закон управления (рис. 1.4..12.):

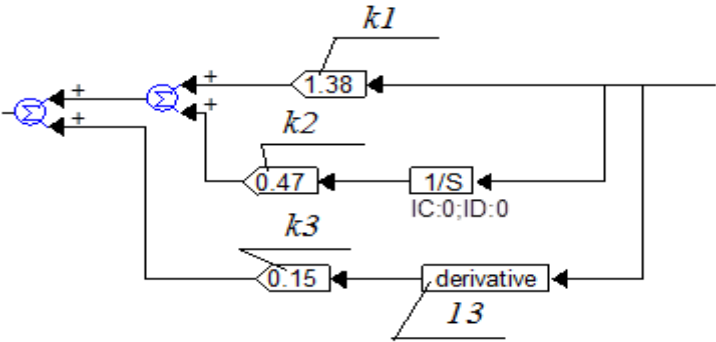


Рисунок 1.4.12. Структурная схема ПИД-регулятора

Коэффициенты k_1 и k_2 выбираются из п.2, 3 данной лабораторной работы, которые соответствуют минимуму I_c . Значение коэффициента k_3 меняется, пока не будет найден новый минимум I_c . Используемые значения коэффициента и среднеквадратичного критерия качества заносятся в таблицу 4.4, по данным которой строится график зависимости дифференциального коэффициента k_3 от среднеквадратичного показателя качества I_c (в Exel).

Таблица 4.4

k_{3i}												
I_{ci}												

Протокол лабораторной работы должен содержать:

- шапку протокола;
- цель работы;
- передаточные функции W_1 , W_2 , набранные в редакторе формул с численными значениями коэффициентов;
- структурную схему каскадной системы регулирования с параметрами коэффициента пропорциональности k_1 , численное значение которого соответствует минимуму среднеквадратичного критерия качества;
- таблицу экспериментальных данных и график зависимости k_1 от I_c ;
- структурную схему каскадной системы регулирования с параметрами коэффициента пропорциональности k_2 , численное значение которого соответствует минимуму среднеквадратичного критерия качества;
- таблицу экспериментальных данных и график зависимости k_2 от I_c .

- структурную схему каскадной системы регулирования с параметрами коэффициента пропорциональности k_3 , численное значение которого соответствует минимуму среднеквадратичного критерия качества;
- таблицу экспериментальных данных и график зависимости k_3 от I_c .
- выводы об эффективности той или иной системы автоматического управления (эффективность соответствует наименьшему численному значению критерия качества).

Контрольные вопросы

1. Какими методами может быть достигнуто повышение точности систем автоматического управления?
2. Что такое «эквивалентная передаточная функция»?
3. Дайте название контуров многоконтурной каскадной системы автоматического управления.
4. Какое правило для соотношения рабочих частот контуров каскадной системы должно выполняться для ее работоспособности?
5. Приведите методику расчета настроечных коэффициентов регуляторов каскадной системы.
6. Нарисуйте структурную схему для расчета эквивалентной передаточной функции внешнего контура.
7. Нарисуйте структурную схему для расчета эквивалентной передаточной функции внутреннего контура.
8. Каскадная система с каким регулятором внешнего контура наиболее эффективна в Вашей работе?

Лабораторная работа: «Исследование качества переходных процессов систем автоматического управления с компенсацией возмущения и отклонения»

Цель работы: Изучение поведения замкнутой системы регулирования с компенсацией по возмущению и по отклонению при изменении структуры управляющего устройства.

Задачи:

1. Реализовать в программном средстве VisSim структурную схему системы регулирования с компенсацией по возмущению с заданными параметрами входящих в нее элементов согласно выданному варианту.
2. Изменяя численное значение коэффициента пропорциональности k_1 в управляющем устройстве (блок 6), определить, при каком численном значении k_1 система соответствует минимуму среднеквадратичного критерия качества I_c , а следовательно, наиболее эффективной работе системы.
3. Изменяя структуру управляющего устройства (ПИ- и ПИД-закон управления), определить, при каком численном значении настроечного коэффициента (k_2 и k_3) система соответствует минимуму среднеквадратичного критерия качества I_c , а следовательно, наиболее эффективной работе системы.
4. Реализовать в программном средстве VisSim структурную схему системы регулирования с компенсацией по отклонению с заданными параметрами входящих в нее элементов согласно выданному варианту.
5. Выполнить пункты 2, 3 для новой системы управления с компенсацией отклонения.
6. Сделать выводы по результатам работы.
7. Оформить протокол лабораторной работы.
8. Отчитать лабораторную работу.

Теоретический материал. Одним из наиболее эффективных средств повышения точности работы САУ является компенсация возмущений, основанная на применении способов теории инвариантности. Системы, в которых достигнута компенсация возмущений, называются инвариантными. САУ инвариантна по отношению к возмущающему воздействию, если после завершения переходного процесса регулируемая (или управляемая) величина и ошибка системы не зависят от его возмущения $\lambda(t)$ (рис. 1.5.1.). САУ может быть инвариантной и по отношению к входному задающему воздействию $s(t)$, если после завершения переходного процесса ошибка системы не будет зависеть от этого воздействия. Таким образом, в инвариантных системах устраняется установившаяся составляющая ошибки.

Основной способ построения инвариантных систем состоит в применении комбинированного управления, когда наряду с управлением по отклонению производится управление по возмущению. При

комбинированном управлении осуществляется регулирование по замкнутому и разомкнутому циклам [6].

Системы с компенсацией возмущений применяют для управления объектами, подверженными действию существенных внешних возмущений в случае, когда эти возмущения можно измерить. Структурная схема непрерывной системы с компенсацией возмущений имеет вид (рис. 1.5.1.).

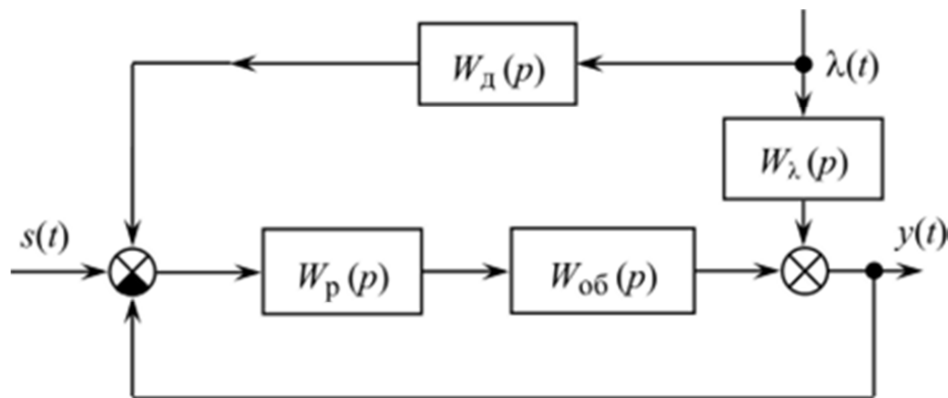


Рисунок 1.5.1. Структурная схема системы с компенсацией возмущений

При реализации системы с компенсацией возмущений стремятся максимально ослабить воздействие контролируемого возмущения на регулируемую величину $y(t)$ с помощью компенсирующего устройства, оставляя на долю регулятора $W_p(p)$ обработку величины задания $s(t)$, не полностью скомпенсированного возмущения $\lambda(t)$, а также тех возмущений, действующих на объект, которые измерить не удастся. Свойства объекта регулирования определяются: $W_{об}(p)$ – передаточной функцией объекта по каналу регулирующего воздействия; $W_{\lambda}(p)$ – передаточной функцией объекта по каналу возмущающего воздействия $\lambda - y$.

Учитывая, что канал компенсации не образует замкнутого контура и, следовательно, не влияет на устойчивость системы, порядок расчета системы с компенсацией возмущений можно разделить на два этапа:

- 1) обычным образом осуществляют расчет параметров настройки (или синтез) регулятора в системе без учета компенсирующего устройства и возмущения λ ;
- 2) определяют передаточную функцию и параметры идеального компенсирующего устройства:

$$W_{д}^{ид}(P) = \frac{W_{\lambda}(P)}{W_p(P) \cdot W_{об}(P)}.$$

Если полученное идеальное устройство компенсации физически реализуемо и может быть использовано в системе регулирования, то на этом расчет устройства компенсации заканчивается. В противном случае выполняется синтез физически реализуемого устройства компенсации или определение параметров настройки при известной его передаточной функции. Рассмотрим этот последний вариант.

Практически оптимальную частотную характеристику компенсирующего устройства обычно требуется выбрать в виде дробно-рациональной функции относительно невысокого порядка. В практических приложениях часто компенсирующее устройство представляется реальным дифференцирующим звеном. При этом ставится задача выбора параметров компенсирующего устройства из условия максимального сближения частотных характеристик идеального компенсирующего устройства и дифференциатора $W_d(i\omega)$ в диапазоне частот $0 - \omega_{\max}$, соответствующем частотному спектру возмущения λ (рис. 1.5.2.).

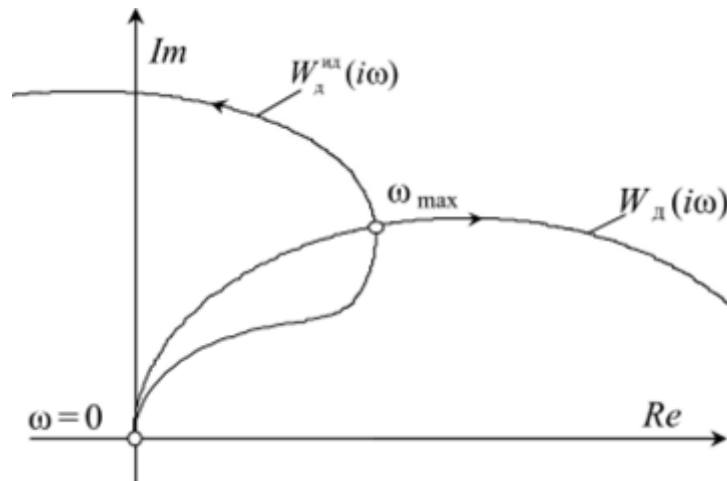


Рисунок 1.5.2. АФХ компенсирующих устройств

Наиболее просто расчет настройки компенсирующего устройства, выполненного в виде реального дифференцирующего звена, осуществляется при условии:

$$W_d(i\omega_{\max}) = W_d^{\text{ид}}(i\omega_{\max}).$$

Расчет настроек дифференциатора для частоты $\omega = \omega_j$ производится по формулам:

$$K_d = \frac{A_d^{\text{ид}}(\omega_j)}{\cos \varphi_d^{\text{ид}}(\omega_j)}; \quad T_d = \frac{1}{\omega_j} \cdot \text{ctg} \varphi_d^{\text{ид}}(\omega_j),$$

где $A_d^{\text{ид}}(\omega_j)$ и $\varphi_d^{\text{ид}}(\omega_j)$ – модуль и фаза вектора $W_d^{\text{ид}}(\omega_j)$ соответственно.

Вышеприведенные формулы справедливы в случае, когда ЛФЧХ дифференциатора полностью компенсирует АФХ $W_d^{\text{ид}}(\omega_j)$ на заданной частоте ω_j .

Если вычисленное значение K_d больше предельно возможного, то принимают $K_d = K_d^{\text{пр}}$, а T_d определяется по формуле:

$$T_d = \frac{1}{\omega_j} \cdot \text{ctg} \varphi_d(\omega_j),$$

Структурная схема модели цифровой системы регулирования с компенсацией возмущений, построенная как аналог непрерывной системы с компенсацией возмущений, представлена на рисунке 1.5.3.

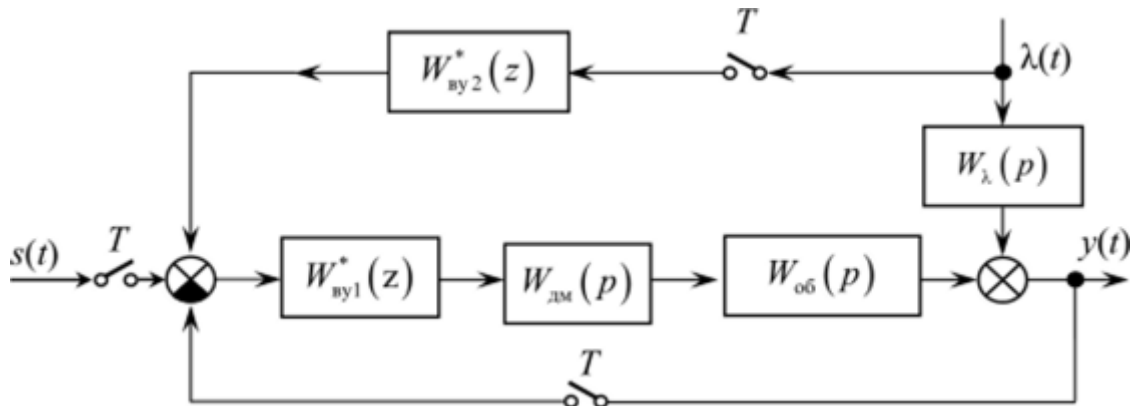


Рисунок 1.5.3. Структурная схема модели цифровой системы с компенсацией возмущений

В этой схеме с помощью вычислительного устройства $W^*_{vy2}(z)$ формируется алгоритм функционирования цифрового устройства компенсации, а с помощью вычислительного устройства $W^*_{vy1}(z)$ формируется алгоритм функционирования цифрового регулятора, реализующего аналог непрерывного устройства с передаточной функцией $W_{\lambda}(p)$ [4].

Порядок выполнения лабораторной работы:

1. Реализовать в программном средстве структурную схему системы регулирования с компенсацией по возмущению с заданными параметрами, входящих в нее элементов (рис. 1.5.4.).

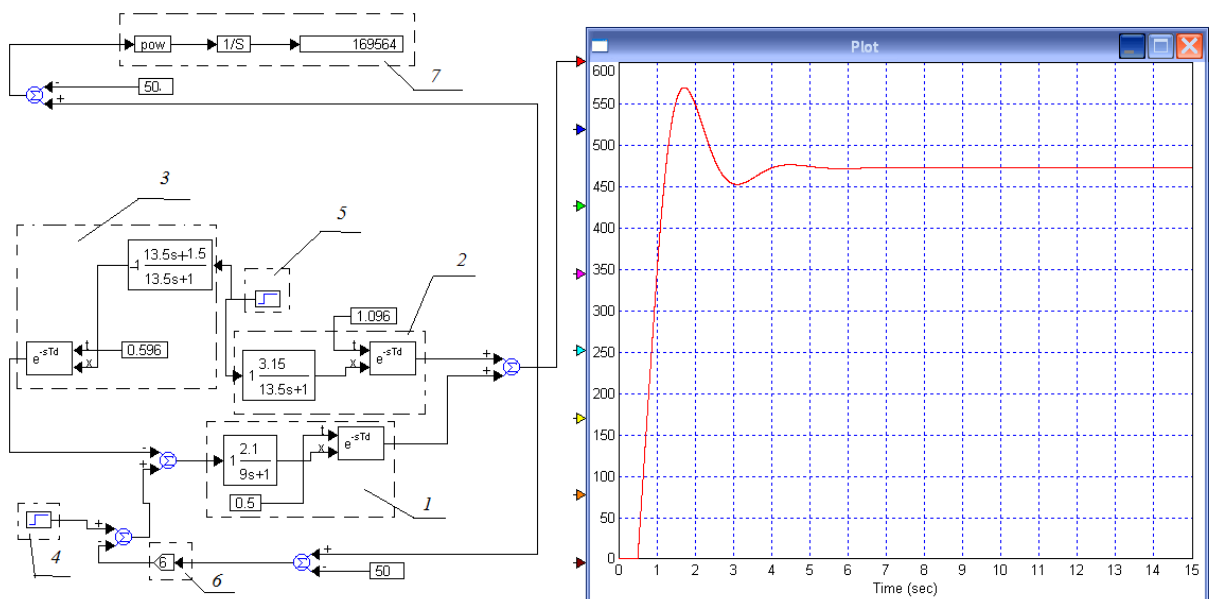


Рисунок 1.5.4. Структурная схема системы компенсации возмущения

Где: 1 – передаточная функция объекта управления по основному контуру

регулирования $W_o = \frac{k_o}{T_o s + 1} \cdot e^{-s\tau_o}$, параметры которой выбираются из

таблицы 5.1 согласно варианту;

2 – передаточная функция объекта управления по каналу возмущения

$W_b = \frac{k_g}{T_g s + 1} \cdot e^{-s\tau_g}$, параметры которой выбираются из таблицы 5.2

согласно варианту;

3 – W_k , передаточная функция динамического компенсатора, рассчитанная по формуле: $W_k = -\frac{W_g}{W_o}$;

4 – входное воздействие, равное по амплитуде 1;

5 – величина возмущения, равного по амплитуде номеру варианта;

6 – передаточная функция управляющего устройства (k_1 – переменный параметр);

7 – блок для вычисления значений среднеквадратичного показателя качества I_c .

Таблица 5.1

Номер варианта	К, коэффициент усиления	Т, постоянная времени	τ, время запаздывания	Номер варианта	К, коэффициент усиления	Т, постоянная времени	τ, время запаздывания	Номер варианта	К, коэффициент усиления	Т, постоянная времени	τ, время запаздывания
1	3	19	4	13	3,1	24	1,5	25	0,5	21	1,1
2	2	16	3,9	14	2,7	31	2,3	26	2,7	25	1,3
3	1,3	21	2,6	15	1,5	16	0,5	27	3	32	0,2
4	3,2	25	1,7	16	1,8	20	0,8	28	2	15	0,4
5	1,1	31	3,3	17	3	14	2,7	29	1,6	19	2,1
6	2,9	33	4,2	18	4,2	18	3,6	30	3,1	27	2,4
7	4	26	4,5	19	2,9	27	5,1	31	2,3	22	1,7
8	2,5	25	2,9	20	1,2	23	4,6	32	1,2	16	1,6
9	3,3	17	2,7	21	2,2	36	0,3	33	1,3	35	2,5
10	1,4	23	1,8	22	1,3	17	0,7	34	1,8	31	3,1
11	1,7	14	3	23	0,9	11	1,2	35	2,4	21	3,3
12	1,2	20	5,1	24	1,6	34	1,6	36	0,7	13	4

Таблица 5.2

Номер варианта	$k_{\text{в}}$, коэффициент усиления	$T_{\text{в}}$, постоянная времени	$\tau_{\text{в}}$, время запаздывания	Номер варианта	$k_{\text{в}}$, коэффициент усиления	$T_{\text{в}}$, постоянная времени	$\tau_{\text{в}}$, время запаздывания	Номер варианта	$k_{\text{в}}$, коэффициент усиления	$T_{\text{в}}$, постоянная времени	$\tau_{\text{в}}$, время запаздывания
1	2	23	2	13	2,1	11	2,1	25	0,3	34	4,1
2	5	19	3	14	2	21	2,2	26	0,4	30	3,4
3	4	14	1,6	15	2,9	41	0,9	27	0,1	31	2,4
4	1,2	21	4	16	1,1	31	0,3	28	2,8	26	2,1
5	3,7	16	5	17	1,9	20	0,4	29	0,9	12	3,6
6	4,2	26	3,5	18	2,2	24	0,5	30	3,7	16	4
7	0,9	31	4,2	19	3,4	25	2,1	31	1,8	17	3
8	0,7	18	0,8	20	3	15	3,6	32	0,8	26	5,1
9	1,8	15	1,9	21	4	12	2,9	33	0,4	28	4,8
10	5,3	27	2,5	22	2,5	19	1,9	34	2,6	14	3,8
11	2,2	33	3,7	23	4,1	32	2,4	35	3	17	4,2
12	3,9	12	0,9	24	3,3	22	1,3	36	5	22	4,4

2. Изменяя численное значение коэффициента пропорциональности k_1 в управляющем устройстве (блок 6), определить при каком численном значении k_1 система соответствует минимуму среднеквадратичного критерия качества I_c , а следовательно, наиболее эффективной работе системы.

График переходного процесса должен быть **устойчивым**, то есть не иметь расходящихся колебаний.

Заполнить таблицу 5.3 для значений среднеквадратичного показателя качества и построить график зависимости пропорционального коэффициента k_1 от среднеквадратичного показателя качества I_c (в Excel).

Таблица 5.3

k_{1i}												
I_{ci}												

При этом выполнение лабораторной работы и заполнения таблицы 5.3 ведется до тех пор, пока зависимость I_c от k_1 не будет иметь вид параболы (рис. 1.4.10.).

3. Следующий этап лабораторной работы – изменение структуры управляющего устройства (блок 6), который теперь реализует ПИ-закон управления (рис. 1.4.11.).

Численное значение коэффициента k_1 выбирается из п.2 данной лабораторной работы, которое соответствует минимуму I_c . Значение коэффициента k_2 меняется, пока не будет найден новый минимум I_c . Используемые значения коэффициента и среднеквадратичного критерия качества заносятся в таблицу 5.4, по данным которой строится график зависимости интегрального коэффициента k_2 от среднеквадратичного показателя качества I_c (в Excel).

Таблица 5.4

k_{2i}												
I_{ci}												

4. Вновь меняется структура управляющего устройства (блок 6) и реализуется ПИД-закон управления (рис. 1.4.12.).

Коэффициенты k_1 и k_2 выбираются из п.2, 3 данной лабораторной работы, которые соответствуют минимуму I_c . Значение коэффициента k_3 меняется, пока не будет найден новый минимум I_c . Используемые значения коэффициента и среднеквадратичного критерия качества заносятся в таблицу 5.5, по данным которой строится график зависимости дифференциального коэффициента k_3 от среднеквадратичного показателя качества I_c (в Excel).

Таблица 5.5

k_{3i}												
I_{ci}												

5. Реализовать в программном средстве структурную схему системы регулирования с компенсацией по отклонению с заданными параметрами входящих в нее элементов (рис. 1.5.5.).

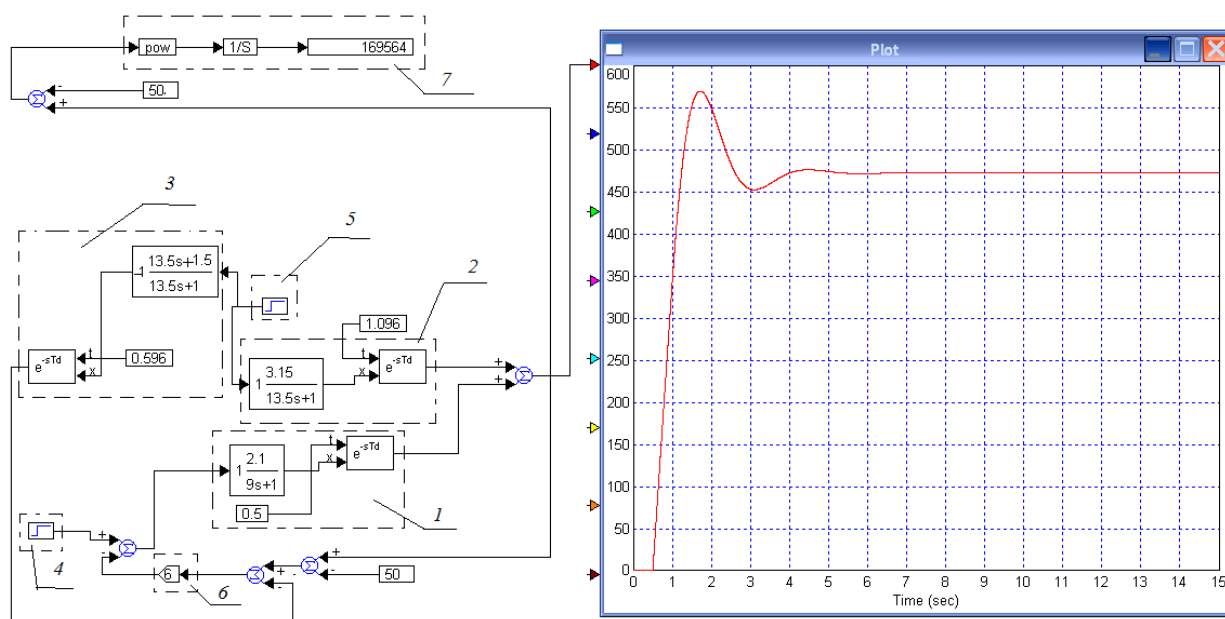


Рисунок 1.5.5. Структурная схема системы компенсации отклонения

Где: 3 – W_k , передаточная функция динамического компенсатора, рассчитанная по формуле: $W_k = -\frac{W_e}{W_o \cdot R}$.

6. Изменяя численное значение коэффициента пропорциональности k_1 в управляющем устройстве (блок 6), определить при каком численном значении k_1 система соответствует минимуму среднеквадратичного критерия качества I_c , а следовательно, наиболее эффективной работе системы.

При этом **не забываем** пересчитывать численные значения знаменателя в передаточной функции динамического компенсатора W_k .

График переходного процесса должен быть **устойчивым**, то есть не иметь расходящихся колебаний.

Заполнить таблицу 5.6 для значений среднеквадратичного показателя качества и построить график зависимости пропорционального коэффициента k_1 от среднеквадратичного показателя качества I_c (в Excel).

Таблица 5.6

k_{1i}												
I_{ci}												

При этом выполнение лабораторной работы и заполнения таблицы 5.6 ведется до тех пор, пока зависимость I_c от k_1 не будет иметь вид параболы.

7. Следующий этап лабораторной работы – изменение структуры управляющего устройства (блок 6), который теперь реализует ПИ-закон управления.

В блоке 3 рассчитывается новая формула W_k с учетом новой передаточной функции управляющего устройства и **при изменении численных значений коэффициента k_2 знаменатель функции W_k тоже меняется.**

Численное значение коэффициента k_1 выбирается из п.2 данной лабораторной работы, которое соответствует минимуму I_c . Значение коэффициента k_2 меняется, пока не будет найден новый минимум I_c . Используемые значения коэффициента и среднеквадратичного критерия качества заносятся в таблицу 5.7, по данным которой строится график зависимости интегрального коэффициента k_2 от среднеквадратичного показателя качества I_c (в Excel).

Таблица 5.7

k_{2i}												
I_{ci}												

8. Вновь меняется структура управляющего устройства (блок 6) и реализуется ПИД-закон управления.

В блоке 3 рассчитывается новая формула W_k с учетом новой передаточной функции управляющего устройства и **при изменении численных значений коэффициента k_3 знаменатель функции W_k тоже меняется.**

Коэффициенты k_1 и k_2 выбираются из п.2, 3 данной лабораторной работы, которые соответствуют минимуму I_c . Значение коэффициента k_3 меняется, пока не будет найден новый минимум I_c . Используемые значения коэффициента и среднеквадратичного критерия качества заносятся в таблицу 5.8, по данным которой строится график зависимости дифференциального коэффициента k_3 от среднеквадратичного показателя качества I_c (в Excel).

Таблица 5.8

k_{3i}												
I_{ci}												

Протокол выполненной лабораторной работы должен содержать:

- шапку протокола;
- цель работы;
- передаточные функции W_o, W_b, W_k , набранные в редакторе формул с численными значениями коэффициентов;
- структурные схемы систем регулирования по возмущению и по отклонению с параметрами коэффициента пропорциональности k_1 , численное значение которого соответствует минимуму среднеквадратичного критерия качества;
- таблицу экспериментальных данных и график зависимости k_1 от I_c (как для системы управления с компенсацией возмущения, так и для системы управления с компенсацией отклонения);
- структурные схемы систем регулирования по возмущению и по отклонению с параметрами коэффициента k_2 , численное значение которого соответствует минимуму среднеквадратичного критерия качества;
- таблицу экспериментальных данных и график зависимости k_2 от I_c (как для системы управления с компенсацией возмущения, так и для системы управления с компенсацией отклонения);
- структурные схемы систем регулирования по возмущению и по отклонению с параметрами коэффициента k_3 , численное значение которого соответствует минимуму среднеквадратичного критерия качества;
- таблицу экспериментальных данных и график зависимости k_3 от I_c (как для системы управления с компенсацией возмущения, так и для системы управления с компенсацией отклонения);
- выводы об эффективности той или иной системы автоматического управления (эффективность соответствует наименьшему значению критерия качества).

Контрольные вопросы

1. Какие системы с компенсацией Вы знаете?
2. Какой принцип лежит в основе расчета параметров систем управления с компенсацией? В чем он заключается?
3. Нарисуйте структурную схему системы с компенсацией возмущения.
4. Выведите передаточную функцию динамического компенсатора возмущения.
5. Нарисуйте структурную схему системы с компенсацией отклонения.
6. Выведите передаточную функцию динамического компенсатора отклонения.
7. В каких случаях оправдано использование в управлении систем с компенсацией?

МОДУЛЬ 2

Программные продукты для
выполнения лабораторных
работ

Пакет программ VisSim

Моделирование технических объектов и систем проводится для того, чтобы определить свойства и характеристики проектируемых систем еще до их изготовления и при необходимости скорректировать, уточнить их структуру и параметры. Это позволяет получить проект работоспособной системы, которую не придется существенно дорабатывать тогда, когда она будет изготовлена. Таким образом, моделирование сокращает и удешевляет процесс проектирования и реализации систем и объектов.

Кроме того, на модели системы можно проверить ее поведение в таких условиях и режимах, для которых система не предназначена, с тем, чтобы знать, как она себя поведет и к каким последствиям это приведет. Очевидно, что такие эксперименты на реальной системе могут быть не только дороги, но и небезопасны, в то время как моделирование позволяет получить нужную информацию о процессе или системе без лишних затрат и, главное, без негативных последствий.

Программа VisSim предназначена для построения, исследования и оптимизации виртуальных моделей физических и технических объектов, в том числе и систем управления. VisSim – это аббревиатура выражения VisualSimulator – визуальная, воспринимаемая зрением, среда и средство моделирования.

Программа VisSim разработана и развивается компанией VisualSolutions (USA). Эта программа – мощное, удобное в использовании, компактное и эффективное средство моделирования физических и технических объектов, систем и их элементов.

При описании и последующем построении модели в среде VisSim нет необходимости записывать и решать дифференциальные уравнения, программа это сделает сама по предложенной ей исследователем структуре системы и параметрам ее элементов. Результаты решения выводятся в наглядной графической форме. Специалисты, владеющие программированием, могут создавать собственные блоки, дополняя ими библиотеку стандартных блоков VisSim.

Для использования в учебных целях компанией VisualSolutionInc бесплатно распространяется студенческая версия программы VisSim. Данная версия является полнофункциональной, но в ней отсутствуют файлы помощи и примеры.

Программа VisSim предоставляет исследователю графический интерфейс, позволяющий основную часть работы по созданию модели выполнить с помощью мыши, а параметры элементов ввести с клавиатуры. Интерфейс VisSim состоит из главного окна, имеющего меню и ряд кнопок управления, воспринимающих щелчки кнопок мыши, и т.н. рабочего пространства, в котором строится и корректируется модель, наблюдаются результаты ее работы (рис. 2.1.1).

С точки зрения исследователя интерфейс программы VisSim представляет собой интерактивный виртуальный лабораторный стенд, обеспечивающий построение моделей из отдельных блоков, запуск процесса моделирования, управление им и контроль результатов. Главное окно VisSim, с примером простой диаграммы представлено на рисунке 2.1.1.

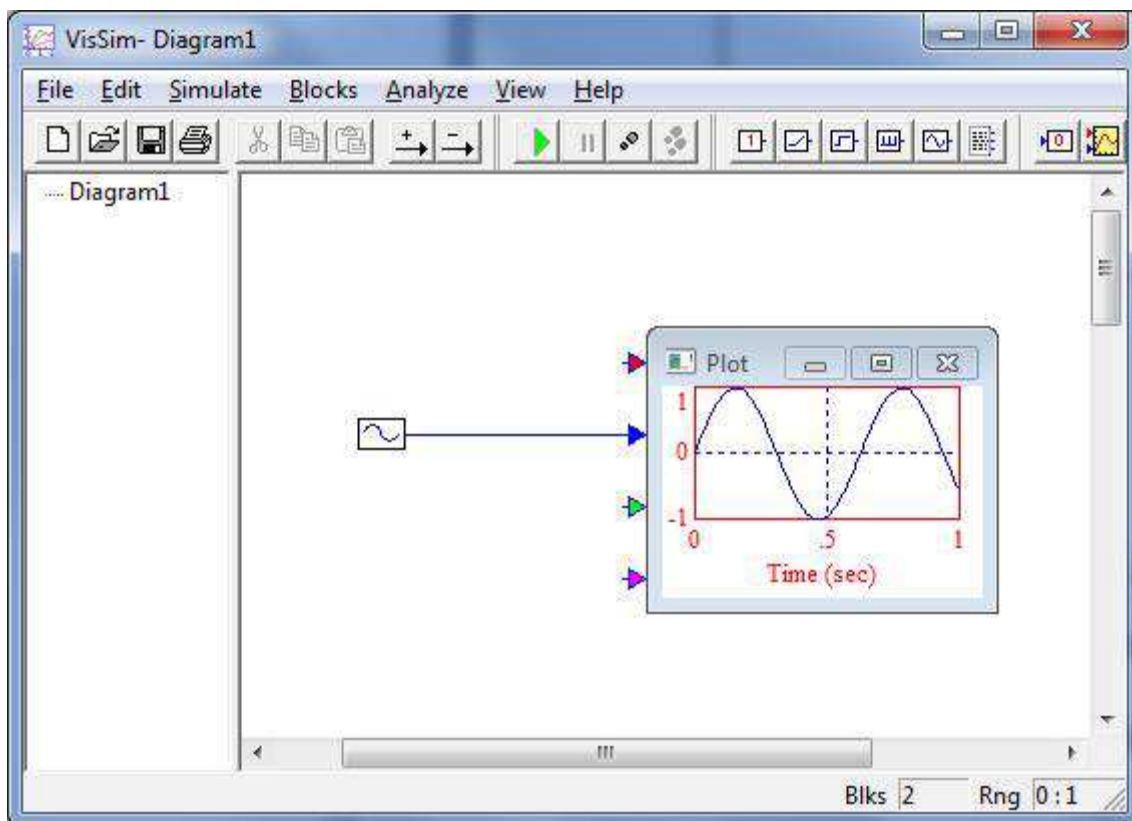


Рисунок 2.1.1. Главное окно VisSim

При запуске процесса моделирования (щелчком по кнопке «Пуск» – «Go») на осциллографе изображается сигнал, вырабатываемый генератором, в данном случае – синусоида. Амплитуду, частоту и начальную фазу сигнала генератора исследователь может менять, и при новом запуске моделирования эти изменения будут приводить к соответствующему изменению графика на экране осциллографа.

Диаграммой в VisSim называется совокупность связанных, а также автономных блоков и надписей, помещенных на рабочее пространство и способных функционировать при запуске процесса моделирования. Диаграмма может быть сохранена в виде отдельного файла и, при необходимости, открыта вновь.

Модель VisSim – это часть диаграммы, содержащая виртуальный аналог реальной или проектируемой системы. Диаграмма может содержать несколько моделей.

Исходными данными для построения модели в VisSim являются структурно-функциональная схема моделируемой системы, процесса или объекта и описывающие их дифференциально-алгебраические уравнения.

Вместо таких уравнений могут быть заданы операторы или функции, характеризующие отдельные элементы моделируемой системы, например, передаточные функции для линейных элементов и статические характеристики для нелинейных элементов.

Реальные системы и объекты состоят из отдельных, связанных и взаимодействующих друг с другом элементов. И для всей системы в целом, и для отдельных ее, должным образом выбранных элементов, можно указать место приложения воздействия, которое можно назвать входом, и место их реакции (отклика) на входное воздействие, называемое выходом. И воздействие, и реакция – это некоторые физические величины, являющиеся функциями времени.

Модели систем и объектов в программе VisSim строятся из отдельных элементов – блоков. Блок – это виртуальный аналог физического элемента реальной системы. Термин «аналог» предполагает, что блок функционирует, он подчиняется тем же самым уравнениям, что и реальный, моделируемый элемент системы.

Виртуальные блоки VisSim могут иметь или вход, на который может быть подан выходной сигнал другого блока, или выход, виртуальный сигнал с которого может быть подан на вход другого блока. Наконец, блоки могут иметь и вход, и выход одновременно. Взаимодействие между блоками отображается т.н. линиями связи, указывающими направление передачи воздействий (сигналов) от одного блока к другому.

Взаимодействие между блоками моделируется сигналами – функциями времени, передаваемыми между блоками по линиям связи. Сигналы в модели могут быть измерены с помощью виртуальных измерительных устройств или рассмотрены и изучены с помощью виртуального осциллографа.

Внешне виртуальные блоки VisSim с некоторой степенью условности воспринимаются исследователем так же, как реальные устройства. Например, генераторы вырабатывают сигналы, блоки-преобразователи реагируют на входные сигналы в определенном смысле точно так же, как реальные устройства на реальные воздействия, индикаторы показывают величины сигналов.

Таким образом, принцип построения модели в VisSim состоит в вынесении на рабочее пространство моделей реальных элементов (блоков) и соединении их в соответствии с заранее составленной структурно-алгоритмической схемой моделируемой системы. Такое построение модели из виртуальных блоков очень похоже, с известной степенью условности, на построение реальной системы из настоящих блоков (генераторов, осциллографов, и других устройств) в производственных условиях или на лабораторном стенде.

Блоки VisSim можно условно разделить на три основных категории и одну дополнительную:

- блоки, имеющие только выход: генераторы.
- блоки, имеющие вход и выход: преобразователи.

- блоки, имеющие только вход: индикаторы.
- блоки без входов и выходов: надписи, комментарии и др.

Важным компонентом модели является *соединительная линия* – виртуальный аналог физического соединения элементов, передающего сигналы от одного элемента к другому. Соединительные линии в VisSim однонаправленные, передают сигналы с выхода одного блока к входу другого.

Генераторы – это блоки, имеющие только выход.

Генераторы вырабатывают изменяющиеся во времени или постоянные сигналы.

Примерами таких блоков в VisSim являются блоки:

- *step* (ступенька) – генератор ступенчатой функции;
- *ramp* (спуск, подъем) – генератор линейно растущего сигнала;
- *sinusoid* – генератор синусоидального сигнала;
- *const* – генератор постоянного сигнала, величина которого не меняется в процессе работы модели;
- *slider* (скользящий контакт, ползунок) – генератор постоянного сигнала, величину которого можно менять в процессе работы модели.

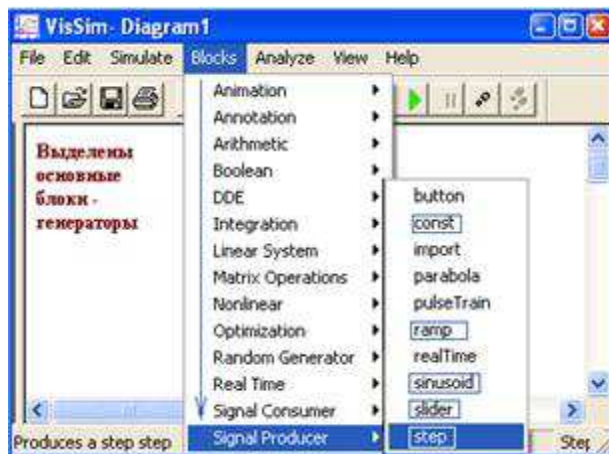


Рисунок 2.1.2. Важные блоки-генераторы программы VisSim

Для помещения блока на рабочее пространство следует щелкнуть по пункту меню *Blocks*, перейти на пункт *SignalProducer*, затем щелкнуть по названию требуемого генератора, перевести курсор в нужное место рабочего пространства и щелкнуть левой кнопкой мыши.

Преобразователи – это блоки, имеющие входы и выходы.

Блоки-преобразователи способны воспринимать воздействия от других блоков, преобразовывать их в соответствии с определенными уравнениями или правилами и выдавать преобразованный сигнал (отклик, реакцию блока) на выход.

Важнейшие блоки для моделирования линейных систем:

- блок *transferFunction* – передаточная функция. Этот блок позволяет создавать модели как простых, так и очень сложных элементов линейных систем и систем в целом;
- *integrator* – блок интегратора, осуществляющий интегрирование входного сигнала по времени;
- *summingJunction* – сумматор двух и более сигналов, его выходной сигнал равен алгебраической сумме входных;
- *gain* – усилитель.

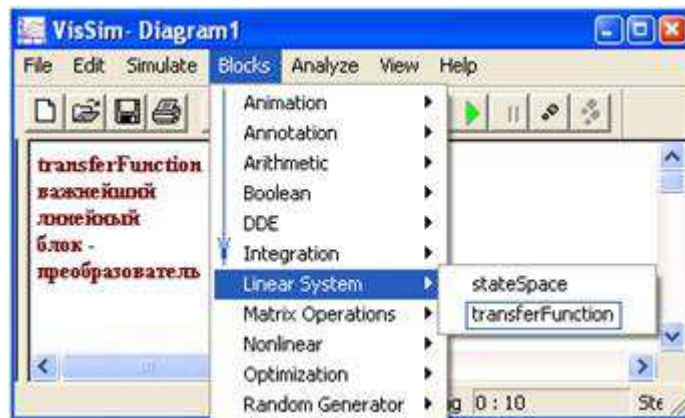


Рисунок 2.1.3. Меню для вызова блока передаточная функция (transferFunction)

Сумматор и усилитель вызываются путем выбора: *Blocks* → *Arithmetic* → *summingJunction* (сумматор) или *gain* (усилитель).

Блок *transferFunction* является важнейшим при моделировании САУ. Рассмотрим задание параметров данного блока. После размещения на диаграмме блок *transferFunction* выглядит следующим образом:

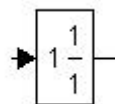


Рисунок 2.1.4. Вид блока transferFunction до задания параметров

Открытие окна свойств данного блока осуществляется двойным нажатием левой клавиши мыши (рис. 2.1.5.).

Задание свойств блока передаточной функции осуществляется следующим образом. Допустим, задана передаточная функция в виде:

$$W(p) = K \frac{b_0 p^m + b_1 p^{m-1} + \dots + b_m}{a_0 p^n + a_1 p^{n-1} + \dots + a_n}.$$

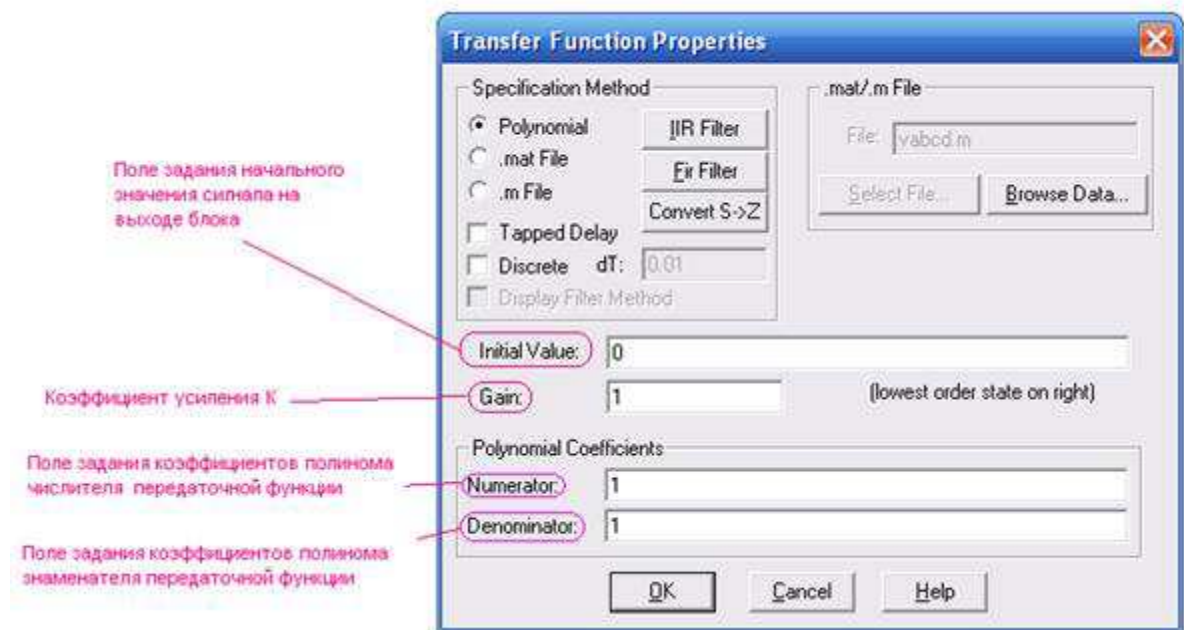


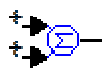
Рисунок 2.1.5. Свойства блока transferFunction

Для задания ее в VisSim необходимо соблюдать следующие правила:

1. В поле Gain (коэффициент усиления системы) вводится значение коэффициента усиления K .
2. В поле Numerator вводятся через пробел коэффициенты полинома числителя передаточной функции в направлении убывания степени p .
3. В поле Denominator вводятся через пробел коэффициенты полинома знаменателя передаточной функции в направлении убывания степени p .
4. Поле InitialValue заполняется в случае, если заданы ненулевые начальные условия. В нашем случае начальные условия не заданы, поэтому оставляем значение по умолчанию равное 0.

Примечание: В VisSim с помощью блока *transferFunction* можно промоделировать только передаточные функции, представляющие правильную дробь, т.е. дробь, в которой степень полинома числителя меньше или равна степени полинома знаменателя ($m \leq n$). При попытке задать передаточную функцию, где $m > n$, программа выдаст ошибку.

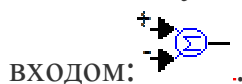
Блок *summingJunction* предназначен для задания в модели элемента «сумматор», выполняющего функции суммирования или вычитания сигналов на его входах. После размещения на диаграмме блок имеет вид:



При моделировании САУ зачастую необходимо изменить знак на одном или нескольких входах сумматора и добавить или удалить количество входов.

Замена знака на сумматоре производится следующим образом. Наводится курсор мыши на вход сумматора, знак которого нужно изменить, удерживается клавиша Ctrl и производится щелчок левой клавишей мыши по

соответствующему входу. Пример сумматора со вторым инвертирующим



Если необходимо добавить или удалить входы, следует нажать на соответствующие кнопки на панели инструментов (рис. 2.1.6.).

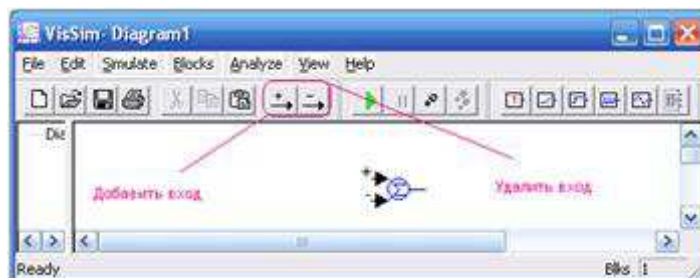
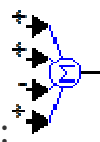


Рисунок 2.1.6. Добавление и удаление входов

Пример сумматора с четырьмя входами:



Блок *Gain* имеет один параметр – коэффициент усиления  (рис. 2.1.7).



Рисунок 2.1.7. Пример задания параметра блока Gain

Индикаторы – это блоки, имеющие только вход.

Индикаторы программы VisSim предназначены для отображения сигналов в форме удобной и привычной для исследователя.

Важнейшими индикаторами являются блоки:

- осциллограф – plot;
- цифровой индикатор – display.

Блоки индикации вызываются путем выбора пунктов меню *Blocks* → *Signal Consumer* → *plot* (display).

Виртуальный осциллограф (*plot*) VisSim представляет собой окно, похожее на экран осциллографа, в котором изображается зависимость наблюдаемых сигналов от времени (рис. 2.1.8). На боковой стороне осциллографа помещены условные изображения входов, к которым могут быть подключены выходы других блоков диаграммы для наблюдения

поведения их сигналов в зависимости от времени. В VisSim 3.0 на одном блоке *plot* можно наблюдать от 1 до 4 сигналов, изменяющихся во времени.

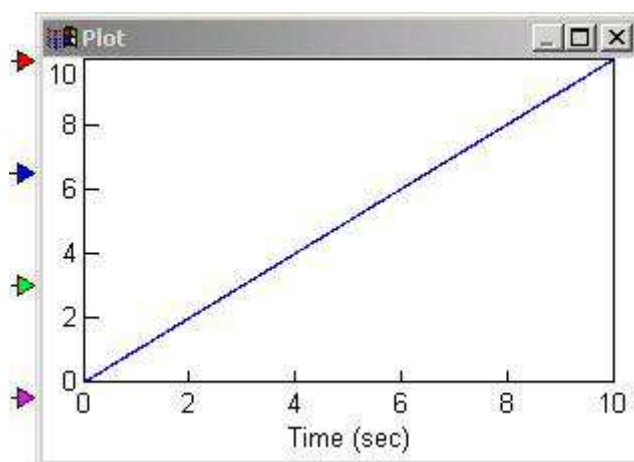


Рисунок 2.1.8. Виртуальный осциллограф (plot)

Цифровой индикатор *display* VisSim показывает в цифровом виде значение сигнала на выходе того блока, к которому он подключен. Этот прибор используется для измерения постоянных величин.

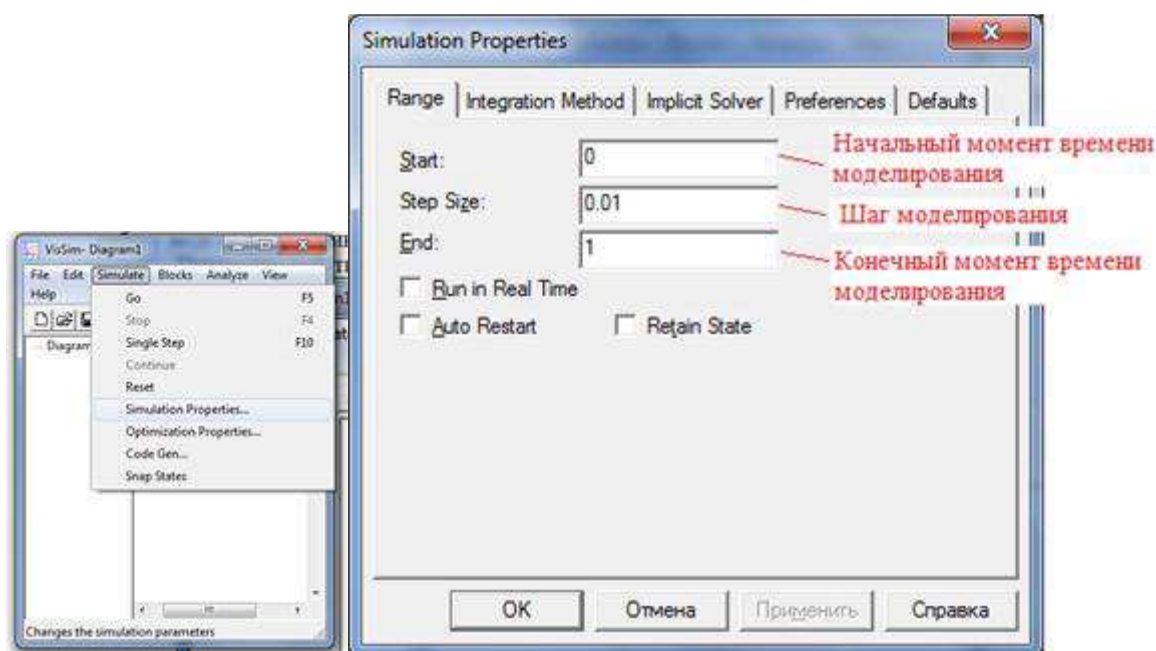


Рисунок 2.1.9. Настройка параметров работы модели

Построенную модель следует запустить в работу, щелкнув по кнопке «Пуск». В результате работы модели выходные сигналы блоков начнут изменяться, их величины просматривают на виртуальном осциллографе и других индикаторах. Параметры некоторых сигналов и блоков исследователь может изменять в процессе работы модели, другие параметры можно изменить, остановив процесс работы модели. Продолжительность работы

модели можно задавать до ее запуска, можно и прерывать работу модели по желанию исследователя.

Параметры работы модели задаются в меню *Simulate* → *SimulationProperties*.

После того как модель построена, когда на рабочее пространство вынесены и соединены в нужном порядке блоки, составляющие систему, генераторы сигналов и индикаторы, а также введены параметры элементов модели, может быть запущен процесс ее функционирования (кнопка «Пуск»).

Получив эту команду, программа начинает анализировать то, как соединены блоки, на основе этого анализа составляет дифференциально-алгебраические уравнения, описывающие модель, и решает их. Полученные результаты, как функции модельного времени, периодически и очень часто, придаются значениям входных и выходных сигналов блоков. Дифференциально-алгебраические уравнения математически описывают т.н. динамические объекты, объекты очень широкого класса, обладающие инерционностью и рядом других свойств. И поскольку программа VisSim способна решать такие уравнения, то в ней можно моделировать системы и объекты очень широкого диапазона сложности.

Решение уравнений проводится по шагам – дается малое приращение времени, вычисляются, с учетом начальных условий, значения сигналов на выходах и входах всех блоков, затем вновь дается малое приращение времени, проводятся вычисления и т.д. Малая величина шага интегрирования позволяет исследователю воспринимать сигналы как непрерывные. Выходные сигналы любого блока при желании можно наблюдать на экране виртуального осциллографа или измерять виртуальным цифровым индикатором. В результате решения можно получить зависимости выходных сигналов от времени. Таким образом, работа по моделированию систем в программе VisSim для исследователя похожа на работу на реальном стенде.

Кроме того, программа позволяет более глубоко проанализировать полученные результаты и оптимизировать модель. Например, VisSim предоставляет возможность быстрого построения частотных характеристик фрагментов модели и всей системы [7].

Программа SimInTech

Программа SimInTech («Simulationintechnik») – российская система модельно-ориентированного проектирования систем автоматического управления.

Программа предназначена для исследования нестационарных процессов в различных объектах управления. Разработка математических моделей и алгоритмов управления происходит в виде структурного проектирования логико-динамических систем, описываемых с помощью отношений «вход-выход», в виде систем обыкновенных дифференциальных уравнений и/или дифференциально-алгебраических уравнений.

По своим возможностям SimInTech является отечественной альтернативой таким программным продуктам, как SimuLink (MathWorks), VisSim (VisualSolution), LabView (NationalInstruments) и т.д. Преимуществами SimInTech является то, что полноценная учебная версия распространяется бесплатно и полностью русифицирована, имеет открытый интерфейс для интеграции с различным ПО, присутствуют инструменты создания интерфейсов управления, имеется возможность моделирования в режиме «реального времени». При этом программа обладает высокой гибкостью и скоростью решения сложных математических задач, обширной справочной системой поддержки.

Запуск среды SimInTech осуществляется одним из следующих способов:

- с помощью ярлыка на рабочем столе или на панели быстрого запуска;
- с помощью стартового меню «Пуск» (WindowsXP/7/10);
- с помощью ярлыка на экране приложений (Windows8/8.1).

После запуска приложения на экране появится *главное окно SimInTech* (рис. 2.2.1).

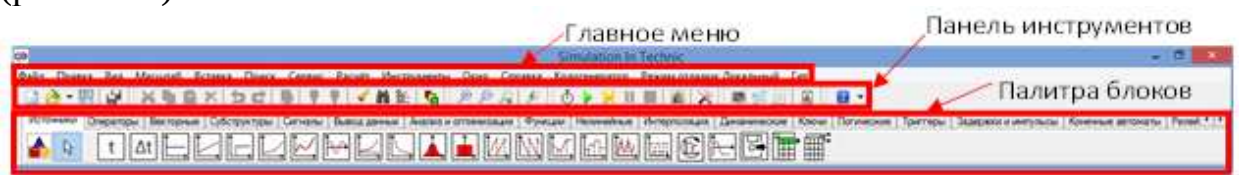


Рисунок 2.2.1. Главное окно SimInTech.

Главное меню главного окна (*Файл, Правка, Вид* и т.д.) отвечает за настройку программы, позволяет редактировать, управлять созданием и расчетом собранных схем, содержит инструменты работы с базой данных.

Панель инструментов главного окна (*Новый проект, Открыть, Сохранить проект* и т.д.) содержит набор кнопок, отвечающих за наиболее часто используемые команды. Часть кнопок дублирует команды Главного меню и предназначена для ускорения работы с программой.

Палитра блоков главного окна (*Источники, Операторы* и т.д.) содержит набор библиотек блоков для создания расчетных схем и моделей.

«Линейка» типовых блоков состоит из отдельных каталогов, сгруппированных по функциональному признаку. Переключение между ними осуществляется 1-кратным щелчком левой клавиши мыши в поле «закладки» с соответствующим названием. К основным библиотекам относятся:

- Источники входных воздействий;
- Операторы математические;
- Векторные операторы;
- Субструктуры;
- Сигналы;
- Вывод данных;
- Анализ и оптимизация;
- Функции математические;
- Нелинейные;
- Динамические;
- Ключи;
- Логические;
- Дискретные.

Создание и изменение структурной схемы производится при помощи *Схемного окна*. Редактор структурных схем способен загружать несколько независимых проектов. Каждый проект располагается на своем отдельном схемном окне. Для того чтобы создать расчетную схему необходимо (рис. 2.2.2):

- либо выбрать с помощью Главного меню Главного окна: «*Файл*→*Новый проект*→*Схема модели общего вида*»;
- либо воспользоваться кнопкой *Новый проект* на панели инструментов главного окна.

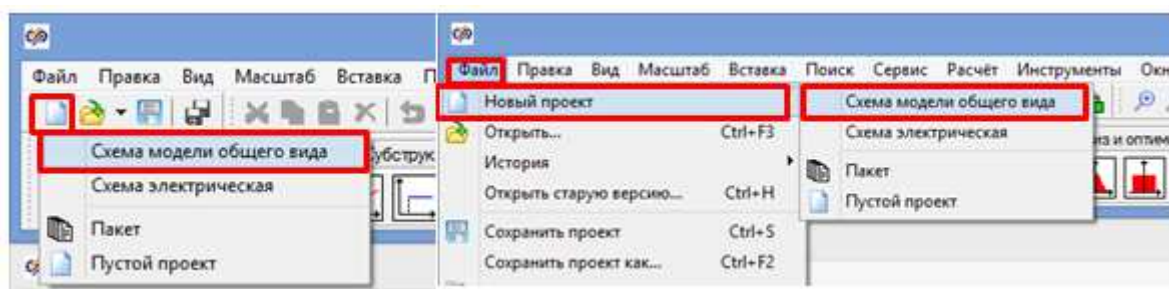


Рисунок 2.2.2. Способы создания нового проекта

После выполнения одного из вышеупомянутых способов на экране появится новое схемное окно (рис. 2.2.3).

Меню окна проекта отвечает за основные функции работы со схемой, за настройку визуального отображения схемы.

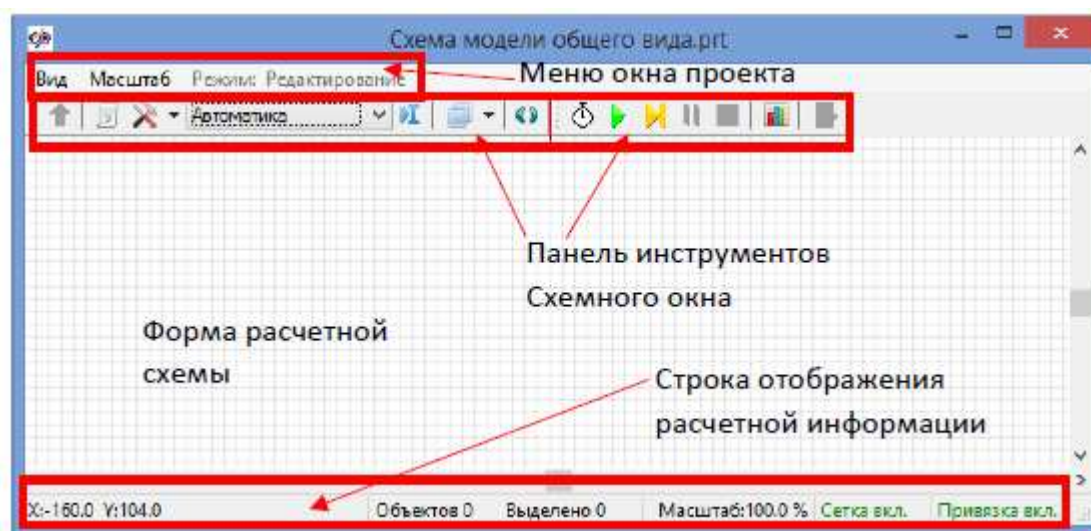


Рисунок 2.2.3. Схемное окно проекта

Панель инструментов схемного окна содержит следующие основные объекты:

- *скрипт* – кнопка доступа к редактору скрипта;
- *параметры расчета* – кнопка доступа к окну изменения расчетных параметров схемы;
- *инициализация* – инициализирует расчетную схему, но не запускает ее расчет;
- *пуск* – инициализирует расчетную схему и сразу запускает ее расчет;
- *сделать шаг* – задача делает один шаг с величиной, заданной пользователем в расчетных параметрах схемы;
- *пауза* – приостанавливает расчет;
- *стоп* – останавливает расчет;
- *менеджер данных* – доступ к окну редактора базы сигналов проекта.

Структурная схема SimInTech строится из блоков, линий связи, являющихся активными элементами схемы, и декоративных элементов (комментариев, рисунков, подписей), не участвующих в расчёте.

Блок – базовый элемент проекта (функциональной диаграммы, расчетной схемы). Основными атрибутами блока являются его графический образ, свойства (задаются пользователем), параметры (вычисляются блоком), математическая модель, входные и выходные порты. В математическом аспекте блоки представляют собой операторы преобразования входных сигналов блока в его выходные сигналы.

Портом называется объект на изображении блока, от которого можно вести линию связи или к которому можно подсоединить линию связи. Порты и линии связи могут быть различных типов. Тип линии связи определяется соответствующим идентификатором и может быть изменён. Линию связи можно подсоединить к порту, только если у них совпадает тип.

Свойство блока – задаваемая пользователем характеристика (константа или переменная величина определённого типа данных) для работы блока.

Параметр блока – формируемая (вычисляемая) блоком переменная, характеризующая работу блока.

Линия связи – служебный блок в виде полилинии, второй базовый элемент расчетной схемы, соединяющий выходной порт одного блока и входной порт другого блока. В общем случае линия связи может соединять множество входных портов с одним выходным портом. В математическом аспекте линии связи являются шинами данных (сигналов) и осуществляют направленную передачу данных от выходов блока ко входам других блоков.

Совокупность блоков и соединяющих их порты линий связи образует *алгоритм управления* в схеме автоматики.

Субмодель (макроблок) – блок, математическая модель которого задана в виде структурной схемы, расположенной «внутри» субмодели. Макроблоки позволяют реализовать принцип вложенности структурных схем, являются одним из механизмов создания и сохранения в библиотеке новых типов блоков. Математическая модель макроблока может быть сохранена в отдельном файле (в отдельном проекте) для многократного использования в других проектах.

Проект SimInTech – файл, содержащий структурную схему, предназначенную для расчета тем или иным математическим решателем или расчетным кодом и созданную в окне графического редактора SimInTech, сохраненный в виде бинарного и/или текстового файла с уникальным именем и расширением «prt» (для бинарного) и «xprt» (для текстового) файла.

Схема автоматики – проект SimInTech, содержащий набор взаимосвязанных алгоритмов управления отдельной подсистемой объекта управления. Может также содержать математические модели объектов управления, реализованные в виде схем типа «вход-выход» или набранные на встроенном языке программирования.

Язык программирования SimInTech – специализированный язык программирования высокого уровня, предназначенный для создания программ, описывающих функционирования типового блока «Язык программирования»; задания глобальных констант и переменных проекта; создания типовых подпрограмм и программ, которые могут производить по мере расчета манипуляции с объектами схемы. Основной отличительной особенностью языка программирования SimInTech является то, что текст программы предназначен для исполнения на каждом расчетном шаге при моделировании схемы.

При создании расчетной схемы целесообразно придерживаться следующей последовательности (рекомендуется выполнять процедуру сохранения на жесткий диск после каждого из нижеперечисленных этапов).

Этап 1. Наполнение Схемного окна блоками

Для размещения того или иного блока нужно перейти на соответствующую вкладку Палитры блоков, 1-кратным щелчком левой

кнопкой мыши выбрать интересующий блок (фон станет подсвечен). Далее переместить курсор на Форму расчетной схемы, вид курсора изменится – появится изображение блока и крестообразный указатель места установки блока. Выбираем место установки и 1-кратным щелчком левой кнопки мыши устанавливаем блок на форме.

На рисунке 2.2.4 приведен пример размещения на Схемном окне типовых блоков Ступенька (вкладка Источники), Инерционное звено 1-го порядка (вкладка Динамические), Временной график (вкладка Вывод данных).

Чтобы *переместить* блок на схеме для наиболее удобного расположения, необходимо нажать левую кнопку мыши на изображении блока и, не отрывая пальца от кнопки, перетащить блок в нужную точку. После отпускания кнопки мыши блок расположится в том месте, где был курсор.

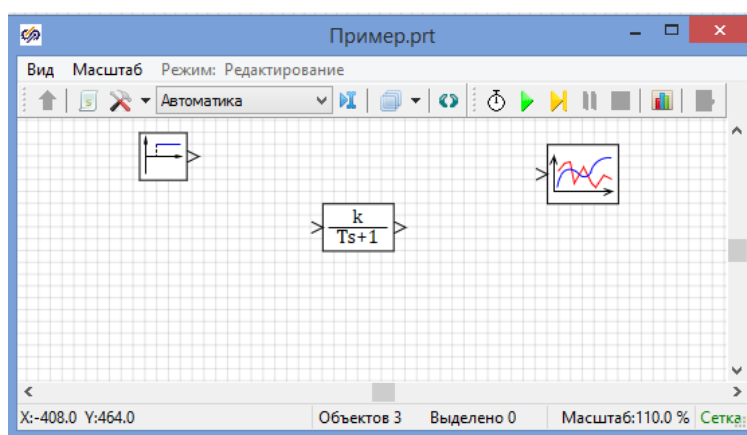
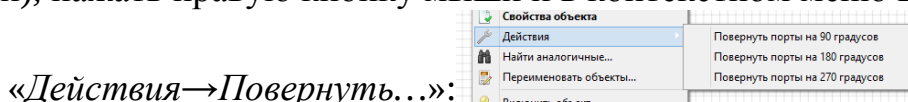


Рисунок 2.2.4. Пример размещения блоков на схемном окне

Выделение блоков производится следующим образом. Мысленно нужно представить себе прямоугольник на экране, который бы окружал (или хотя бы задевал) только те блоки, которые следует выделить. Далее необходимо нажать левую кнопку мыши в левом верхнем углу этого прямоугольника и, не отпуская ее, начертить этот прямоугольник, проводя мышью с нажатой кнопкой в противоположный, правый нижний, угол. Как только кнопка мыши будет отпущена, блоки окажутся выделенными. Далее с группой блоков можно оперировать как с единым блоком. Например, ее можно перемещать, удалять, копировать и объединять.

Если требуется *развернуть блок* (блоки), необходимо выделить блок (блоки), нажать правую кнопку мыши и в контекстном меню выбрать



«Действия→Повернуть...»:

Для *удаления* блоков следует сначала выделить, как описано выше, блок (или блоки) и нажать на клавишу «Delete» клавиатуры.

Если на схеме будут находиться несколько групп блоков, похожих по структуре и (или) составу (повторяющиеся элементы схемы), то значительно

упростить процесс ее создания поможет *копирование* блоков. Для копирования необходимо выделить копируемую группу блоков и выбрать команду главного меню «*Правка→Копировать*». Группа блоков скопируется в буфер Windows. Далее выбрать команду «*Правка→Вставить*» и мышью указать место, куда будет помещена скопированная группа. Щелчок мыши располагает группу на схеме.

Этап 2. Ввод свойств блоков

Двигаясь в схемном окне по направлению «слева-направо» и «сверху-вниз», необходимо задать свойства блоков (коэффициенты усиления, постоянные времени, начальные условия и т.д.).

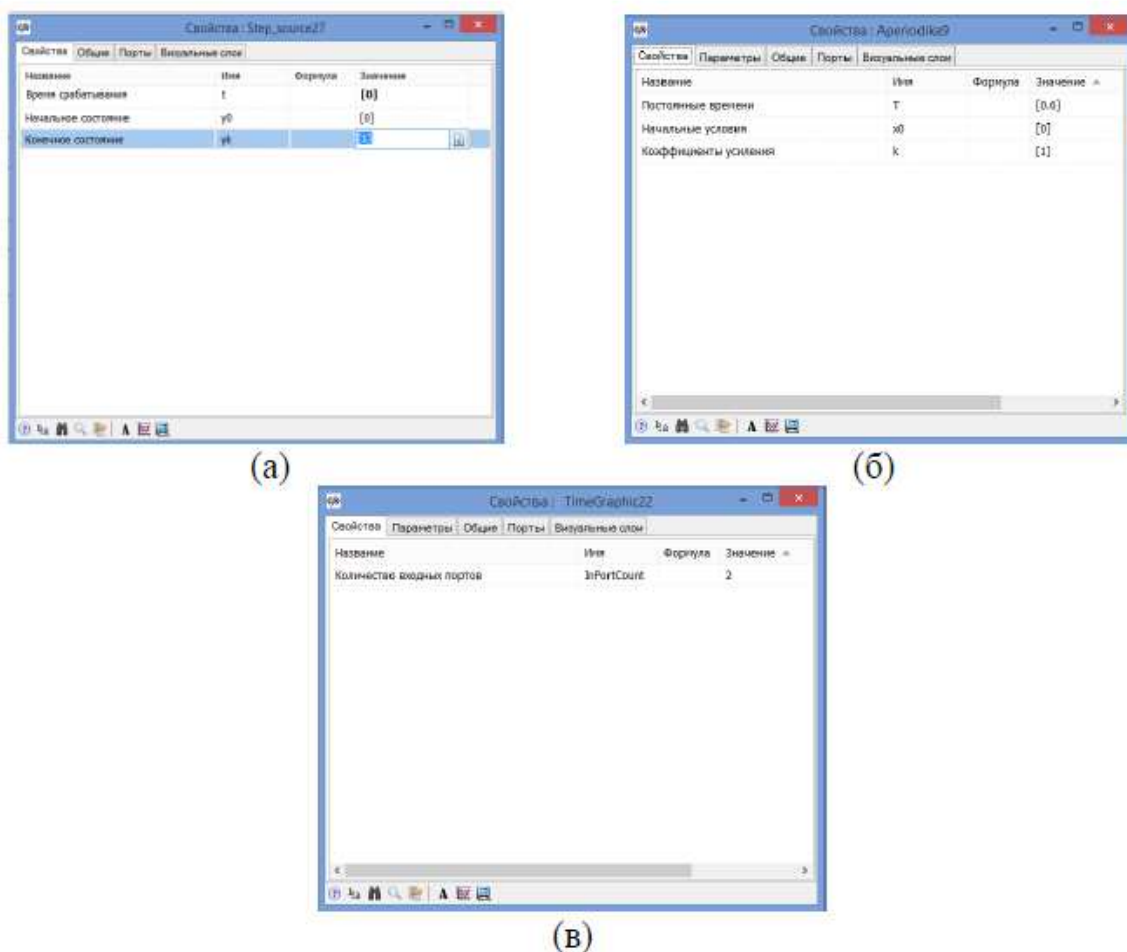
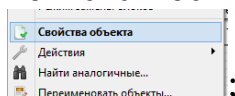


Рисунок 2.2.5. Окно свойств блока, на примере блоков Ступенька (а), Инерционное звено 1-гопорядка (б), Временной график (в)

Вызвать окно редактора свойств можно одним из следующих способов:

1. Выделив блок 1-кратным кликом правой кнопки мыши, вызвать контекстное меню, в котором выбрать пункт *Свойства объекта*



2. Выделив блок, нажать на панели кнопок кнопку *Свойства*

3. Выделив блок щелчком мыши на схеме, а затем произвести по нему двойной щелчок левой кнопкой мыши.

В окне свойств блока наиболее часто используемыми вкладками являются:

- Свойства – расчетные свойства блока, непосредственно влияющие на его исполнение;
- Общие – базовые свойства блока, такие как имя, тип, координаты расположения на листе, видимость и другие;
- Порты – список и редактор параметров входных/выходных портов блока.

На рисунке 2.2.5 приведен пример задания свойств блоков Ступенька, Инерционное звено 1-го порядка, Временной график.

Этап 3. Соединение блоков линиями связи

Создание линий связи производится левой кнопкой мыши. Чтобы соединить два расположенных на схеме блока, необходимо подвести курсор к выходному порту одного блока, сделать 1-кратный щелчок левой кнопкой мыши и, отпустив кнопку (курсор превратится в стрелку вида $\uparrow$), протянуть линию связи к входному порту другого блока. Как только курсор достигнет входа, нужно снова сделать 1-кратный щелчок левой кнопкой мыши, после чего на входе появится типичная входная стрелка. Если сделать щелчок левой клавишей раньше, чем проводимая связь войдет «в притяжение» входного порта, необходимо дотянуть линию связи до соответствующего входного порта и сделать щелчок левой кнопкой мыши.

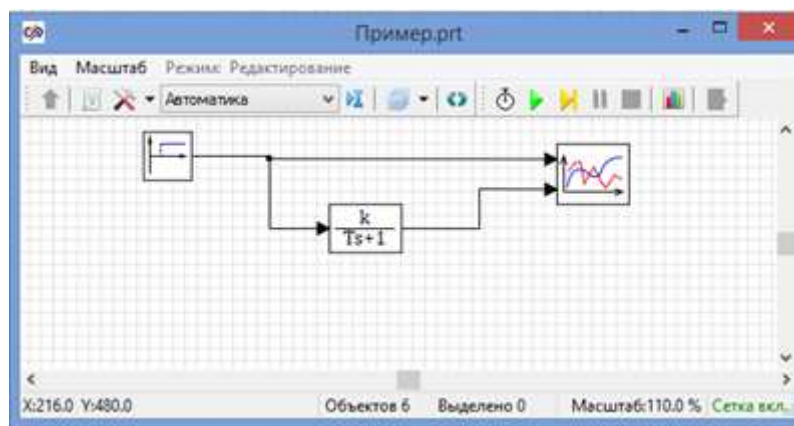


Рисунок 2.2.6. Пример подключения линий связи структурной схемы

Если требуется сделать поворот на 90 градусов в линии связи, при «протаскивании» необходимо выполнить щелчок левой кнопкой мыши и продолжать проведение линии связи в новом направлении. Если нужно прервать процедуру проведения линии связи, нажмите правой кнопкой мыши в пустое место схемного окна: линия оборвется (завершится её создание).

Чтобы сделать «ответвление» от линии связи, необходимо навести курсор на линию, нажать на правую кнопку мыши и в появившемся меню выбрать пункт «Действия → Добавить ветвь», появится новая точка на линии и возможность провести ответвление от данной точки.

Для удаления линий связи необходимо навести курсор на линию, нажать левую кнопку мыши (выделить линию) и нажать «Delete».

На рисунке 2.2.6 показано, как выходной порт ступеньки соединен с 1-ым входным портом временного графика и одновременно через механизм «ответвления» с входным портом инерционного звена 1-го порядка, выходной порт которого соединен в свою очередь со 2-ым входным портом временного графика.

Этап 4. Оформление поясняющих подписей

Для оформления схемного окна используются подписи. Для добавления подписи к блоку, переместите курсор под блок, найдите положение курсора, при котором он изменит свою форму на стрелку со знаком вопроса и сделайте 2-х кратный щелчок левой кнопкой мыши. Должно появиться временное окно для ввода текста. Переместите курсор в это окно, сделайте щелчок левой кнопкой мыши, после чего введите нужный заголовок (для переноса текста на следующую строку используйте сочетание ctrl+enter). Далее переместите курсор на свободное место в Схемном Окне и сделайте 1-кратный щелчок левой кнопкой мыши, временное окно закроется и под блоком появится желаемая подпись (рис. 2.2.7).

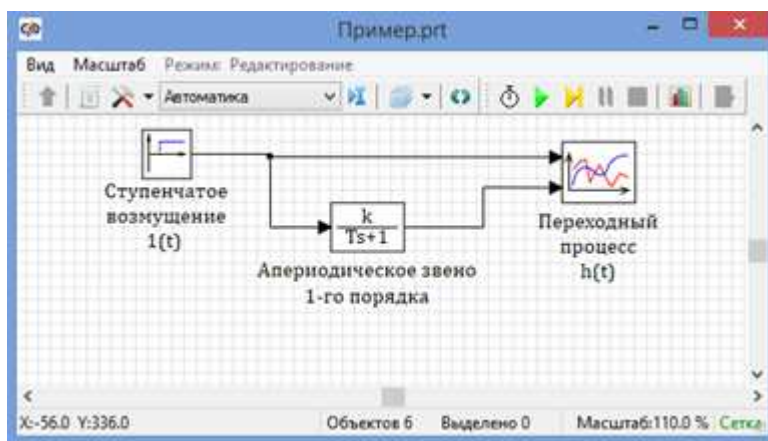
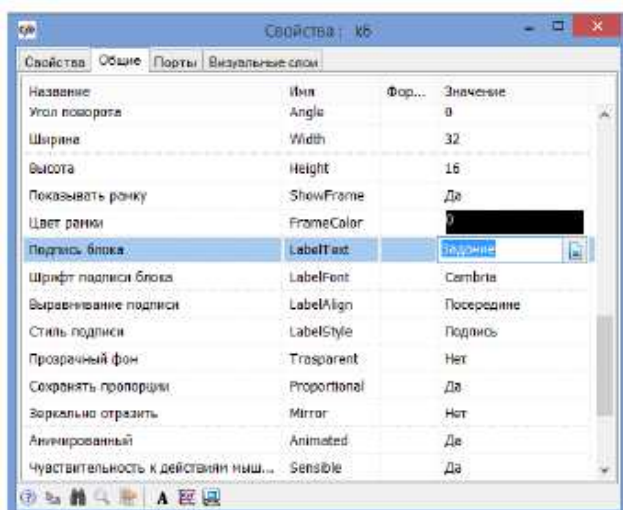
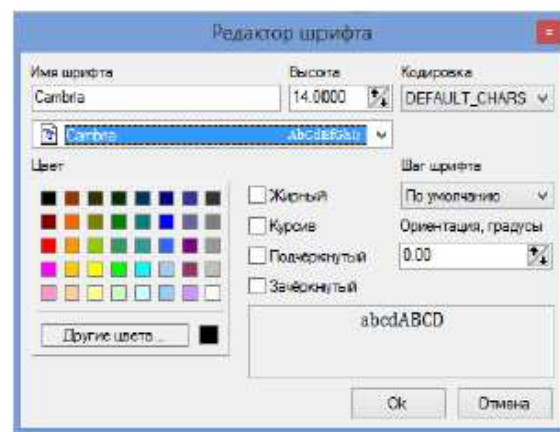


Рисунок 2.2.7. Пример оформленной структурной схемы

Также выполнить подпись блока можно следующим способом. Переместите курсор на нужный блок, сделайте 1-кратный щелчок правой кнопкой мыши и в контекстном меню выберите пункт *Свойства объекта*. Во вкладке *Общие* в пункте *Подпись блока* записывается соответствующий заголовок (рис. 2.2.8, а). В пункте *Выравнивание подписи* можно указать требуемый способ выравнивания текста. Выбрав пункт *Шрифт подписи блока*, откроется диалоговое окно Редактор шрифта (рис. 2.2.8, б), в котором можно установить шрифт, начертание, цвет, размер. Для сохранения изменений необходимо нажать кнопку *Ok*.



(а)

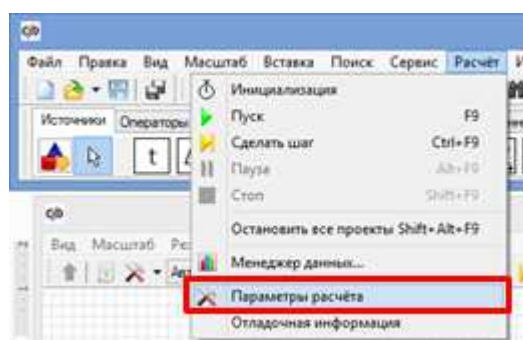


(б)

Рисунок 2.2.8. Задание подписи в свойствах блока

Этап 5. Установка параметров расчета схемы

Чтобы настроить расчетные параметры схемы в главном меню необходимо выбрать «*Расчет* → *Параметры расчета*» (рис. 2.2.9, а), либо нажать кнопку *Параметры расчета* на панели инструментов схемного окна (рис. 2.2.9, б).



(а)



(б)

Рисунок 2.2.9. Способы открытия окна настройки параметров расчета схемы

После откроется диалоговое окно с активной закладкой *Параметры расчета* (рис.2.2.1.0), где необходимо выбрать *Метод интегрирования*, установить *Начальный шаг интегрирования* $startstep=0$, *Конечное время расчета* $endtime$ (выбирается из соображения того, чтобы переходные процессы успевали завершиться), *Максимальный шаг* $hmax$ достаточно принять равным 0.1, *Минимальный шаг* $hmin=0.001$, *Относительную ошибку* $relerr=0.001$, остальные параметры оставить по умолчанию или настраивать под конкретные задачи.

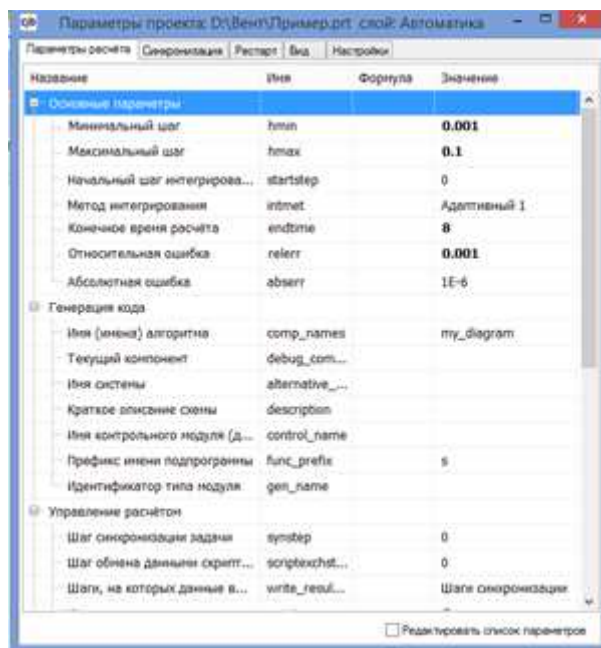


Рисунок 2.2.10. Окно настройки параметров расчета схемы

Закладка *Синхронизация* предназначена для расчета в заданном масштабе времени. Если выбрать пункт *Синхронизировать с реальным временем* и в поле *Коэффициент ускорения* указать 1, то это будет соответствовать расчету в реальном масштабе времени.

Закладка *Рестарт* предназначена для периодического (например, через 1 секунду) сохранения в бинарном формате основных данных расчета, по которым можно продолжить процесс моделирования после завершения расчета.

Закладка *Вид* диалогового окна параметры проекта предназначена для установки внешнего вида схемного окна по умолчанию.

Закладка *Настройки* предназначена для дополнительных настроек (связь с базой данных, с плагином решателя схемы и т.д.).

Этап 6. Запуск процесса моделирования

После того как структурная схема собрана, заданы свойства всех блоков и введены параметры интегрирования, она может быть запущена на счет. Для этого необходимо нажать на кнопку  на панели инструментов или на клавишу F9. В результате работы схемы выходные сигналы блоков начнут изменяться, их величины будут отображаться на графиках и других индикаторах. Параметры некоторых сигналов и блоков можно изменять в процессе симуляции, другие параметры можно изменить, приостановив процесс работы схемы, нажав кнопку . В строке отображения расчетной информации схемного окна должна появиться надпись: «Конечное время достигнуто...», в противном случае в схеме была допущена ошибка.

Блок *Временной график* (вкладка Палитры блоков: *Вывод данных* → *Временной график*) реализует отображение результатов моделирования в виде временных зависимостей для одной или нескольких переменных.

Число отображаемых в графическом окне сигналов задается в свойствах блока. Для этого необходимо переместить курсор на блок, сделать 1-кратный щелчок правой кнопкой мыши и в контекстном меню блока выбрать пункт свойств объекта. Во вкладке *Свойства* в пункте *Количество входных портов* InPortCount указывается необходимое число входных сигналов (рис. 2.2.11).

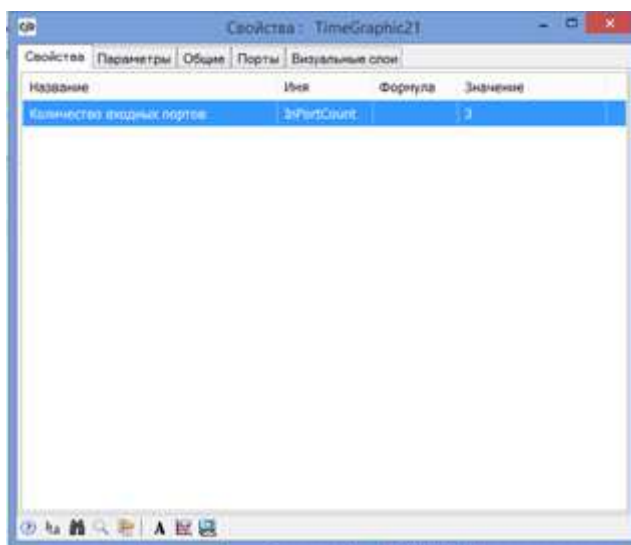


Рисунок 2.2.11. Окно свойств блока «Временной график»

При 2-х кратном щелчке левой кнопкой мыши по изображению блока в схемном окне открывается графическое окно (рис. 2.2.12), которому можно придать необходимый размер.

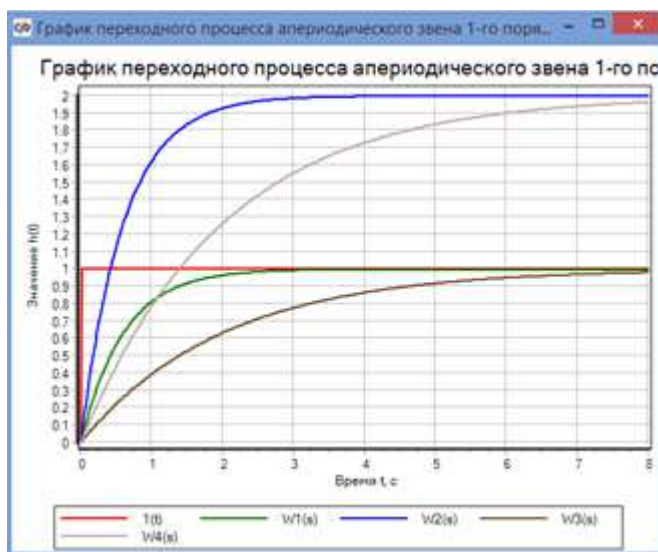


Рисунок 2.2.12. Окно свойств блока «Временной график»

Чтобы увеличить фрагмент графика необходимо навести курсор в нужную часть графика, сделать двойной щелчок левой кнопкой мыши и, удерживая кнопку нажатой, выполнить движение мышью по направлению «вправо-вверх» или «вправо-вниз». Для восстановления исходного вида графика достаточно повторить ту же процедуру, только движение мышью выполнить по направлению «влево-вверх» или «влево-вниз» с нажатой левой кнопкой мыши. Перемещение видимой части графика производится перемещением мыши с нажатой правой кнопкой мыши.

Если переместить курсор в центральную часть окна графика и сделать 1-кратный щелчок правой кнопкой мыши, должно появиться контекстное меню (рис. 2.2.13).

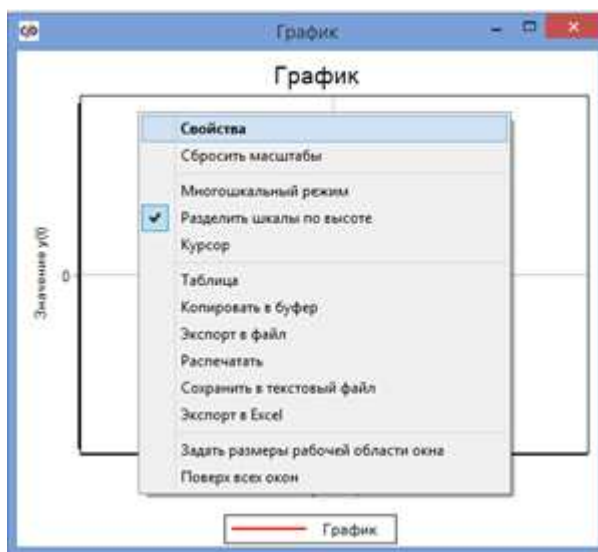


Рисунок 2.2.13. Диалоговое окно настройки графика

Пункт *Копировать в буфер* в контекстном меню позволяет скопировать в буфер обмена изображение графика для последующей вставки его в соответствующие отчетные документы, например, в текстовые документы Word, в графический редактор Paint или в САПР AutoCAD.

Пункт *Распечатать* в контекстном меню позволяет сразу вывести изображение графика на печать, используя доступные принтеры.

Пункт *Таблица* в контекстном меню позволяет сменить способ отображения временной зависимости на табличную, что эффективно, когда требуется высокая оценка точности результатов моделирования (рис. 2.2.14).

Если выбрать пункт контекстного меню – *Экспорт в Excel*, то автоматически загрузится таблица MS Excel уже с записанными временными зависимостями SimInTech, которые можно использовать для дальнейших исследований.

№	$1(t) - Y$	$W1(s) - X$	$W1(s) - Y$	$W2(s) - X$	$W2(s) - Y$	$W3(s) - X$	$W3(s) - Y$
1	0	0	0	0	0	0	0
2	1	0.01367	0.0010062641	0.01367	0.00025158856	0.01367	0.00047353277
3	1	0.052224556	0.013469824	0.052224556	0.0033721144	0.052224556	0.0053586121
4		0.063115507	0.013225971	0.063115507	0.0048180946	0.063115507	0.0074395914
5		0.072924156	0.025134021	0.072924156	0.0063048525	0.072924156	0.0094656328
6		0.12928049	0.069994351	0.12928049	0.01769033	0.12928049	0.022735205
7		0.13783759	0.07813051	0.13783759	0.019775303	0.13783759	0.024889278
8		0.1450102	0.085165268	0.1450102	0.021583373	0.1450102	0.026707686
9		0.19746684	0.1413822	0.19746684	0.036226425	0.19746684	0.040165018
10		0.21084506	0.15674782	0.21084506	0.040294322	0.21084506	0.043600775
11		0.22305929	0.17103382	0.22305929	0.04410408	0.22305929	0.04672854
12		0.29171231	0.25403771	0.29171231	0.066835405	0.29171231	0.064046672
13		0.30822069	0.27428422	0.30822069	0.072553044	0.30822069	0.068130455
14		0.32143574	0.29047103	0.32143574	0.077180303	0.32143574	0.07137447
15		0.33889147	0.31177503	0.33889147	0.083350175	0.33889147	0.07524658
16		0.36942147	0.34866208	0.36942147	0.094265403	0.36942147	0.082961729
17		0.38364099	0.36562038	0.38364099	0.099390446	0.38364099	0.086336982
18		0.39511734	0.37918109	0.39511734	0.1035409	0.39511734	0.089041585

Рисунок 2.2.14. Представление временной зависимости в виде таблицы

Если выбрать пункт *Курсор* контекстного меню, то появится перекрестие, которое можно переместить на точку, координаты которой следует вычислить. Координаты будут отображены в специальном поле (рис. 2.2.15). Чтобы убрать перекрестие, закройте диалоговое окно *Ближайшие к курсору точки*.



Рис. 2.2.15. Детализация графика.

Если выбрать пункт *Свойства* контекстного меню, то откроется диалоговое окно с заголовком *Свойства графика* (рис. 2.2.16), в котором задаются настройки параметров графического окна, такие как цвет и тип линий, параметры осей, заголовок графика и подписи по осям координат и т.д.

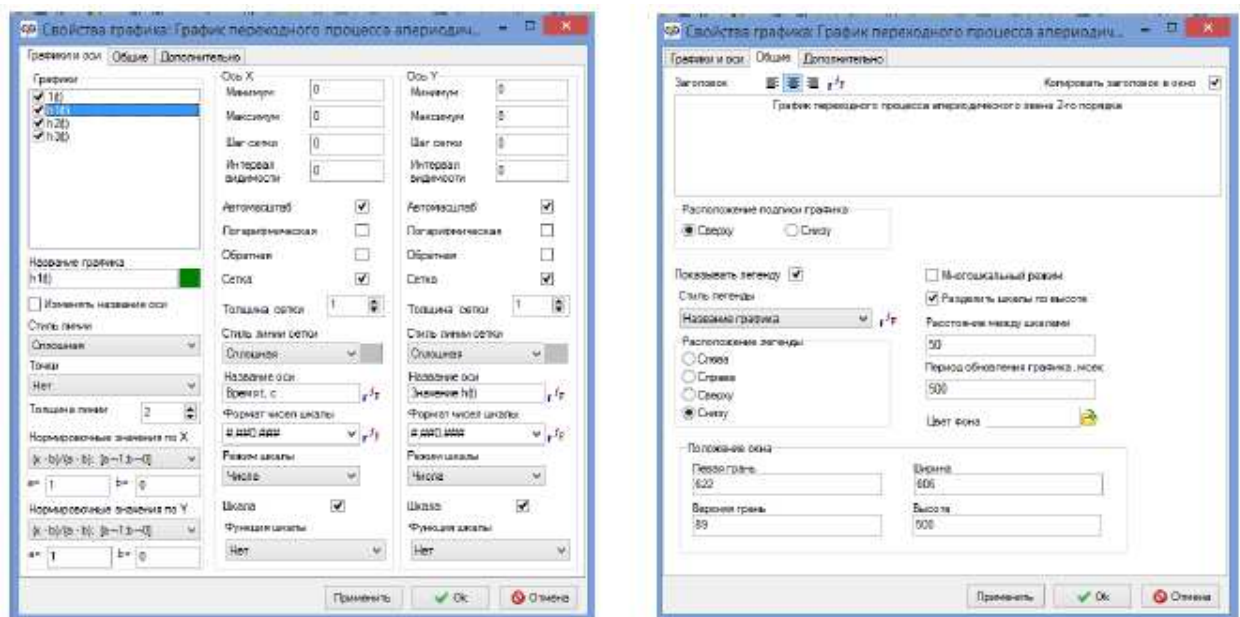


Рисунок 2.2.16. Окно настройки свойств временного графика

Наиболее часто используемые возможности редактирования:

- *Название графика* – наименование временных зависимостей;
- *Стиль линии* – стиль линии, которой отображается выбранная временная зависимость;
- *Толщина линии* – толщина в пикселях линии выбранного графика;
- *Заголовок* – наименование графика (вверху), можно задать параметры шрифта;
- *Название оси* – строка текста, отображаемого около Оси X и Оси Y;
- *Автомасштаб* – возможность автомасштабирования графика (по умолчанию включен);
- *Период обновления графика* – при исследовании длительных процессов его нужно увеличить, при исследовании быстрых процессов этот параметр лучше уменьшить;
- *Многошкальный режим* – возможность вывода разных шкал для отображения разных величин.

Закончив процедуру редактирования свойств графика, необходимо нажать на кнопку *Ок* и закрыть диалоговое окно [8].

Список литературы.

1. Сенигов П.Н. Теория автоматического управления: Конспект лекций. – Челябинск: ЮУрГУ, 2001 - 93с.
2. Теория автоматического управления: учебник для вузов / В. Я. Ротач. — 5-е изд., перераб. и доп. — М.: Издательский дом МЭИ, 2008. — 396 с., ил.
3. М. П. Симою, «Определение коэффициентов передаточных функций линеаризованных звеньев и систем авторегулирования», Автоматика и телемеханика, т. XVIII, 1957.
4. Учебные материалы для студентов [Электронный ресурс]. – Режим доступа: <https://studme.org>. свободный – (дата обращения 15.05.2022)
5. Медведева, Л.И. Программно-аппаратный измерительный комплекс для исследования алгоритмов управления многосвязными объектами [Текст]: диссертация кандидата технических наук: 05.11.16: защищена 27.05.2004: утв. 12.11.2004/ Медведева Людмила Ивановна. – Волгоград, 2004. –130 с.
6. Основы автоматического регулирования и управления. Под ред. Пономарева В. М. и Литвинова А. П. Учебн. пособие для неэлектротехн. специальностей вузов. М., «Высшая школа», 1974 - 439 с.
7. Теория автоматического управления, раздел «Линейные системы». Методические указания к выполнению лабораторных работ для студентов специальности 1-53 01 01-05 «Автоматизация технологических процессов и производств (легкая промышленность)»/ Министерство образования РБ, УО «ВГТУ». Сост.: к.т.н., доцент Иванова Л.В., ассистент Надёжная Н.Л., 2011.
8. «Основы моделирования в SimInTech. Методическое пособие» / ФГБОУ ВО Российский химико-технологический университет им. Д.И. Менделеева, Новомосковский институт (филиал), Сост.: Ляшенко А.И., Вент Д.П., Маслова Н.В. Новомосковск, 2018. - 42 с.

Электронное учебное издание

Людмила Ивановна **Медведева**

**Математические основы теории управления.
Лабораторный практикум**

Учебное пособие

Электронное издание сетевого распространения

Редактор Матвеева Н.И.

Темплан 2022 г. Поз. № 34.

Подписано к использованию. 13.09.2022. Формат 60х84 1/16.

Гарнитура Times. Усл. печ. л. 5,5.

Волгоградский государственный технический университет.

400005, г. Волгоград, пр. Ленина, 28, корп. 1.

ВПИ (филиал) ВолгГТУ.

404121, г. Волжский, ул. Энгельса, 42а.