

МИНИСТЕРСТВО ОБРАЗОВАНИЯ И НАУКИ РОССИЙСКОЙ ФЕДЕРАЦИИ
Государственное образовательное учреждение высшего профессионального образования
**«НАЦИОНАЛЬНЫЙ ИССЛЕДОВАТЕЛЬСКИЙ
ТОМСКИЙ ПОЛИТЕХНИЧЕСКИЙ УНИВЕРСИТЕТ»**

ТЕОРИЯ АВТОМАТИЧЕСКОГО УПРАВЛЕНИЯ

Лабораторный практикум

Часть 2

*Рекомендовано в качестве учебного пособия
Редакционно-издательским советом
Томского политехнического университета*

Составители А.П. Зайцев, А.Д. Митаенко, К.В. Образцов

Издательство
Томского политехнического университета
2011

УДК 681.51.01(076.5)

ББК 32.965я73

Т34

Т34 **Теория автоматического управления:** лабораторный практикум. Часть 2 / Сост.: А.П. Зайцев, А.Д. Митаенко, К.В. Образцов; Томский политехнический университет. – Томск: Изд-во Томского политехнического университета, 2011. – 90 с.

Лабораторный практикум (часть 2) включает специальные разделы курса «Теория автоматического управления», исследуемые на основе программы Classic-3, а также лабораторные работы, выполняемые на реальных физических установках. Все работы включают исследования замкнутых автоматических систем.

Предназначен для студентов, обучающихся по направлению 140600 «Электротехника, электромеханика и электротехнологии».

УДК 681.51.01(076.5)

ББК 32.965я73

Рецензенты

Кандидат технических наук, доцент,
заведующий отделом НИИ автоматики и
электромеханики ТУСУРа

В.Н. Мишин

Доктор технических наук, профессор ТУСУРа

В.А. Бейнарович

© Составление. ГОУ ВПО НИ ТПУ, 2011

© Зайцев А.П., Митаенко А.Д.,

Образцов К.В., составление, 2011

© Обложка. Издательство Томского

политехнического университета, 2011

СОДЕРЖАНИЕ

ВВЕДЕНИЕ	4
ЛАБОРАТОРНАЯ РАБОТА № 7 ИНВАРИАНТНЫЕ СИСТЕМЫ АВТОМАТИЧЕСКОГО УПРАВЛЕНИЯ	5
ЛАБОРАТОРНАЯ РАБОТА № 8 НАСТРОЙКА РЕГУЛЯТОРОВ ТИПОВЫХ ОДНОКОНТУРНЫХ СИСТЕМ	13
ЛАБОРАТОРНАЯ РАБОТА № 9 НАСТРОЙКА ТИПОВЫХ РЕГУЛЯТОРОВ ОБЪЕКТОВ С ЗАПАЗДЫВАНИЕМ.....	21
ЛАБОРАТОРНАЯ РАБОТА № 10 ИССЛЕДОВАНИЕ САУ В ПРОСТРАНСТВЕ СОСТОЯНИЙ	27
ЛАБОРАТОРНАЯ РАБОТА № 11 ИССЛЕДОВАНИЕ ЗАМКНУТОЙ СИСТЕМЫ РЕГУЛИРОВАНИЯ СКОРОСТИ БЕСКОНТАКТНОГО ДВИГАТЕЛЯ ПОСТОЯННОГО ТОКА	34
ЛАБОРАТОРНАЯ РАБОТА № 12 ИССЛЕДОВАНИЕ СИСТЕМЫ ПОДЧИНЕННОГО РЕГУЛИРОВАНИЯ	45
СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ	58
ПРИЛОЖЕНИЕ 2.....	59

ВВЕДЕНИЕ

Лабораторный практикум по дисциплине «Теория автоматического управления» (часть 2) включает исследования замкнутых электромеханических систем. Выполнение работ части 2 основано на практических навыках, полученных в части 1, где рассмотрены общие положения и понятия курса ТАУ, элементы автоматических систем. В части 2 представлены более сложные специальные системы автоматического управления, рассматривается влияние параметров и регуляторов системы на показатели качества работы этих систем.

На реальных физических установках студент изучает принципы построения автоматических систем управления электроприводом; принципиальные электрические схемы, включающие обязательные функциональные элементы (объекты регулирования, чувствительные элементы, датчики регулируемых переменных, усилительные элементы и др.) и их техническую реализацию; оценивает статические и динамические показатели исследуемых систем.

ЛАБОРАТОРНАЯ РАБОТА № 7 ИНВАРИАНТНЫЕ СИСТЕМЫ АВТОМАТИЧЕСКОГО УПРАВЛЕНИЯ

1. Цель работы

Изучение принципов построения и свойств инвариантных систем автоматического управления.

2. Краткие теоретические сведения

Одной из главных задач синтеза автоматической системы является обеспечение требуемой точности в установившихся и переходных режимах. Точность систем в установившихся режимах можно повысить за счет увеличения порядка астатизма и коэффициента передачи разомкнутого контура. Но этот путь приводит к уменьшению запаса устойчивости, увеличению колебательности и снижению точности системы в переходных режимах. Эффективным способом решения задачи обеспечения точности в установившихся и переходных режимах является компенсация внешних воздействий путем реализации принципа инвариантности.

«Инвариантность» означает независимость одной физической величины от другой. В ТАУ рассматривают независимость в основном двух выходных величин – выходной величины и сигнала ошибки от входных воздействий. В системах стабилизации необходимо добиваться независимости выходной величины от возмущающего воздействия, а в следящих системах – независимости сигнала ошибки от задающего воздействия.

Инвариантность в САУ достигается компенсацией возмущающего воздействия, когда управляющее воздействие формируется в зависимости от изменений возмущающего воздействия. Этот принцип управления применим, если возмущающее воздействие измеряемо. Обычно принцип управления по возмущению применяют в сочетании с принципом управления по отклонению (комбинированная система).

Рассмотрим алгоритмическую структуру комбинированной системы стабилизации с компенсирующей связью по возмущению z [2], представленную на рис. 1. Компенсирующая связь действует на выходную величину со знаком, который всегда противоположен знаку непосредственного влияния возмущения на выход.

Передаточная функция системы по возмущению

$$\Phi_{xz}(s) = \frac{X(s)}{Z(s)} = \frac{W_{0z}(s) - W_k(s) \cdot W_y(s) \cdot W_0(s)}{1 + W_y(s) \cdot W_0(s)}, \quad (1)$$

где $W_0(s)$ и $W_{0z}(s)$ – передаточные функции объекта по управляющему и возмущающему воздействию соответственно; $W_y(s)$ – передаточная функция управляющего устройства; $W_K(s)$ – передаточная функция компенсирующего устройства.

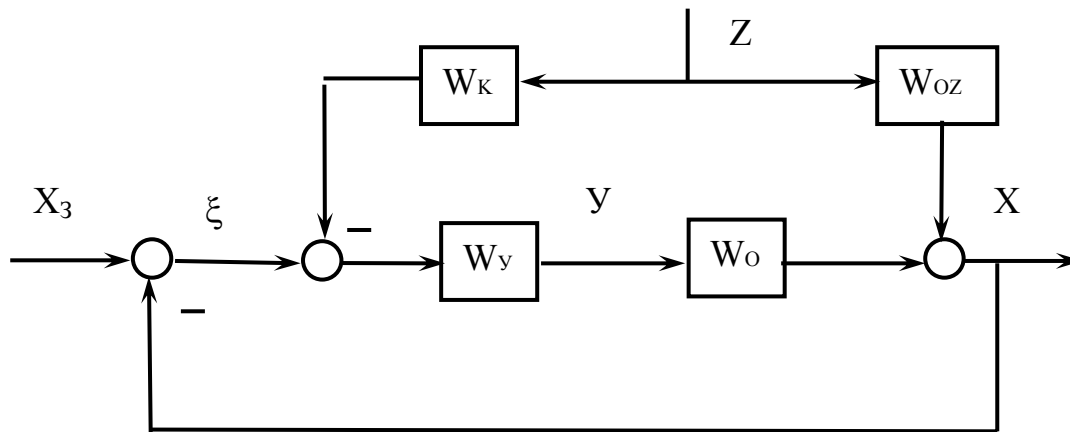


Рис. 1. Структура комбинированной САУ с компенсирующей связью по возмущению

Управляемая величина $x(t)$ не зависит от возмущения $z(t)$, если передаточная функция (1) равна нулю:

$$\Phi_{xz}(s) = 0. \quad (2)$$

Это условие выполняется, если равен нулю числитель передаточной функции. Приравняв нулю выражение (1), определим условие инвариантности стабилизируемой величины по отношению к возмущению:

$$W_{0z}(s) - W_K(s) \cdot W_y(s) \cdot W_0(s) = 0. \quad (3)$$

Из (3) следует, что для достижения независимости величины $x(t)$ от возмущения $z(t)$ необходимо, чтобы динамические свойства двух параллельных каналов, по которым возмущение $z(t)$ действует на $x(t)$, были одинаковыми.

В соответствии с (3) передаточная функция компенсирующего устройства

$$W_K(s) = W_{0z}(s) / W_y(s) \cdot W_0(s). \quad (4)$$

Передаточная функция компенсирующего устройства соответствует динамическому звену, свойства которого определяются свойствами каналов возмущения $W_{0z}(s)$ и управления $W_y(s)W_0(s)$. Если инерционность канала управления больше, чем инерционность канала возмущения, то компенсирующее устройство должно обладать свойствами дифференцирующего звена. Причем чем больше разница этих инерционностей, тем выше должен быть порядок дифференцирующего звена. Такие звенья технически трудно реализовать.

В следящих системах необходима инвариантность сигнала ошибки от задающего воздействия. Для схемы, приведенной на рис. 2, передаточная функция между точкой приложения задающего воздействия $X_3(t)$ и точкой выхода сигнала ошибки $\xi(t)$

$$\Phi_{\xi X_3}(s) = \frac{\xi(s)}{X_3(s)} = \frac{1 - W_K(s) \cdot W_y(s) \cdot W_0(s)}{1 + W_y(s) \cdot W_0(s)} \quad (5)$$

Приравнивая функцию (5) к нулю, определим условие инвариантности ошибки слежения по отношению к задающему воздействию:

$$1 - W_K(s) \cdot W_y(s) \cdot W_0(s) = 0 \quad (6)$$

отсюда определяется требуемая передаточная функция компенсирующего устройства как

$$W_K(s) = 1 / W_y(s) \cdot W_0(s) \quad (7)$$

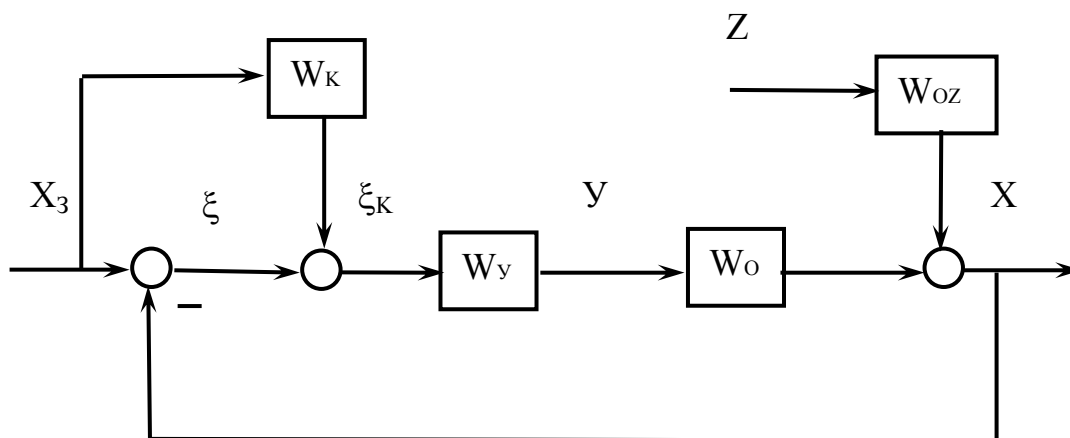


Рис. 2. Структура комбинированной САУ с компенсирующей связью по задающему воздействию

Из передаточных функций (1) и (5) следует, что компенсирующие связи не изменяют характеристический полином системы, поэтому не влияют на ее устойчивость.

Теоретически в системе можно достичь *абсолютной инвариантности*. В этом случае передаточная функция замкнутой системы должна быть равна единице. Это означает, что такая система автоматического управления должна иметь полосу пропускания по частоте без амплитудных и фазовых искажений, равную бесконечности. В реальных системах обеспечить бесконечную полосу пропускания невозможно, поэтому реализация полной инвариантности по управляющему воздействию сопряжена с принципиальными трудностями, связанными с реализуемостью передаточной функции корректирующего устройства, уменьшающего ошибку системы.

Если $W_k(s)$ реализуема приближенно, то в системе осуществима частичная инвариантность. Частичная инвариантность может значительно повысить точностные характеристики замкнутых САУ.

3. Пояснения к работе

В качестве объекта исследования рассмотрим следящую систему. В следящих системах алгоритм функционирования заранее неизвестен. Обычно регулируемая координата в таких системах должна воспроизводить изменение некоторого внешнего фактора, следить за ним. Так, антенна радиолокатора должна следить за положением самолета. Следящая система может быть выполнена в соответствии с любым фундаментальным принципом управления и будет отличаться от соответствующей системы программного управления тем, что вместо датчика программы в ней будет иметь место устройство слежения за изменением внешнего фактора.

На рис. 3 приведена упрощенная схема следящей системы на базе ЭМУ-50А3 и электродвигателя МИ-42, параметры которых приведены в лабораторной работе № 3. Регулируемой величиной является угол поворота $\theta_{вых}$ управляемого объекта 2. Приводной двигатель 3 питается от ЭМУ 1. Входное воздействие подается на сельсин-датчик 5 в виде угла поворота $\theta_{вх}$ его ротора. Соединенные по трансформаторной схеме сельсин-датчик и сельсин-приемник 4, механически связанный с управляемым объектом, вырабатывают напряжение, пропорциональное рассогласованию $\xi = \theta_{вх} - \theta_{вых}$.

Напряжение ошибки усиливается усилителем У и ЭМУ 1 (АМР) и поступает на якорь исполнительного двигателя 3, вращающего одновременно объект 2 и ротор сельсина-приемника до тех пор, пока рассогласование не станет равным нулю.

Структурная схема следящей системы приведена на рис. 4.

Упрощенные передаточные функции звеньев структурной схемы при пренебрежении индуктивностью якорной цепи ЭМУ и двигателя с учетом паспортных данных приведены ниже.

Коэффициент передачи K_y усилителя У (звено 3) задается преподавателем по табл. 1.

$$W_{amp}(s) = \frac{K_{эмy}}{T_{вх}s + 1} = \frac{11}{1 + 0,5s} \text{ — передаточная функция ЭМУ (звено 4);}$$

$$W_o(s) = \frac{K_1}{T_m s + 1} = \frac{1,24}{1 + 0,4s} \text{ — передаточная функция двигателя по управлению относительно частоты вращения (звено 5);}$$

$W_{ov}(s) = \frac{K_2}{T_m s + 1} = \frac{0,6}{1 + 0,4s}$ передаточная функция двигателя по возмущению относительно частоты вращения (звено 8);

$W(s) = 1/s$ – передаточная функция выходного звена (звено 6).

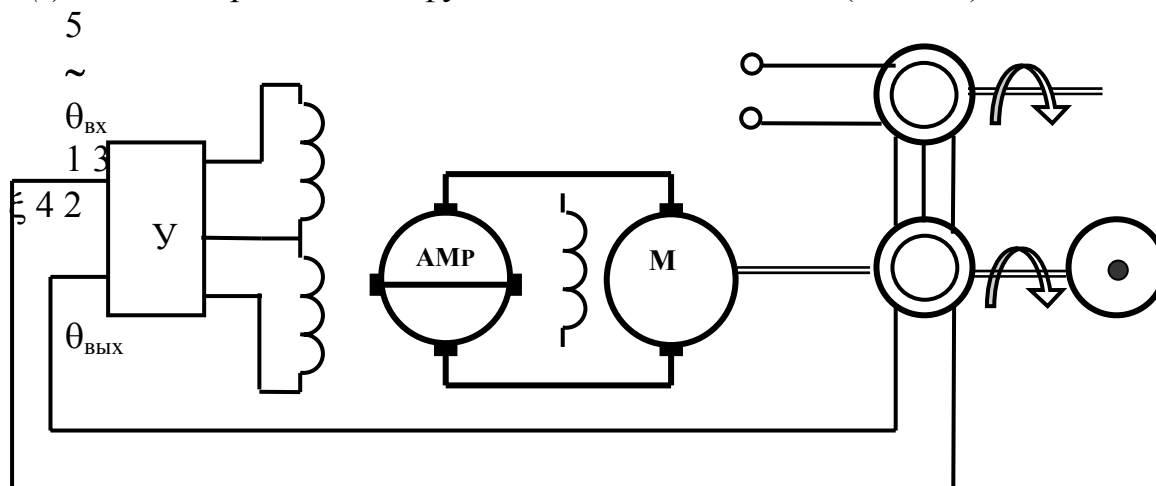


Рис. 3. Следящая система

Звенья 1 и 2 имеют единичные передаточные функции.

Звено 7 служит для задания величины возмущения (момента нагрузки двигателя).

4. Программа работы

Лабораторная работа выполняется в среде моделирующей системы CLASSIC-3. Применительно к структурной схеме САУ (рис. 4), при заданных и неизменных передаточных функциях ЭМУ и двигателя по варианту значения коэффициента передачи K_y усилителя (вариант задается преподавателем), проделать следующую работу.

1. По исходной структурной схеме следящей системы (рис. 4) снять статическую характеристику $X_{вых} = F(Z)$ для значений возмущающего воздействия $Z = 0, 1, 2$.

2. Определить передаточную функцию корректирующего звена 9 W_{korr} по формуле (4), обеспечивающего инвариантность управляемой величины $X_{вых}$ и возмущающего воздействия Z в статическом режиме работы системы. При определении передаточной функции корректирующего звена руководствоваться структурной схемой, представленной на рис. 5.

3. Снять статическую характеристику $X_{вых} = F(Z)$ скорректированной системы при изменении возмущающего воздействия $Z = 0 \div 2$.

4. Снять статическую зависимость $\xi = F(X_{зад})$ ошибки управления от задающего воздействия в исходной системе (рис. 4).

5. Определить передаточную функцию корректирующего звена (W_{korr}), обеспечивающего инвариантность статической ошибки управления ξ и задающего воздействия. При определении передаточной функции корректирующего звена руководствоваться структурной схемой системы, представленной на рис. 6.

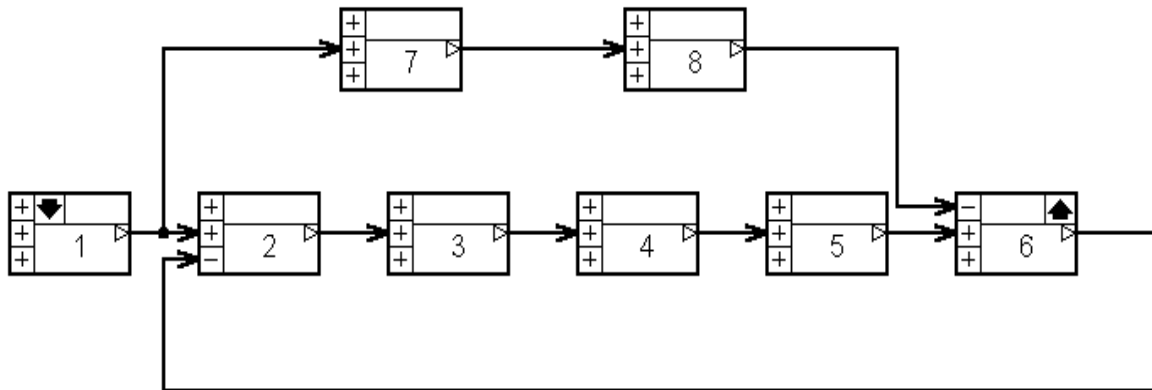


Рис. 4. Исходная структурная схема следящей системы

Таблица 1

№ варианта	1	2	3	4	5	6	7	8	9	10
K_y	0,06	0,07	0,08	0,09	0,1	0,11	0,12	0,13	0,14	0,15

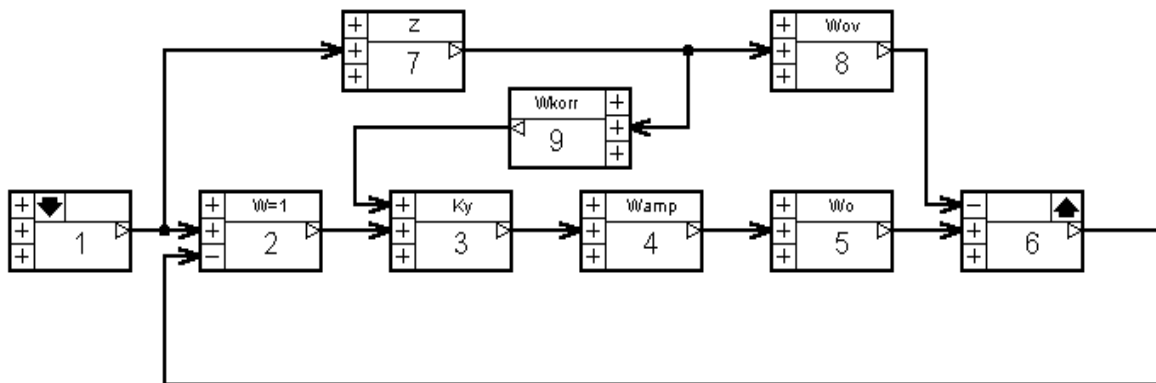


Рис. 5. Структурная схема следящей системы с компенсацией возмущения

6. Снять статическую зависимость ошибки управления от задающего воздействия $\xi = F(X_{зад})$ в системе с компенсирующей связью по задающему воздействию (рис. 6).

7. Сравнить статические характеристики исходной системы и системы с различными видами коррекции, сделать выводы.

5. Порядок выполнения работы

1. Набрать и отредактировать в среде *CLASSIC-3* структурную схему исходной следящей системы по рис. 4. Коэффициент K_y установить согласно заданному варианту.

2. Устанавливая коэффициент передачи варьируемого звена 7 в режиме редактирования согласно табл. 2 и измеряя установившееся значение управляемой величины, заполнить таблицу 2.

Таблица 2

Z	0	0,5	1,0	1,5	2
$X_{вых}$					

3. Построить статическую характеристику $X_{вых} = F(Z)$.

4. Сохранить отдельным файлом структурную схему исходной системы, где $Z \neq 0$.

5. Набрать структурную схему инвариантной системы по рис. 5, рассчитать передаточную функцию корректирующего звена по формуле (4) и отредактировать его.

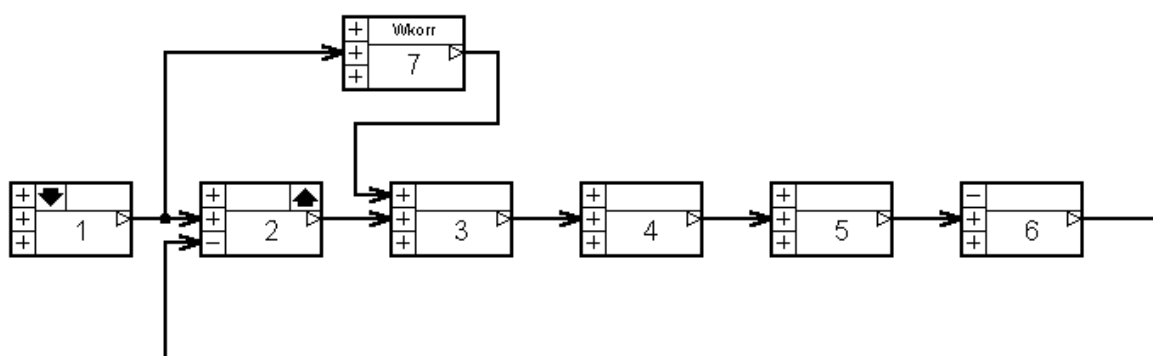


Рис. 6. Структурная схема следящей системы с компенсирующей связью по задающему воздействию

Выполнить п. 2 настоящего раздела для инвариантной системы, заполнить таблицу, аналогичную табл. 2, и построить статическую характеристику $X_{вых} = F(Z)$ в тех же координатных осях.

6. Загрузить файл с исходной структурной схемой п. 4, назначить выходным звеном звено сравнения на входе системы (звено 2).

7. Устанавливая коэффициент передачи входного звена 1 в режиме редактирования согласно табл. 3 и измеряя установившееся значение ошибки управления ξ , заполнить табл. 3.

Таблица 3

$X_{зад}$	1	2	5	10	20
ξ					

8. По результатам эксперимента построить статическую зависимость $\xi = F(X_{зад})$ без корректирующего устройства.

10. Набрать структурную схему инвариантной по задающему воздействию следящей системы согласно рис. 6.

11. Определить передаточную функцию звена коррекции (по формуле (7)) и отредактировать её.

12. Выполнить п. 8 настоящего раздела для инвариантной системы с корректирующим устройством.

13. По результатам эксперимента построить статическую зависимость $\xi = F(X_{зад})$ с корректирующим устройством.

6. Содержание отчета

В отчете привести задание на выполнение лабораторной работы, структурные схемы исследуемых систем, расчеты передаточных функций корректирующих звеньев, экспериментальные статические характеристики, выводы и ответы на вопросы.

7. Вопросы

1. Как следует понимать инвариантность системы?
2. По каким каналам передачи воздействия необходимо добиваться инвариантности в стабилизирующих и следящих системах?
3. Почему необходима реализация принципа двухканальности инвариантных систем?
4. Почему в реальных системах не удается в большинстве случаев обеспечить полную инвариантность?
5. Какими должны быть передаточные свойства естественного и искусственного каналов передачи воздействия от входа к выходу в инвариантных системах?
6. Влияют ли компенсирующие (корректирующие) связи в инвариантных системах на их устойчивость?

ЛАБОРАТОРНАЯ РАБОТА № 8 НАСТРОЙКА РЕГУЛЯТОРОВ ТИПОВЫХ ОДНОКОНТУРНЫХ СИСТЕМ

1. Цель работы

Изучение влияния настроечных параметров регулятора на динамические свойства САУ и методик настройки САУ на модульный оптимум (МО) и симметричный оптимум (СО).

2. Краткие теоретические сведения

САУ может быть приведена к простейшей одноконтурной алгоритмической схеме (рис. 1).

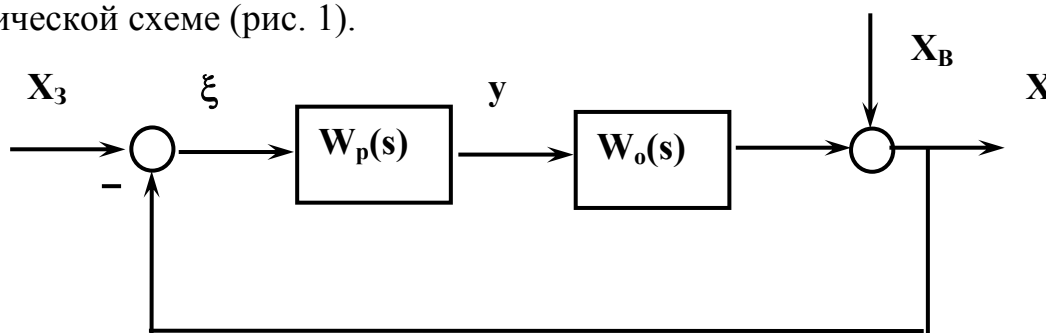


Рис. 1. Алгоритмическая схема типовой одноконтурной системы

На схеме $W_p(s)$ – передаточная функция регулятора, $W_o(s)$ – передаточная функция объекта управления.

Простейший типовой алгоритм управления регулятора реализуется при помощи безынерционного звена с передаточной функцией

$$W_p(s) = y(s)/\xi(s) = \kappa_p. \quad (1)$$

Этот закон регулирования называется *пропорциональным* (П).

Преимущество П-регулятора – простота и быстроедействие, недостаток – ограниченная точность.

Закон регулирования, которому соответствует передаточная функция регулятора

$$W_p(s) = \kappa_u / s, \quad (2)$$

называется *интегральным* (И). И-регулятор реагирует на длительные отклонения управляемой величины от заданного значения. Кратковременные отклонения сглаживаются таким регулятором.

Преимущество интегрального закона, по сравнению с пропорциональным законом, – большая точность в установившихся режимах, недостаток – ухудшение динамических свойств в переходных режимах (меньшее быстроедействие и большая колебательность).

Наибольшее распространение получил *пропорционально-интегральный* (ПИ) закон регулирования:

$$W_p(s) = \kappa_n + \kappa_u / s. \quad (3)$$

Наличие интегральной составляющей в ПИ-законе обеспечивает высокую точность в установившихся режимах, а при определенном соотношении коэффициентов κ_n и κ_u обеспечивает хорошие показатели и в переходных режимах.

Наилучшее быстродействие достигается при *пропорционально-дифференциальном* (ПД) законе регулирования:

$$W_p(s) = \kappa_n + \kappa_\delta s. \quad (4)$$

ПД-регулятор реагирует не только на величину сигнала ошибки, но и на скорость его изменения. Благодаря этому при управлении достигается эффект упреждения. Недостатком пропорционально-дифференциального закона регулирования является ограниченная точность.

Наиболее универсальным является *пропорционально-интегрально-дифференциальный* (ПИД) закон

$$W_p(s) = \kappa_n + \frac{\kappa_u}{s} + \kappa_\delta s, \quad (5)$$

который сочетает в себе преимущества более простых, ранее рассмотренных законов.

В литературе принято ПИД-закон записывать в форме [2]

$$W_p(s) = \kappa_p \frac{T_u + T_\delta}{T_u} + \frac{\kappa_p}{T_u s} + \kappa_p T_\delta s, \quad (6)$$

где $K_{II} = \kappa_p \cdot \frac{T_u + T_\delta}{T_u}$; $K_i = \frac{\kappa_p}{T_u}$; $K_\delta = \kappa_p \cdot T_\delta$; κ_p – передаточный коэффициент регулятора; T_u – постоянная времени интегрирования; T_δ – постоянная времени дифференцирования.

Связь между коэффициентами уравнений (5) и (6) очевидна из почленного сравнения этих уравнений.

Если допустить, что САУ имеет ПИД-регулятор, то алгоритмическая схема типовой одноконтурной системы представляется в виде, показанном на рис. 2.

В зависимости от типа и порядка объектов, а также соотношений между их постоянными времени, настройка контура регулирования осуществляется либо по критерию модульного оптимума (МО), либо по критерию симметричного оптимума (СО) (рис. 3).

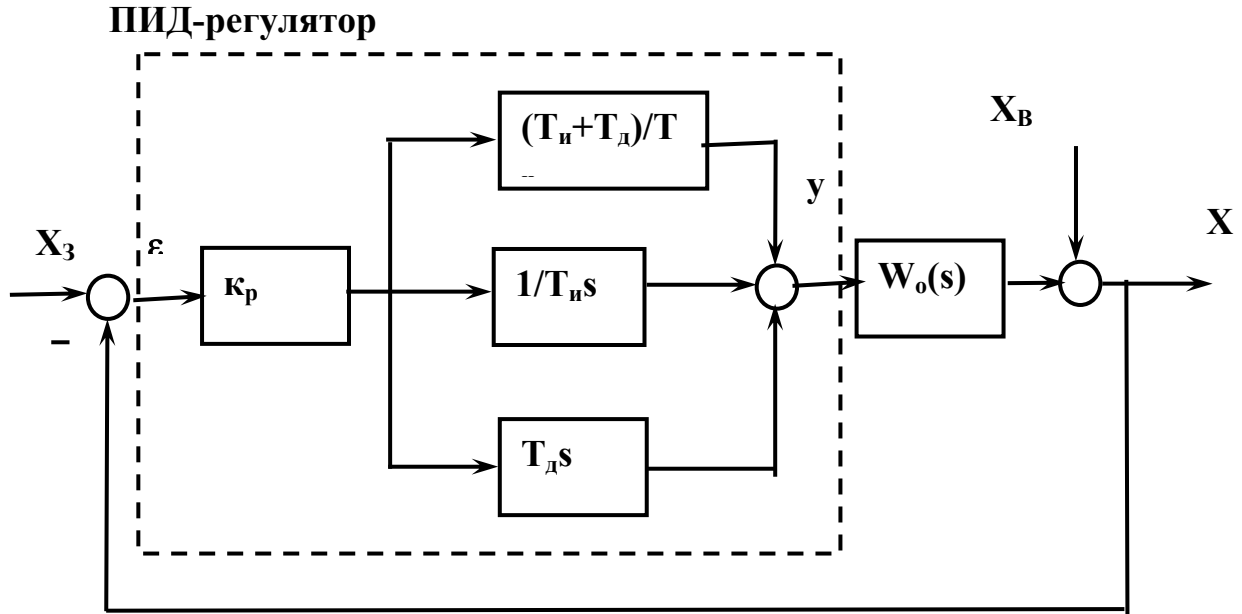


Рис. 2. Одноконтурная САУ с ПИД-регулятором

Изложим сущность метода оптимизации амплитудной характеристики для расчета параметров настройки типовых регуляторов, используемых для управления следующими объектами без запаздывания [2]:

$$W_0(s) = k_0/s(T_{01}s + 1), \quad (7)$$

$$W_0(s) = k_0/(T_{01}s + 1)(T_{02}s + 1), \quad (8)$$

$$W_0(s) = k_0/s(T_{01}s + 1)(T_{02}s + 1), \quad (9)$$

$$W_0(s) = k_0/(T_{01}s + 1)(T_{02}s + 1)(T_{03}s + 1), \quad (10)$$

где $T_{01} < T_{02} < T_{03}$, причем в общем случае сомножитель с наименьшей постоянной времени T_{01} приближенно заменяет собой несколько инерционных звеньев с еще более малыми постоянными времени T_{0i} .

В зависимости от типа и порядка (7) – (10), а также соотношений между их постоянными времени, настройка контура регулирования осуществляется либо по критерию МО, либо по критерию СО (табл. 1).

Настройочные параметры регуляторов κ_p , T_u и T_d , обеспечивающие получение определенных показателей качества, будем называть *гарантирующими*.

Если у объекта второго порядка (8) $T_{02} \leq 4T_{01}$, то предпочтителен критерий МО. Для выполнения требований критерия применяют ПИ-регулятор, где $T_d = 0$

$$W_p(s) = \kappa_p (T_u s + 1) / T_u s \quad (11)$$

с постоянной времени интегрирования T_u , равной наибольшей постоянной времени объекта $T_u = T_{02}$. Тем самым достигается полная компенсация этой наибольшей постоянной времени.

Таблица 1

Передаточная функция объекта $W_o(p)$	Условия применения	Критерий	Параметры регулятора		
			κ_p	T_u	T_∂
$\frac{k_0}{(T_{01}p+1)(T_{02}p+1)}$ $(T_{01} < T_{02})$	$T_{02} \leq 4T_{01}$	МО	$\frac{T_{02}}{2k_0 T_{01}}$	T_{02}	–
	$T_{02} \geq 4T_{01}$	СО	$\frac{T_{02}}{2k_0 T_{01}}$	$4T_{01}$	–
$\frac{k_0}{p(T_{01}p+1)(T_{02}p+1)}$	$T_{02} \ll T_{01}$	СО	$\frac{1}{2k_0 T_{01}}$	$4T_{01}$	–
	$T_{01} < T_{02}$	СО	$\frac{1}{2k_0 T_{01}}$	$4T_{01}$	T_{02}
$\frac{k_0}{(T_{01}p+1)(T_{02}p+1)(T_{03}p+1)}$ $(T_{01} < T_{02} < T_{03})$	$T_{03} \leq 4T_{01}$	МО	$\frac{T_{03}}{2k_0 T_{01}}$	T_{03}	T_{02}
	$T_{03} \geq 4T_{01}$	СО	$\frac{T_{03}}{2k_0 T_{01}}$	$4T_{01}$	T_{02}
	$T_{02} \geq 4T_{01}$	СО	$\frac{T_{02} T_{03}}{8k_0 T_{01}^2}$	T_{02}	$4T_{03}$

Передаточная функция разомкнутого контура принимает вид

$$W(s) = W_p(s)W_0(s) = \kappa_p \kappa_0 / [T_u s(T_{01} s + 1)] \quad (12)$$

и совпадает с передаточной функцией разомкнутого контура колебательной модели, для которой критерий МО сводится к условию $\xi = 0.7$. Отсюда в соответствии с ранее приведенными формулами для колебательной модели $\kappa T_{01} = 1/4\xi^2$; $T_{01} = T/2\xi$ находим

$$\kappa = 1 / 4 \xi^2 T_{01} = 1 / 2 T_{01}. \quad (13)$$

Учитывая, что для рассматриваемого контура с ПИ-регулятором согласно (12):

$$\kappa = \kappa_p \kappa_0 / T_u \text{ и } T_u = T_{02}, \quad (14)$$

получим, кроме (13), второе условие настройки на МО:

$$\kappa_p = T_{02}/2\kappa_0 T_{01}. \quad (15)$$

На рис. 3, а показаны логарифмическая амплитудно-частотная характеристика разомкнутого контура и переходная характеристика замкнутой системы с объектом (10) и ПИ-регулятором, настроенным на МО.

На рис. 3, б приведены логарифмическая амплитудно-частотная характеристика и переходная характеристика разомкнутой системы, настроенной на симметричный оптимум. Из рис. 3, б видно, что логарифмическая амплитудно-частотная характеристика имеет симметричную форму, поэтому подход к выбору настроек регулятора получил название симметричного оптимума. Переходный процесс в одноконтурной замкнутой системе при этом характеризуется большим перерегулированием.

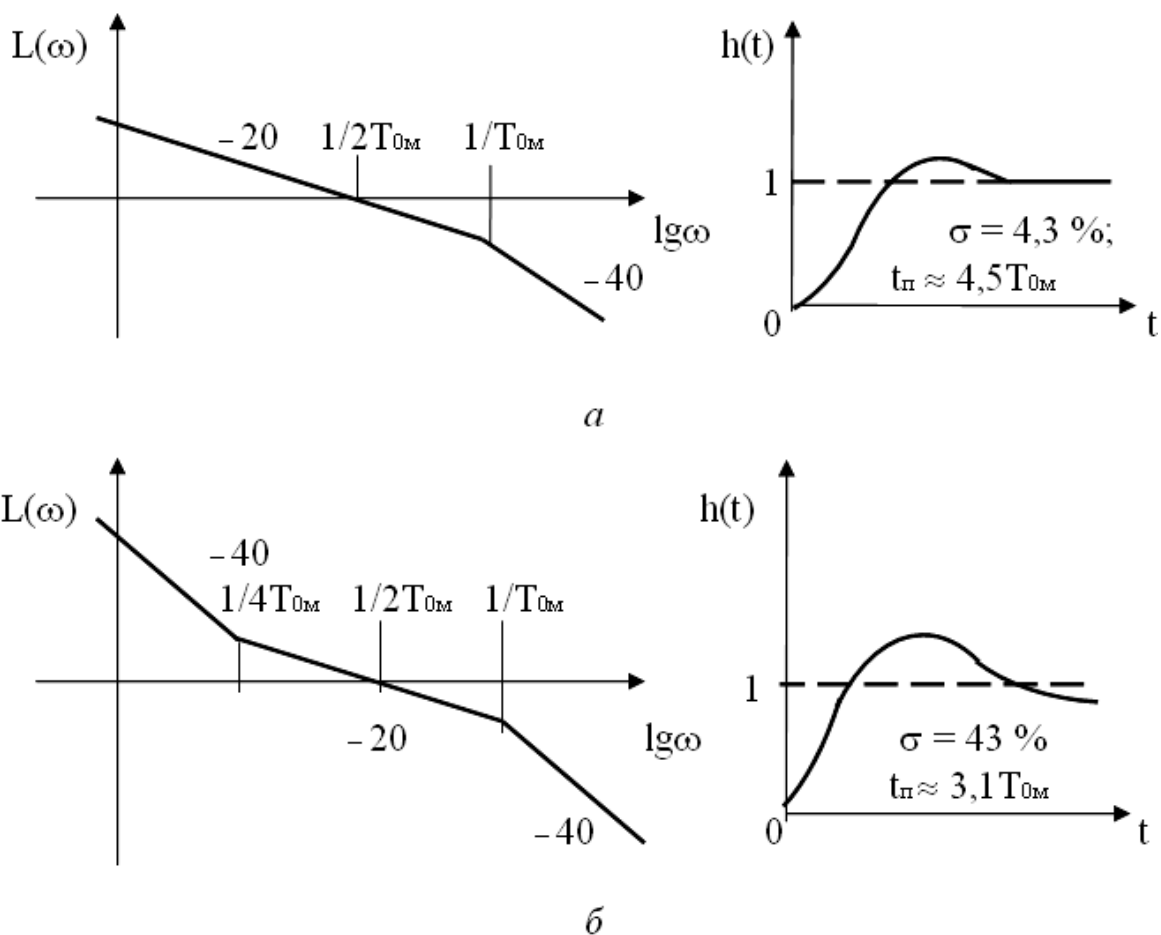


Рис. 3. Частотные и переходные характеристики одноконтурной системы регулирования, настроенной по критериям модульного (а) и симметричного (б) оптимумов

Выводы о влиянии критериев настройки и параметров регулятора на показатели переходного процесса:

1. Увеличение передаточного коэффициента k_p приводит к уменьшению перерегулирования σ .
2. Увеличение постоянной интегрирования T_u приводит к увеличению времени переходного процесса и снижению перерегулирования.
3. Критерий МО предпочтителен при оптимизации систем, обрабатывающих в основном задающее воздействие.
4. Критерий СО целесообразно применять при настройке стабилизирующих систем, обрабатывающих в основном возмущающее воздействие.

3. Задание для выполнения работы

1. Изучить основные законы регулирования.
2. Изучить структуры регуляторов, соответствующих законам регулирования.
3. Произвести выбор типа регулятора в зависимости от структуры объекта управления и расчет настроечных параметров регулятора.
4. Провести экспериментальное исследование свойств САУ с различными типами регуляторов.

4. Программа и порядок выполнения работы

1. Набрать структурную схему одноконтурной замкнутой САУ с ПИД-регулятором в среде программы CLASSIC-3 (рис. 4). Передаточную функцию по возмущающему воздействию установить равной

$$W_B(s) = 0.1 / (s + 2.2s^2 + 1.2s^3) = W_8.$$

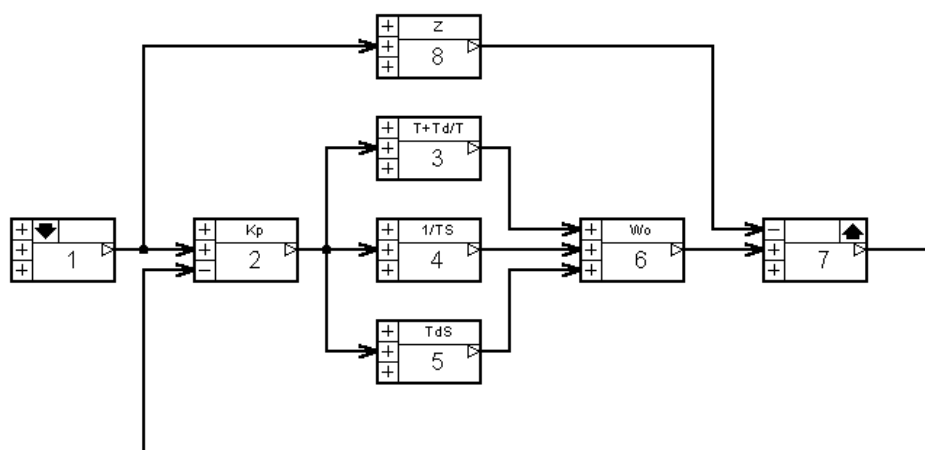


Рис. 4. Структурная схема одноконтурной САУ

2. Возмущающее воздействие установить равным нулю, а обратную связь установить единичной.
3. Отредактировать передаточную функцию объекта управления $W_6 = W_O$ согласно (8) по заданному варианту табл. 2.

Таблица 2

№ варианта	1	2	3	4	5	6	7	8
K_0	10	11	15	14	13	12	10	9
T_{01}	0,10	0,12	0,14	0,15	0,11	0,14	0,15	0,12
T_{02}	0,30	0,36	0,42	0,45	0,33	0,36	0,40	0,30

4. Определить по табл. 1 тип регулятора по соотношению T_{02} и T_{01} критерий оптимума и рассчитать настроечные параметры регулятора K_p , T_u , T_d . Если дифференциальная составляющая T_d в регуляторе не должна присутствовать, то ее передаточная функция W_5 в структурной схеме приравнивается нулю. Данные занести в табл. 3.

5. Снять переходный процесс в системе и определить его длительность и перерегулирование σ при возмущающих воздействиях $Z = 0$ и $Z = 1$. График переходного процесса зарисовать или скопировать программно-аппаратными средствами компьютера.

6. Разомкнуть систему (рис. 5).

7. Снять логарифмическую амплитудно-частотную характеристику разомкнутой САУ. Оценить запасы устойчивости.

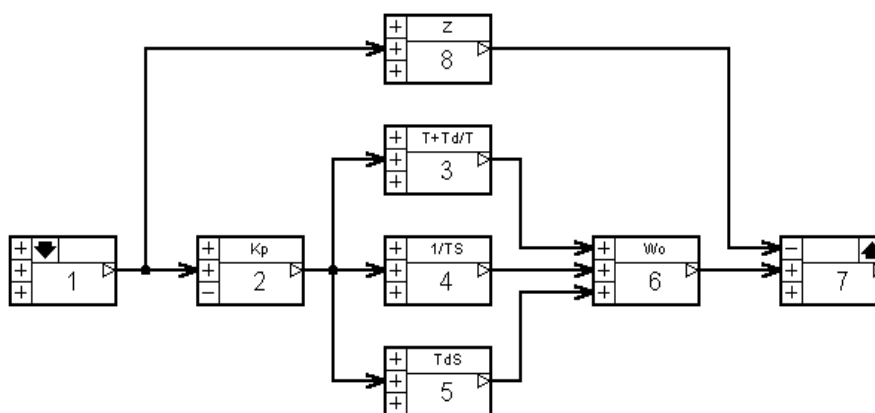
8. Определить частоты среза $\omega_{ср}$ и сопряжения $\omega_{сопр}$. Проверить соответствие $\omega_{ср} = 1/2T_{01}$, $\omega_{сопр} = 1/T_{01}$ (см. рис. 3, а).

Таблица 3

Настроечный параметр	Расчетная формула	Расчетное значение	Критерий оптимума
K_p			
T_u			
T_d			

9. Отредактировать передаточную функцию (9) объекта управления W_6 согласно заданному в табл. 2 варианту.

10. Выполнить задания по пунктам 3, 4 и 5.

Рис. 5. Структурная схема разомкнутой САУ для $Z = 0$

5. Содержание отчета

В отчете привести задание на выполнение лабораторной работы, структурные схемы исследуемых систем, расчеты настроечных параметров регуляторов, экспериментальные переходные характеристики, логарифмические амплитудно-частотные характеристики, выводы и ответы на вопросы.

6. Вопросы

1. Как называются основные законы регулирования?
2. Какими достоинствами и недостатками характеризуется каждый из законов регулирования?

ЛАБОРАТОРНАЯ РАБОТА № 9 НАСТРОЙКА ТИПОВЫХ РЕГУЛЯТОРОВ ОБЪЕКТОВ С ЗАПАЗДЫВАНИЕМ

1. Цель работы

Изучение методики определения структуры и параметров типовых регуляторов, обеспечивающих заданные показатели качества САУ с объектами управления с запаздыванием.

2. Краткие теоретические сведения

Наличие запаздывания в объекте управления в значительной степени влияет на устойчивость замкнутой системы в сторону снижения запаса устойчивости. Для компенсации влияния запаздывания и повышения точности регулирования применяют регуляторы, приближающиеся по своим свойствам к так называемым идеальным регуляторам для объектов с запаздыванием [2]. Одним из таких идеальных регуляторов является регулятор Ресквики, имеющий при отсутствии помех на входе системы передаточную функцию:

$$W_{pu}(s) = \frac{1}{1 - e^{-s\tau_0}} \cdot \frac{1}{W_o'(s)}, \quad (1)$$

где τ_0 – полное запаздывание, $W_o'(s)$ – передаточная функция инерционной части объекта управления, имеющего общую передаточную функцию

$$W_o(s) = W_o'(s)e^{-s\tau_0}. \quad (2)$$

На рис. 1 показана структурная схема одноконтурной системы с регулятором Ресквики.

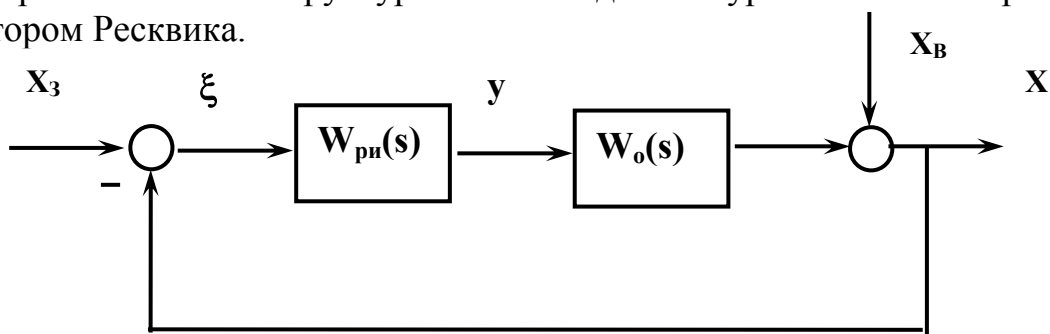


Рис. 1. Структурная схема одноконтурной САУ

На практике наиболее часто инерционные статические объекты имеют переходные характеристики $h(t)$ S-образной формы (рис. 2).

S-образную переходную характеристику, снятую экспериментальным путем, можно охарактеризовать параметрами, определяемыми непосредственно по графику: коэффициентом передачи k_0 , постоянной

времени T_0 и полным запаздыванием τ_0 , которое равно сумме чистого запаздывания τ_1 и переходного запаздывания τ_2 [2].

Параметры T_0 и τ_0 определяются проведением касательной к наиболее крутому участку переходной характеристики.

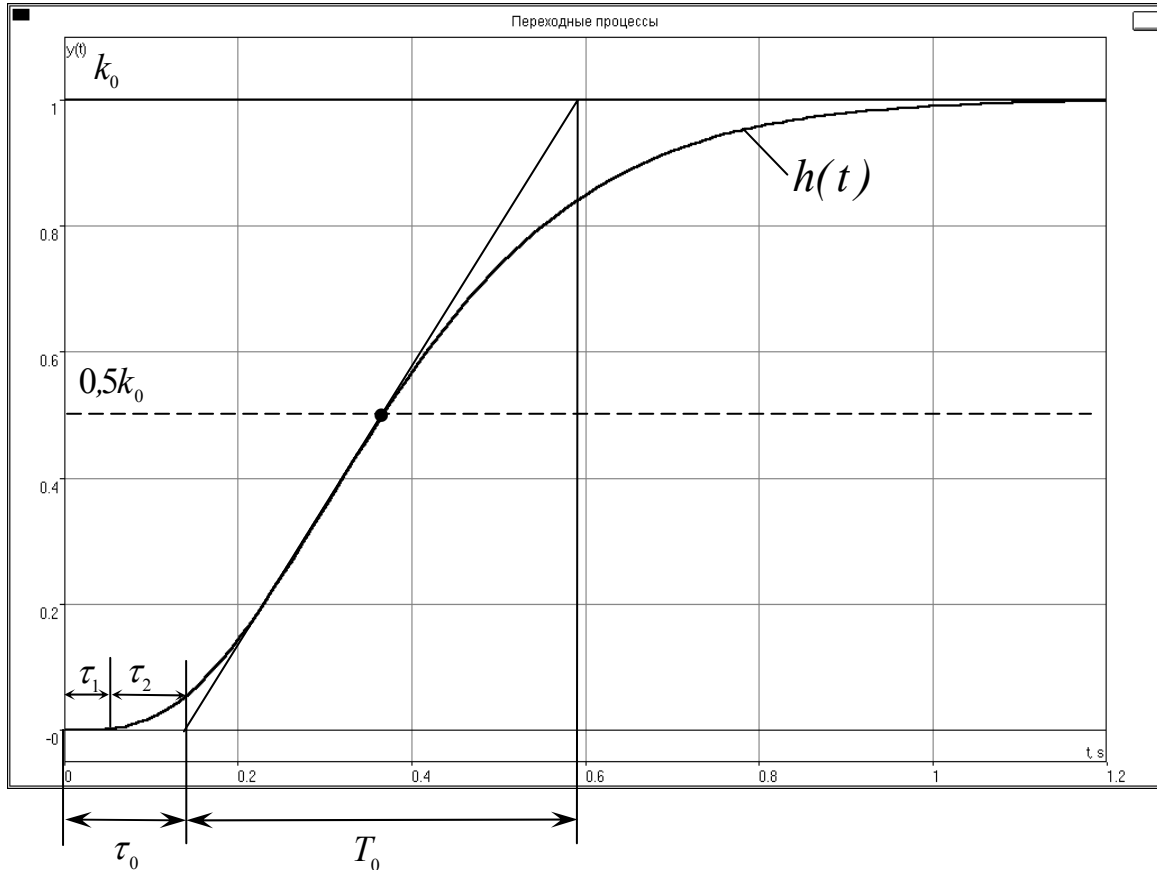


Рис. 2. Переходная характеристика объекта управления

Таким образом, объекты с S-образной переходной характеристикой, наряду с объектами с чистым запаздыванием, можно приближенно рассматривать так же, как объекты с запаздыванием.

При выборе настроечных параметров САУ используют либо непосредственно вышеперечисленные параметры, либо упрощенные модели объекта, коэффициенты которых выражаются через указанные экспериментальные параметры. Использование упрощенных моделей значительно облегчает процедуру выбора настроечных параметров.

Если известно, что объект управления состоит из n одинаковых объектов первого порядка, соединенных последовательно, то наилучшее приближение к S-образной характеристике обеспечивает передаточная функция

$$W_0(s) = \frac{k_0 e^{-s\tau_0}}{(T_0 s + 1)^n}. \quad (3)$$

Модель (3) удобна для исследования САУ с применением средств вычислительной техники.

Постоянную времени T_{0i} и порядок n модели можно вычислить по экспериментальным параметрам T_0 и τ_2 (или τ_0) с помощью приведенных в табл. 1 соотношений [2].

Таблица 1

Связь параметров S-образной переходной характеристики с параметрами аппроксимирующей модели

n	$\frac{\tau_2}{T_0}$	$\frac{T_0}{T_{0i}}$	$\frac{\tau_2}{T_{0i}}$	n	$\frac{\tau_2}{T_0}$	$\frac{T_0}{T_{0i}}$	$\frac{\tau_2}{T_{0i}}$
1	0,000	1,00	0,00	7	0,595	6,22	3,70
2	0,107	2,72	0,29	8	0,673	6,71	4,52
3	0,222	3,69	0,82	9	0,745	7,16	5,34
4	0,323	4,46	1,44	10	0,816	7,59	6,20
5	0,420	5,12	2,15	11	0,871	7,99	7,04
6	0,518	5,69	2,95	12	0,942	8,38	7,90

Модель (3) дает удовлетворительную аппроксимацию и в тех случаях, когда объект состоит из неодинаковых звеньев, если количество звеньев не меньше трех, а постоянные времени незначительно отличаются друг от друга.

Если подставить передаточную функцию (3) модели второго порядка ($n = 2$) в передаточную функцию идеального регулятора (1) и произвести приближенную замену $e^{-s\tau_0} \approx 1 - s\tau_0$, то для медленных воздействий передаточная функция регулятора будет иметь вид

$$W_p(s) = \frac{T_{0i}^2 s}{k_0 \tau_0} + \frac{1}{k_0 \tau_0 s} + \frac{2T_{0i}}{k_0 \tau_0}. \quad (4)$$

Передаточную функцию (4) можно привести к виду

$$W_p(s) = \frac{2T_{0i}}{k_0 \tau_0} \left(1 + \frac{1}{2T_{0i}} \cdot \frac{1}{s} + \frac{T_{0i}}{2} s \right) = k_p \left(\frac{1}{T_u s} + T_\partial s + 1 \right), \quad (5)$$

где

$$k_p = \frac{2T_{0i}}{k_0 \tau_0}, \quad T_u = 2T_{0i}, \quad T_\partial = \frac{T_{0i}}{2}.$$

Формула (5) показывает, что наилучшим для аппроксимирующей модели (3) будет ПИД-регулятор с параметрами настройки согласно (5).

Можно указать эмпирические формулы для определения параметров ПИД-регулятора [2]:

$$k_p = \frac{0,74T_0}{k_0 \tau_0}, \quad T_u = 0,74T_0, \quad T_\partial = 0,18T_0. \quad (6)$$

В табл. 2 по результатам моделирования обобщены эмпирические формулы настроек ПИД-регуляторов на заданные показатели качества модели (3) по каналу задающего x_3 и управляющего y воздействий.

Таблица 2

Обобщенный параметр контура	По каналу $x_3 - x$		По каналу $y - x$	
	$\sigma = 0$	$\sigma = 20 \%$	$\sigma = 0$	$\sigma = 20 \%$
$k_p k_0 \tau_0 / T_0 =$	0,60	0,95	0,95	1,20
$k_p k_0 \tau_0 / T_0$	1,00	1,35	2,40	2,00
$T_\partial / \tau_0 =$	0,50	0,47	0,42	0,42

3. Задание на выполнение работы

1. Изучить особенности работы замкнутых САУ, у которых объект управления имеет запаздывание.
2. Для замкнутой САУ с заданной передаточной функцией объекта управления выполнить расчет настроечных параметров ПИД-регулятора.
3. Провести экспериментальное исследование свойств САУ с расчетными параметрами ПИД-регулятора.
4. Сравнить переходные характеристики и прямые оценки качества управления одним и тем же объектом в системах с П-регулятором и ПИД-регулятором при одном и том же коэффициенте передачи регуляторов k_p .

4. Порядок выполнения работы

1. В окне редактирования моделирующей программы CLASSIC-3 поместить звено (рис. 3), назначить его входным и выходным и отредактировать передаточную функцию объекта управления согласно заданному преподавателем варианту (табл. 3).

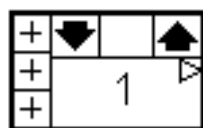


Рис. 3. Звено (объект управления)

2. Распечатать переходную характеристику $h(t)$ объекта управления на принтере или сохранить ее другим способом. Оценить показатели качества переходного процесса объекта управления.
3. По переходной характеристике определить параметры модели второго порядка T_0 и τ_0 согласно рис. 2.

Таблица 3

№ варианта	Передаточная функция объекта управления
1	$W_0(s) = \frac{1}{1 + 0.3s + 0.03s^2 + 0.001s^3}$
2	$W_0(s) = \frac{1}{1 + 3s + 3s^2 + s^3}$
3	$W_0(s) = \frac{1}{1 + 0.3s + 0.03s^2 + 0.001s^3}$
4	$W_0(s) = \frac{1}{1 + 6.75s + 4.5s^2 + 3.375s^3}$
5	$W_0(s) = \frac{1}{1 + 0.4s + 0.06s^2 + 0.004s^3 + 0.0001s^4}$

4. По формулам (6) рассчитать параметры настройки ПИД-регулятора.

5. Набрать структурную схему замкнутой одноконтурной САУ (рис. 4) и отредактировать передаточные функции ее элементов в соответствии с расчетными значениями. Передаточную функцию входного звена принять единичной.

6. Снять переходную характеристику для рис. 4 и определить показатели качества управления. Результаты зафиксировать в виде таблицы.

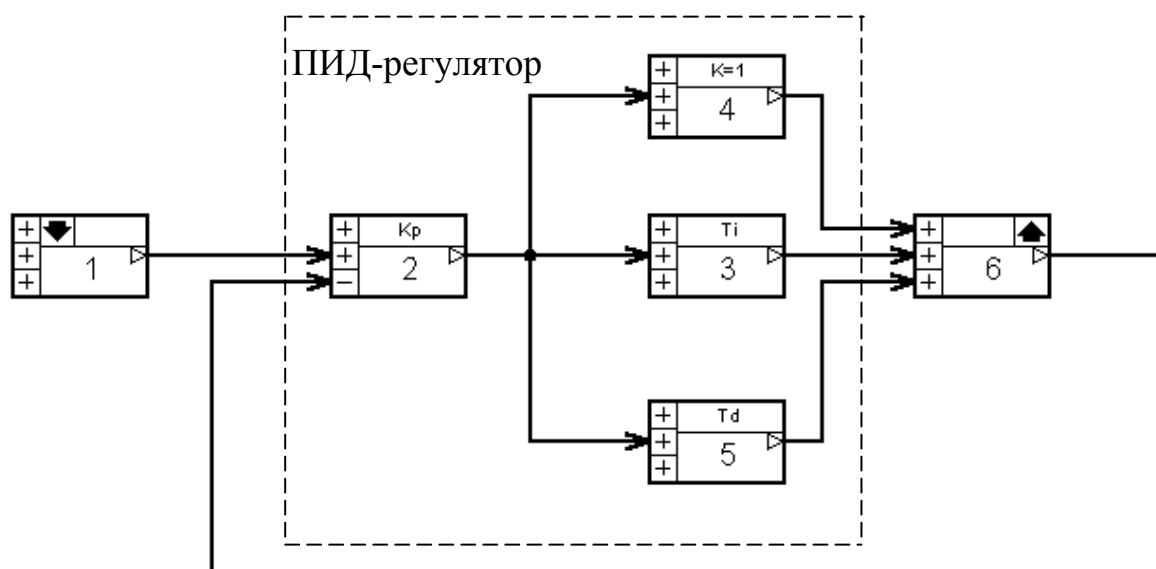


Рис. 4. Структурная схема САУ

7. Установить нулевые значения числителей передаточных функций звеньев 3 и 5 структурной схемы (преобразование ПИД-регулятора в П-регулятор).

8. Снять переходную характеристику и определить показатели качества управления замкнутой САУ с П-регулятором. Зафиксировать результаты в виде таблицы.

9. Сравнить результаты экспериментов и сделать выводы.

5. Содержание отчета

В отчете привести задание на выполнение лабораторной работы, экспериментальную переходную характеристику объекта управления с необходимыми графическими построениями для определения параметров модели второго порядка, расчеты настроечных параметров регуляторов, структурные схемы исследуемых систем, экспериментальные переходные характеристики исследуемых САУ, показатели качества управления, выводы и ответы на вопросы.

6. Вопросы

1. Чем может быть обусловлено запаздывание в объекте управления?

2. Какое влияние на свойства замкнутых САУ оказывает запаздывание в передаточной функции объекта управления?

3. Как осуществляется компенсация влияния запаздывания в объекте управления?

4. Можно ли компенсировать влияние запаздывания в переходном процессе при быстро изменяющемся задающем воздействии?

5. Почему идеальный регулятор Ресквика нельзя реализовать практически?

ЛАБОРАТОРНАЯ РАБОТА № 10

ИССЛЕДОВАНИЕ САУ В ПРОСТРАНСТВЕ СОСТОЯНИЙ

1. Цель работы

Разработка моделей для исследования характеристик систем автоматического управления в пространстве состояний.

2. Краткие теоретические сведения

Для записи систем дифференциальных уравнений, представляющих анализируемую систему управления, в некоторых случаях удобно пользоваться матричными обозначениями. Особенно это относится к многомерным элементам, которыми часто являются объекты управления.

Одним из способов описания элементов в векторно-матричной форме является описание *в переменных состояния*. Уравнение состояния линейного объекта записывается в виде векторного дифференциального уравнения в форме Коши.

Пусть объект, имеющий один вход и один выход, описывается передаточной функцией

$$W(s) = \frac{x(s)}{y(s)} = \frac{b_0 s^m + b_1 s^{m-1} + \dots + b_m}{a_0 s^n + a_1 s^{n-1} + \dots + a_n}, \quad (m = n - 1). \quad (1)$$

По передаточной функции (1) запишем операторное уравнение

$$(a_0 p^n + a_1 p^{n-1} + \dots + a_n)x(t) = (b_0 p^m + b_1 p^{m-1} + \dots + b_m)y(t) \quad (2)$$

и преобразуем его к нормальной форме Коши. Для этого введем вспомогательную переменную $x_1(t)$ и запишем уравнение (2) в форме пропорции

$$\frac{x(t)}{b_0 p^m + b_1 p^{m-1} + \dots + b_m} = \frac{y(t)}{a_0 p^n + a_1 p^{n-1} + \dots + a_n} = x_1(t). \quad (3)$$

Из (3) можно составить два уравнения (перемножив по диагонали числители на знаменатели первых двух членов выражения и поочередно приравняв их $x_1(t)$):

$$(b_0 p^m + b_1 p^{m-1} + \dots + b_m)x_1(t) = x(t), \quad (4)$$

$$(a_0 p^n + a_1 p^{n-1} + \dots + a_n)x_1(t) = y(t). \quad (5)$$

Обозначим $x'_1(t) = x_2(t)$; $x'_2(t) = x_3(t)$; ...; $x'_{n-1}(t) = x_n(t)$,

т. е.

$$x'_i(t) = x_{i+1}(t) \quad (i = 1; 2; 3; \dots; n-1). \quad (6)$$

С учетом (6) уравнение (5) преобразуется к виду

$$a_0 x'_n(t) + a_1 x_n(t) + a_2 x_{n-1}(t) + \dots + a_n x_1(t) = y(t), \quad (7)$$

откуда

$$x'_n(t) = -a_0^{-1} [a_1 x_n(t) + a_2 x_{n-1}(t) + \dots + a_n x_1(t)] + a_0^{-1} y(t). \quad (8)$$

Объединив (8) с (6), получим систему дифференциальных уравнений первого порядка

$$\left. \begin{aligned} x'_1(t) &= x_2(t), \\ x'_2(t) &= x_3(t), \\ x'_3(t) &= x_4(t), \\ &\dots \\ x'_n(t) &= -a_0^{-1} [a_1 x_n(t) + a_2 x_{n-1}(t) + \dots + a_n x_1(t)] + a_0^{-1} y(t). \end{aligned} \right\} \quad (9)$$

Система уравнений (9) может быть записана в виде векторного дифференциального уравнения в форме Коши:

$$x'(t) = Ax(t) + By(t), \quad (10)$$

где $x(t)$ – вектор состояния с компонентами $x_1(t), x_2(t), \dots, x_n(t)$, называемыми переменными состояния объекта;

$y(t)$ – вектор управления с компонентами $y_1(t), y_2(t), \dots, y_m(t)$;

$A = [a_{ij}]_{n \times n}$; $B = [b_{ij}]_{n \times 1}$ – матрицы постоянных коэффициентов, зависящих от конструктивных параметров объекта.

Для матричного уравнения (10) матрицы имеют вид

$$A = \begin{bmatrix} 0 & 1 & 0 & \dots & 0 \\ 0 & 0 & 1 & \dots & 0 \\ \dots & \dots & \dots & \dots & \dots \\ \frac{-a_n}{a_0} & \frac{-a_{n-1}}{a_0} & \dots & \dots & \frac{-a_1}{a_0} \end{bmatrix}_{n \times n}; \quad B = \begin{bmatrix} 0 \\ 0 \\ \cdot \\ \cdot \\ \frac{1}{a_0} \end{bmatrix}_{n \times 1}. \quad (11)$$

Системе уравнений (10) соответствует модель динамического объекта, представленная на рис. 1.

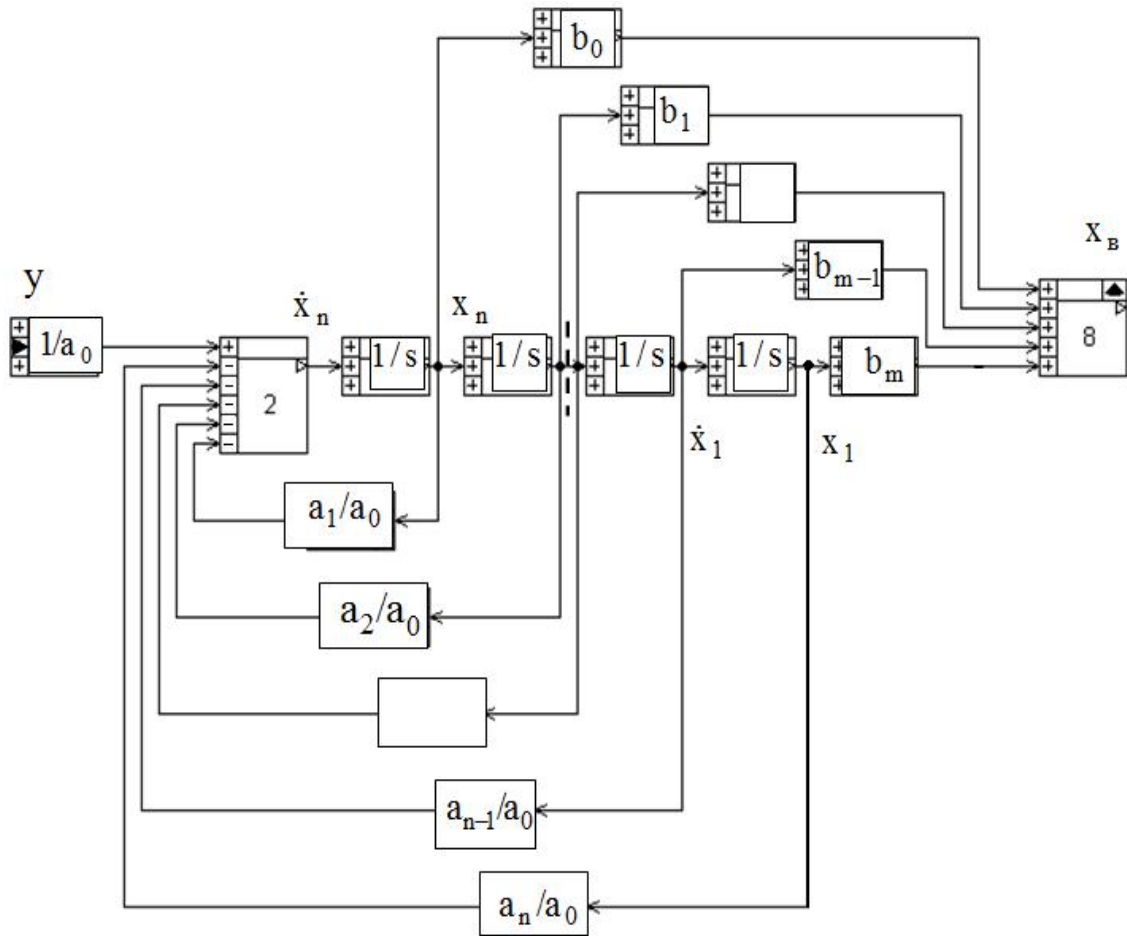


Рис. 1. Модель объекта в переменных состояния

На модели идеальные интегрирующие звенья устанавливают связь между переменными состояния и их первыми производными.

Если на входе объекта действуют возмущения $z_i(t)$, то уравнение состояния объекта будет иметь вид

$$\dot{x}'(t) = Ax(t) + By(t) + z(t), \quad (12)$$

где $z(t)$ – вектор возмущений с компонентами $z_1(t), z_2(t), \dots, z_n(t)$.

Системы, которые можно записать в виде (10) и (12), называются *линейными системами*. Переменные x_1, x_2, \dots, x_n в любой момент времени определяют состояние системы. Если переменные состояния связаны между собой соотношением (6), то они называются *фазовыми переменными*.

Пространство состояний можно определить как n -мерное евклидово пространство, по осям которого откладываются переменные состояния. Соответствующий способ описания называется *методом пространства состояний*.

3. Пояснения к работе

На рис. 2 приведена упрощенная схема исследуемой следящей системы отработки угла поворота вала входного датчика (см. также лабораторную работу № 5). Регулируемой величиной является угол поворота $\theta_{вых}$ управляемого объекта 2. Приводной двигатель 3 питается от ЭМУ 1. Входное воздействие подается на сельсин-датчик 5 в виде угла поворота $\theta_{вх}$ его ротора. Соединенные по трансформаторной схеме сельсин-датчик и сельсин-приемник 4, механически связанный с управляемым объектом, вырабатывают напряжение, пропорциональное рассогласованию $\xi = \theta_{вх} - \theta_{вых}$ между входным и выходным валами следящей системы. Напряжение ошибки усиливается усилителем У и электромашинным усилителем 1 (АМР) и поступает на якорь исполнительного двигателя 3 (М), вращающего одновременно объект 2 и ротор сельсин-приемника до тех пор, пока рассогласование не станет равным нулю.

Передаточную функцию ЭМУ можно представить как

$$W_{ЭМУ}(s) = \frac{K_{ЭМУ}}{(T_{ВХ} \cdot s + 1)(T_{ЭМУ} \cdot s + 1)}$$

где $K_{ЭМУ} = u_{ЭМУ} / I_{вх} r_{вх}$, $T_{ЭМУ} = L_1 / r_1$, $T_{вх} = L_{вх} / r_{вх}$, $I_{вх}$ – ток обмотки управления, $L_{вх}$ – индуктивность обмотки управления, $r_{вх}$ – сопротивление обмотки управления, $T_{вх}$ – постоянная времени обмотки управления, L_1, r_1 – индуктивность и сопротивление короткозамкнутого контура ЭМУ, $T_{ЭМУ}$ – постоянная времени короткозамкнутого контура ЭМУ

Исходные данные схемы по вариантам приведены в табл. 1.

В таблице приняты обозначения:

$T_{вх}$ (с) – постоянная времени обмотки управления ЭМУ;

$T_{ЭМУ}$ (с) – постоянная времени короткозамкнутого контура ЭМУ;

$K_{ЭМУ}$ – коэффициент передачи ЭМУ;

K_y – коэффициент передачи усилителя У;

$c = E_0 / \omega$ (В·с) – конструктивный коэффициент двигателя;

R_y (Ом) – сопротивление цепи обмотки якоря двигателя;

J (Н·м·с²) – момент инерции вращающихся масс, приведенный к валу двигателя.

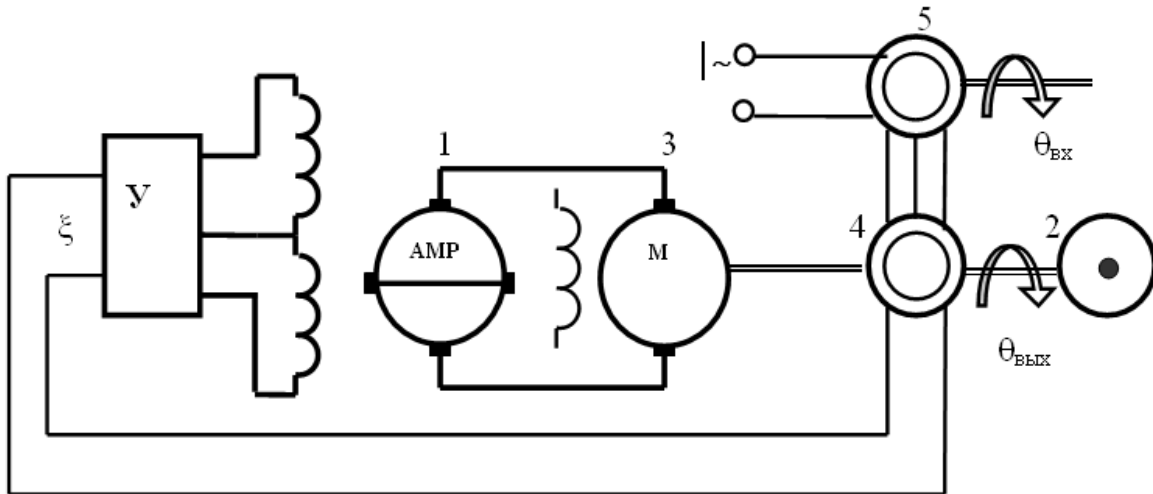


Рис. 2. Схема следящей системы

Таблица 1

№ вар.	1	2	3	4	5
Данные					
$T_{\text{вх}}$	0,10	0,11	0,12	0,13	0,14
$T_{\text{эму}}$	0,05	0,03	0,04	0,02	0,05
$K_{\text{эму}}$	2,0	2,0	2,0	2,0	2,0
$K_{\text{у}}$	4,0	3,0	5,0	3,5	4,5
$R_{\text{я}}$	0,1	0,15	0,12	0,2	0,15
c	1,2	1,8	1,5	1,2	1,4
J	0,5	0,7	0,4	0,6	0,2

Примечание. Электромагнитной инерцией двигателя пренебречь.

Исследуемой САУ соответствует структурная схема, приведенная на рис. 3. На схеме обозначены: $K_{\text{у}}$ – коэффициент усиления усилителя У, $\theta_{\text{вх}}(s)$ – изображение входного воздействия, $W_{\text{эму}}(s)$ – передаточная функция ЭМУ, $W_{\text{д}}(s)$ – передаточная функция двигателя по углу поворота.

При пренебрежении электромагнитной инерцией цепи якоря двигателя его передаточную функцию по управлению можно представить как

$$W_{\text{д}}(s) = \frac{K}{s(T_{\text{м}}s + 1)},$$

где

$$K = \frac{1}{c}, \quad T_{\text{м}} = \frac{JR_{\text{я}}}{c^2}.$$

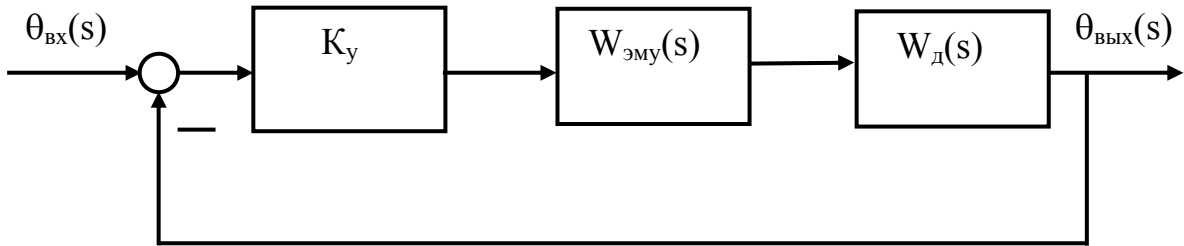


Рис. 3. Структурная схема САУ

4. Программа работы

1. Изучить краткие теоретические сведения по представлению модели системы автоматического управления в переменных состояния.
2. Исследовать свойства следящей системы по структурной схеме, содержащей звенья с нормированными передаточными функциями.
3. Исследовать свойства следящей системы по структурной схеме, соответствующей переменным состояния.
4. Сравнить результаты исследований и представить отчет.

5. Порядок выполнения работы

1. В соответствии с заданным вариантом параметров определить передаточные функции звеньев исследуемой следящей системы.
2. Привести передаточные функции к виду, соответствующему форме их представления в среде CLASSIC-3.
3. Набрать структурную схему следящей системы согласно рис. 3 в среде CLASSIC-3.
4. Снять динамическую $h(t)$ и частотные характеристики $A(\omega)$ и $\varphi(\omega)$.
5. При помощи программы CLASSIC-3 определить выражение для передаточной функции замкнутой системы согласно структурной схеме.
6. По передаточной функции замкнутой системы составить уравнения и набрать в среде CLASSIC-3 модель системы в переменных состояния согласно общей схеме, представленной на рис. 1.
7. По модели системы в переменных состояния снять динамическую $h(t)$ и частотные характеристики $A(\omega)$ и $\varphi(\omega)$.
8. Сравнить динамические и частотные характеристики, определенные по двум различным моделям, и установить факт их адекватности.

6. Содержание отчета

В отчете необходимо привести задание для выполнения лабораторной работы, структурную схему исследуемой системы с передаточными функциями ее отдельных элементов, экспериментальные и расчетные графики, данные по результатам экспериментов и результаты обработки данных, сделать необходимые заключения и ответить на поставленные вопросы.

7. Вопросы

1. Какие определения имеют пространство состояний и переменные состояния?
2. Что представляет собой вектор состояния?
3. Что представляет собой вектор управления?
4. В каком случае переменные состояния называются фазовыми переменными?

ЛАБОРАТОРНАЯ РАБОТА № 11

ИССЛЕДОВАНИЕ ЗАМКНУТОЙ СИСТЕМЫ РЕГУЛИРОВАНИЯ СКОРОСТИ БЕСКОНТАКТНОГО ДВИГАТЕЛЯ ПОСТОЯННОГО ТОКА

1. Цель работы

Изучение принципа построения и свойств замкнутой системы регулирования скорости бесконтактного двигателя постоянного тока.

2. Основные сведения

Широко распространенные в автоматизированных электроприводах коллекторные двигатели постоянного тока характеризуются невысоким ресурсом работы из-за наличия щеточно-коллекторного узла, высоким уровнем радиопомех и необходимостью частого проведения регламентных работ по замене щеток.

Указанные недостатки обусловили появление бесконтактных двигателей постоянного тока, в которых роль коллекторно-щеточного узла выполняет транзисторный коммутатор, управляемый датчиком положения.

Характерными особенностями бесконтактных двигателей постоянного тока являются:

- наличие силовой обмотки якоря, расположенной на статоре и состоящей из нескольких катушек, сдвинутых относительно друг друга в пространстве (одна катушка соответствует фазной обмотке синхронного двигателя) и ротора, выполненного из магнитотвердого материала;
- наличие бесконтактных датчиков положения оси магнитного потока ротора по отношению к осям силовой обмотки статора (трансформаторных, индукционных, фотоэлектрических, на элементах Холла);
- наличие бесконтактного, чаще всего транзисторного, коммутатора, осуществляющего коммутацию катушек силовой обмотки статора по сигналам с датчиков положения.

Эти три фактора позволяют при устранении скользящего контакта коллектор-щеточки сохранить основную особенность машины постоянного тока по сравнению с машиной переменного тока: частота переключения катушек обмотки якоря определяется угловой скоростью ротора, т.е. регулируется самой машиной. Благодаря этому бесконтактный двигатель постоянного тока в основном сохраняет характеристики коллекторного двигателя с независимым возбуждением.

Как и у обычного магнитоэлектрического двигателя постоянного тока, скорость вращения бесконтактного двигателя постоянного тока (БДПТ) может регулироваться изменением питающего напряжения и

введением добавочного сопротивления в цепь якоря. Последний способ в автоматических системах практически не применяется.

Механические характеристики БДПТ при изменении напряжения питания якоря приведены на рис. 1. Это семейство параллельных прямых.

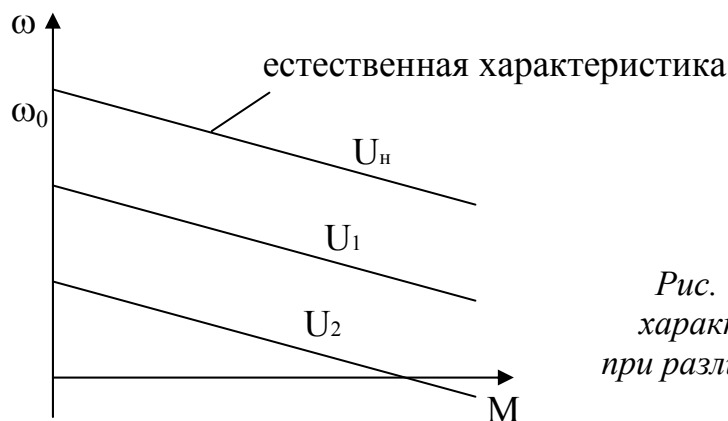


Рис. 1. Механические характеристики БДПТ при различных напряжениях питания

Как и у всех двигателей, напряжение, приложенное к его обмоткам, не должно превышать своего номинального значения в силу обеспечения надежности изоляции по пробою, поэтому за счет изменения напряжения скорость вращения можно регулировать только вниз от естественной характеристики.

Конструктивно БДПТ типа БК-1424 содержит статор (якорь) неявнополюсной конструкции и явнополюсный ротор из магнитотвердого материала с одной парой полюсов.

Статор представляет собой неявнополюсную конструкцию с 4 полюсами, в которой размещаются обмотка возбуждения (рис. 2) из четырех секций Н1, К1; К2, Н2; К3, Н3 и К4, Н4, а также тахообмотка Н5, К5. Число пар полюсов секции $p = 1$.

В двигателе БК-1424 в качестве датчиков положения ротора используются два датчика Холла, которые представляют собой полупроводниковые пластины. К торцам двух противоположных датчиков припаяны выводы, называемые «токовыми», через которые датчики подключаются к источнику тока.

При подаче на токовые выводы напряжения питания по пластине протекает ток. При воздействии на датчик магнитного поля с нормальной к плоскости датчика Холла составляющей индукции B , в теле датчика возникает поперечное электрическое поле, которое характеризуется разностью потенциалов на выходе датчика (ЭДС Холла E_x), пропорциональной произведению нормальной составляющей индукции магнитного поля и тока питания I_0 (рис. 3).

При изменении направления индукции или тока I_0 меняется и знак ЭДС Холла.

В двигателе БК-1424 два датчика Холла X_1 и X_2 расположены по осям секций обмотки статора и, поэтому, имеют относительно друг друга сдвиг в расточке статора на 90 градусов. Реально датчики размещаются не в рабочем зазоре, а в специальных пазах по центрам полюсов.

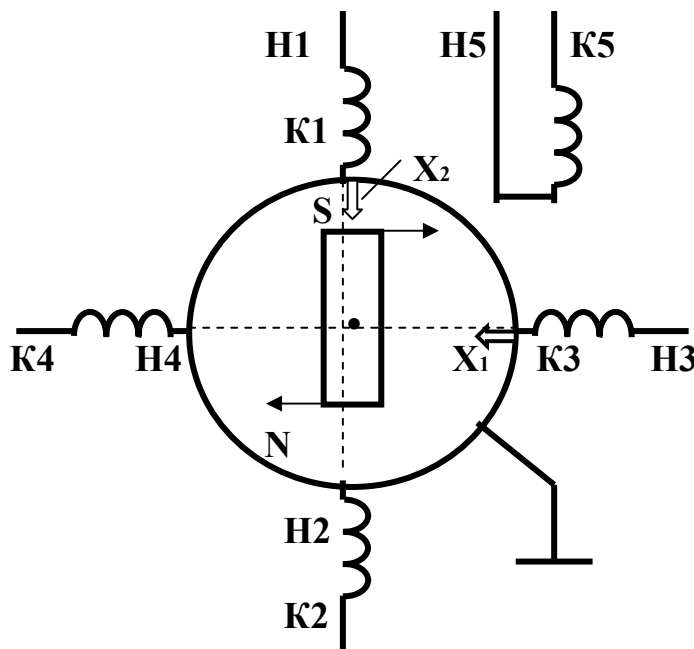


Рис. 2. Принципиальная схема БДПТ БК-1424

Каждый датчик Холла вырабатывает на выходе напряжение, величиной и знаком соответствующее знаку магнитной индукции поля, создаваемого ротором-индуктором. По этим напряжениям можно судить о положении ротора.

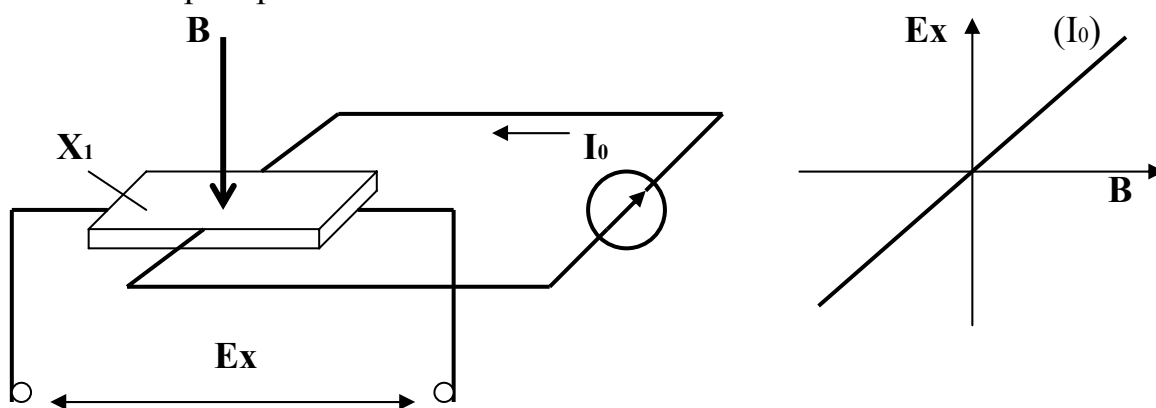


Рис. 3. Датчик Холла и его характеристика

Каждый датчик X_1 или X_2 управляет коммутацией двух секций обмотки якоря:

- датчик X_1 – коммутацией секций Н1, К1 и К2, Н2;
- датчик X_2 – коммутацией секций Н3, К3 и К4, Н4.

Токовые выводы обоих датчиков подключаются параллельно.

Положительный потенциал, например, на датчике X_1 вызывает включение секции Н1, К1 и отключение секции К2, Н2. Важно отметить, что эти встречно-параллельные секции работают строго в противофазе.

Знак ЭДС Холла на каждом из датчиков зависит от того, какой полюс ротора под ним – S или N. Соответственно будут включаться или отключаться в противофазе секции Н1, К1 – К2, Н2 в зависимости от знака сигнала с датчика X_1 и Н4, К3 – К4, Н4 в зависимости от знака сигнала с датчика X_2 .

БДПТ состоит из трех частей: собственно двигателя, датчиков положения и полупроводникового коммутатора.

Назначение полупроводникового коммутатора заключается в коммутации секций обмотки возбуждения по сигналам с датчиков положения.

Рассмотрим установившийся режим работы с постоянной угловой скоростью с положения, изображенного на рис. 2. Пусть под датчиком X_2 находится южный полюс S ротора. На холловском выходе при этом, допустим, создается положительный потенциал, который посредством коммутатора подключает секцию Н3, К3 при отключенной секции К4, Н4. Магнитодвижущая сила секции Н3, К3 развивает при этом магнитный поток, соответствующий образованию на полюсе этой секции северного полюса N, а на противоположном полюсе статора – южного S. Взаимодействие потоков статора и ротора создает момент, поворачивающий ротор на 90^0 по часовой стрелке. В положении, когда под датчиком X_1 располагается южный полюс S ротора, положительный потенциал датчика X_1 подключает секцию К2, Н2 (секция Н1, К1 отключена). Взаимодействие потока этой секции с полюсом S ротора развивает вращающий момент, также поворачивающий ротор на 90^0 по часовой стрелке.

Поочередное подключение секций по сигналам датчиков положения обеспечивает непрерывное вращение ротора.

Упрощенная электрическая схема полупроводникового коммутатора приведена на передней панели стенда. Каждая секция обмотки двигателя коммутируется своим силовым транзисторным ключом. База каждого из транзисторов подключена к холловским выводам датчиков НГ. Размыкание цепи питания датчиков Холла транзистором VT1 приводит к закрыванию всех силовых транзисторных ключей и, следовательно, к отключению двигателя от источника питания. Этот режим используется при регулировании скорости вращения двигателя.

В схеме коммутатора имеются также два диодных моста, сопротивление R11 и конденсатор С1, которые служат для ограничения коммутационных перенапряжений на силовых транзисторах.

Используемая в качестве звена обратной связи по скорости вращения тахообмотка Н5, К5 расположена непосредственно в пазах статорного пакета вместе с силовой обмоткой. В ней наводится ЭДС магнитным потоком вращающегося ротора, пропорциональная скорости вращения. В силу наличия взаимоиндуктивности обмоток статора на выходе тахообмотки присутствует (кроме ЭДС вращения) ЭДС взаимоиндукции, возникающая при коммутации силовой обмотки транзисторными ключами коммутатора, что является источником погрешности при поддержании линейной зависимости частоты вращения от величины управляющего напряжения.

Стабилизация скорости вращения двигателя в замкнутой системе осуществляется по релейному принципу. Структурная схема релейной САУ приведена на рис. 4.

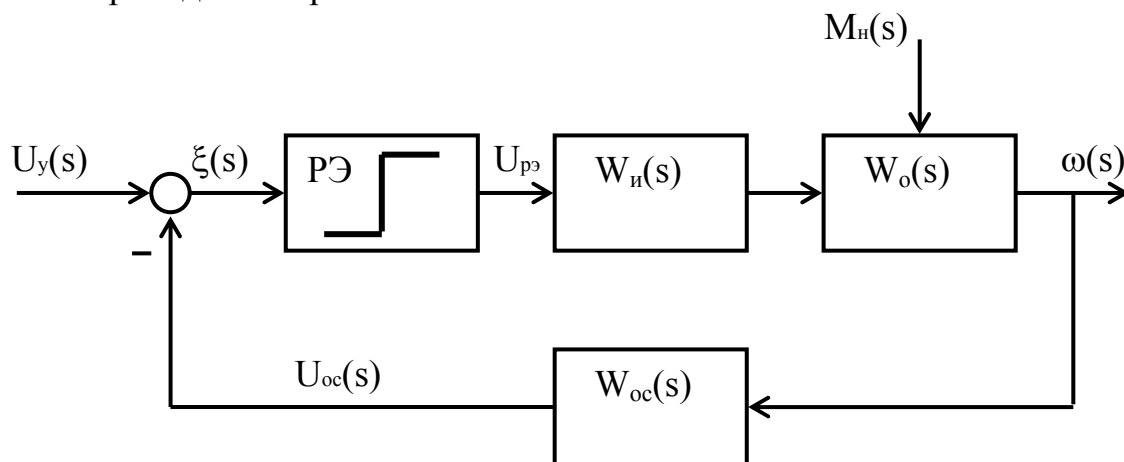


Рис. 4. Структурная схема САУ скорости БДПТ

На структурной схеме приняты обозначения:

РЭ – релейный элемент;

$W_n(s)$ – передаточная функция источника питания совместно с коммутатором;

$W_o(s)$ – передаточная функция БДПТ;

$W_{oc}(s)$ – передаточная функция звена обратной связи (тахообмотка совместно с выпрямителем).

Поясним принцип релейного регулирования. Регулятор скорости своим выходным транзистором согласно принципиальной схеме замыкает и размыкает цепи питания датчиков Холла двигателя (подключает или отключает их токовые цепи к общей точке « \perp »). При замкнутой цепи датчиков двигатель развивает вращающий момент в соответствии со своей естественной механической характеристикой. При размыкании цепи датчиков Холла двигатель совершает свободный выбег (торможение). Таким образом, двигатель работает в режиме «включено-

выключено», а его скорость колеблется относительно некоторого установленного значения.

Выходной транзистор регулятора скорости управляется релейным элементом РЭ, на входе которого имеется элемент сравнения. Элемент сравнения сравнивает напряжение управления U_y и выпрямленное напряжение с тахообмотки двигателя, величина которого пропорциональна частоте вращения.

Когда напряжение с тахообмотки U_{oc} меньше управляющего напряжения U_y , РЭ открывает выходной транзистор, что соответствует включению двигателя и увеличению его частоты вращения. Рост частоты вращения происходит до тех пор, пока величина напряжения с тахообмотки не превысит величину управляющего напряжения и РЭ не закроет выходной транзистор. При этом двигатель перейдет в режим свободного выбега. Затем описанные процессы будут периодически повторяться. Рассмотренные процессы поясняет рис. 5.

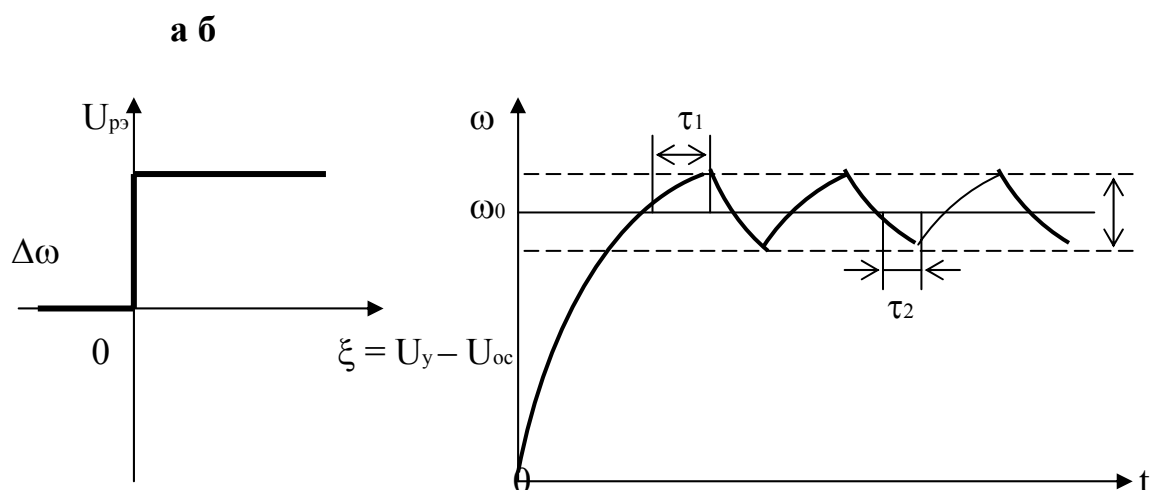


Рис. 5. Характеристика РЭ (а) и зависимость $\omega(t)$ (б)

Пусть РЭ имеет безгистерезисную характеристику «вход-выход». Входной величиной для РЭ является разностный сигнал ξ (сигнал ошибки регулирования). Так как сигнал обратной связи формируется инерционным звеном $W_{oc}(p)$, то переключения РЭ осуществляются с временными запаздываниями τ_1 и τ_2 относительно частоты вращения (рис. 5, б). Как видно из рисунка, в релейной системе не существует установившегося режима работы, а имеет место автоколебательный режим с пульсацией частоты вращения $\Delta\omega$. До первого переключения РЭ идет разгон двигателя.

3. Описание лабораторного стенда

3.1. Стенд состоит из приборного блока и электромеханической части, которые соединяются между собой тремя кабелями через разъемы на передней панели стенда.

Электромеханическая часть состоит из электродвигателя БК-1424 и электромагнитного тормоза, запитываемого от источника постоянного тока. Сопротивление обмотки возбуждения тормоза $R = 80 \text{ Ом}$.

3.2. Перевод обозначений на панели

POWER – энергия

CONTROL VOLTAGE – управляющее напряжение

ARMATURE VOLTAGE – напряжение якоря

ARMATURE CURRENT – ток якоря

SPEED, rad/s – скорость, рад/с

TEST MOTOR – исследуемый двигатель

SUPPLY VOLTAGE – напряжение питания

HG – датчик Холла

DIGITAL TACHOMETER – цифровой тахометр

CMPT – компьютер

COMPENSATOR – компенсатор

CURRENT SOURCE – источник тока

BRAKE CONTROL – задатчик нагрузки

BRAKE – электромагнитный тормоз

TGW – измерительная обмотка тахогенератора

3.3. Изменение напряжения якоря

Для исследования механических и электромеханических характеристик бесконтактного двигателя при различных напряжениях в соответствии с электрической схемой, изображенной на передней панели стенда, напряжение на якоре может плавно регулироваться потенциометром R1, входящим в состав источника питания.

3.4. Электромагнитный тормоз

Для нагрузки двигателя в стенде используется электромагнитный тормоз, собранный по принципу «баланс-динамо», позволяющий определять момент по угловым отклонениям отградуированного лимба. Цена деления зависит от величины нижнего балансирного груза. Изготовителем устанавливается коэффициент пересчета по моменту:

$$K_m = 2,4 \cdot 10^{-3} \text{ Нм/дел.}$$

3.5. Проверка работоспособности стенда и подготовка его к работе

Для этого:

- перевести тумблеры S1 и S2 в крайнее левое положение;
- повернуть ручки потенциометров R2 и R3 влево до упора, а потенциометра R1 вправо до упора;
- включить автомат на левой боковой панели, при этом должна загореться лампочка «**POWER**»;
- повернуть по часовой стрелке потенциометр R3 и убедиться в том, что ротор двигателя приводится во вращение;
- переключить тумблер S3 и убедиться в том, что ротор двигателя изменяет направление вращения;
- повернуть ручку потенциометра R1 против часовой стрелки и убедиться с помощью цифрового тахометра в том, что скорость вращения ротора уменьшается;
- повернуть по часовой стрелке ручку потенциометра R2 и убедиться в том, что балансирная система электромагнитного тормоза реагирует поворотом на увеличение тока возбуждения;
- повернуть ручки потенциометров R2 и R3 против часовой стрелки до упора, а R1 по часовой стрелке. Ручки потенциометров и тумблеров установлены в исходное положение. Стенд готов к работе.

3.6. Снятие механических и электромеханических характеристик двигателя при регулировании скорости вращения изменением напряжения якоря

Для этого:

- разомкнуть обратную связь по скорости, повернув ручку потенциометра R3 по часовой стрелке до упора. При этом ротор будет вращаться с максимальной скоростью (не менее 540 рад/с);
- записать значение напряжения на якоре двигателя по вольтметру PV1;
- поворачивая ручку потенциометра R2, увеличивать нагрузку на валу двигателя и записать 5–6 значений скорости вращения по цифровому тахометру, тока якоря I по амперметру и момента в делениях Z по лимбу моментомера;
- данные занести в табл. 1.

ВНИМАНИЕ! ТОК ЯКОРЯ НЕ ДОЛЖЕН ПРЕВЫШАТЬ 500 мА!

- пересчитать Z в значения момента, пользуясь выражением:

$$M = Z \cdot K_m = Z \cdot 2,4 \cdot 10^{-3} \text{ Нм};$$

- опыт повторить, уменьшая на 2 В напряжение на якоре с помощью потенциометра R1. Полученные значения записать в таблицы, аналогичные табл. 1;

- вернуть ручки потенциометров в исходное положение.

Для напряжения якоря $U = \dots$

Таблица 1

U _{тг}	В					
ω	рад/с					
I	mA					
Z	дел					
M	Нм					

3.7. Снятие механических и электромеханических характеристик двигателя при регулировании скорости вращения в системе с отрицательной обратной связью по скорости

Для этого:

- замкнуть обратную связь по скорости вращения;
- задать напряжение $U_y = 3$ В по вольтметру PV2, поворачивая ручку потенциометра R3 вправо;
- увеличивать нагрузку на валу двигателя, поворачивая ручку потенциометра R2 и записывая по 5–6 значений I, U_{тг}, Z;
- данные занести в табл. 2;
- повторить опыт для значений управляющего напряжения: $U_y = 4$ В; 5 В и 6 В;
- вернуть ручки потенциометров в исходное положение.

Для напряжения управления $U_y = \dots$

Таблица 2

U _{тг}	В					
ω	рад/с					
I	mA					
Z	дел					
M	Нм					

3.8. Снятие регулировочной характеристики для замкнутой системы

Регулировочной характеристикой называется зависимость скорости вращения от величины управляющего напряжения U_y , т.е. $\omega = f(U_y)$. В данной работе надо снять регулировочную характеристику в режиме холостого хода, для чего необходимо:

- устанавливать последовательно управляющее напряжение U_y равным 0, 1, 2 ...6 В, поворачивая ручку потенциометра R3 по часовой стрелке. Для каждого значения U_y записать значение скорости вращения ω ротора по цифровому тахометру;
- данные занести в табл. 3.

Таблица 3

	В	0	1	2	3	4	5	6
ωU_y	рад/с							

3.9. Снятие осциллограмм

Для этого с помощью двухлучевого осциллографа:

- снять эпюры напряжений на гнездах секций Н1, Н3, К2, К4 для $U_y = 3$ В и качественно зарисовать их. При этом необходимо у обоих входов осциллографа найти общие концы и соединить их с общим гнездом « \perp » в центре звезды обмотки возбуждения;
- перевести осциллограф в режим измерения переменного тока и для максимального значения U_y снять сигналы с датчиков Холла НГ при вращении вала двигателя по часовой стрелке и против часовой стрелки. Реверс двигателя производить с помощью тумблера;
- снять осциллограмму тока якоря (гнездо М10).

4. Программа работы

1. Построить механические $\omega = f(M)$ и электромеханические $\omega = f(I)$ характеристики при регулировании скорости вращения в разомкнутой системе изменением напряжения якоря.
2. Построить механические и электромеханические характеристики в системе с отрицательной обратной связью по скорости.
3. При значении $U_y = 3$ В и токе $I = 500$ мА по электромеханической характеристике замкнутой по скорости системы определить абсолютную ошибку регулирования $\Delta\omega$.
4. Построить регулировочную характеристику замкнутой системы.
5. Ознакомиться с осциллограммами величин по п. 3.9.

5. Содержание отчета

В отчете необходимо привести задание на выполнение лабораторной работы, структурную схему исследуемой системы, таблицы с экспериментальными данными, статические характеристики, выводы по работе и ответы на вопросы.

6. Вопросы

1. Объясните назначение основных составляющих частей бесконтактного двигателя постоянного тока.
2. Назовите достоинства и недостатки бесконтактного двигателя.
3. В чем заключается принцип релейного регулирования?
4. Чему равна ошибка регулирования в релейной системе в стационарном режиме?

ЛАБОРАТОРНАЯ РАБОТА № 12 ИССЛЕДОВАНИЕ СИСТЕМЫ ПОДЧИНЕННОГО РЕГУЛИРОВАНИЯ

1. Цель работы

Изучение принципов построения и настройки систем подчиненного регулирования, исследование их статических и динамических свойств.

2. Основные соотношения

Самое широкое распространение в настоящее время имеют системы, выполненные по принципу подчиненного регулирования [6], который поясняется структурной схемой рис. 1.

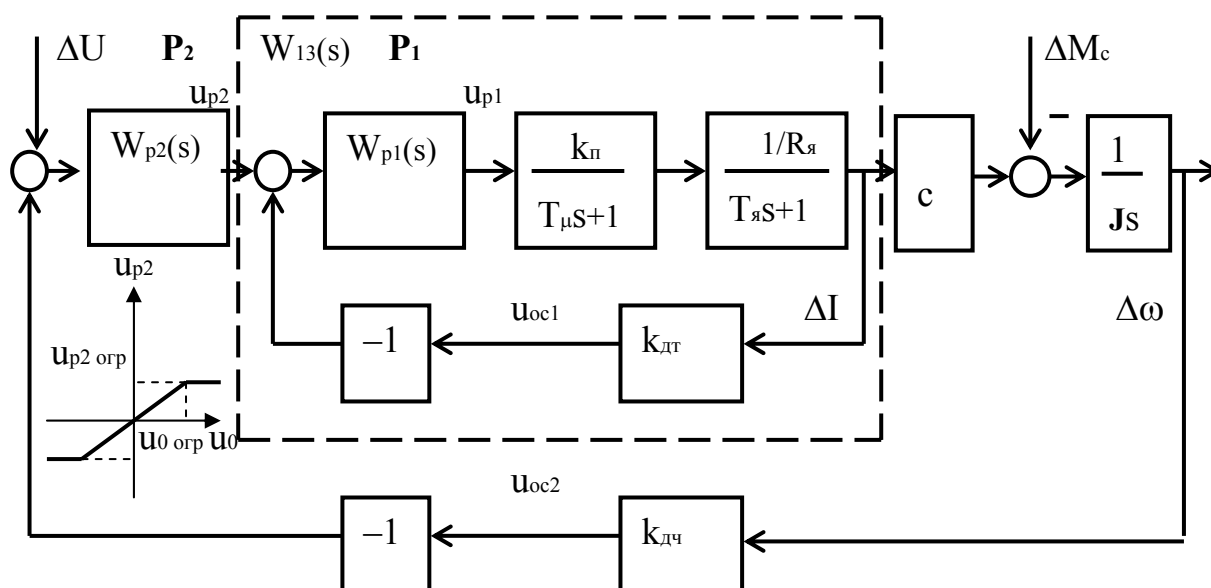


Рис. 1. Структурная схема системы подчиненного регулирования

В системе предусмотрены два контура регулирования со своими регуляторами P_1 и P_2 причем выходное напряжение регулятора внешнего контура U_{p2} является задающим значением для внутреннего контура. Выходное напряжение регулятора P_2 ограничено предельным значением $U_{p2огр}$. Так как напряжение u_1 на выходе внутреннего контура задается выходным напряжением регулятора P_2 , то оно не может превышать значения $U_{p2огр}$.

Рассмотренный внешний контур может, в свою очередь, выступать как внутренний по отношению к третьему контуру и т.д. Такой принцип построения системы называется принципом подчиненного регулирования, так как работа каждого внутреннего контура подчинена внешнему контуру.

Два главных достоинства определяют широкое распространение систем подчиненного регулирования.

1. Простота расчета и настройки. Система разбивается на ряд контуров. Каждый контур включает в себя регулятор, за счет придания которому определенных динамических свойств получают стандартные характеристики. Настройка в процессе наладки системы ведется начиная с внутреннего контура. Поскольку регулятор имеет простую передаточную функцию, а качество настройки может быть легко оценено по результатам сравнения реакции контура на скачок управляющего воздействия со стандартной переходной характеристикой, наладка системы оказывается простой.

2. Удобство ограничения предельных значений промежуточных координат системы. Так как выходной сигнал регулятора внешнего контура является предписанным значением для внутреннего контура, ограничение выходной координаты внутреннего контура достигается за счет ограничения определенным значением выходного сигнала регулятора внешнего контура.

Вместе с тем из принципа построения системы подчиненного регулирования следует, что быстродействие каждого внешнего контура будет ниже быстродействия соответствующего внутреннего контура.

В ряде практических случаев реальные контуры регулирования могут быть сведены к простейшим контурам второго или третьего порядка, настройка которых осуществляется путем выбора по определенным правилам параметров регулятора. В простейшем случае параметры регулятора (изменяемая часть САУ) подбирают таким образом, чтобы передаточная функция разомкнутого контура соответствовала реальному интегрирующему звену с определенными параметрами. Тогда замкнутый контур будет соответствовать колебательному звену, приближающемуся по своим свойствам к апериодическому звену второго порядка.

Определим передаточные функции и настроечные параметры регуляторов тока и частоты вращения двухконтурной системы управления электроприводом, функциональная схема которой показана на рис. 2.

На схеме приняты обозначения:

ТП – реверсивный тиристорный преобразователь;

БУ – электронный блок управления тиристорным преобразователем;

РТ – регулятор тока;

РС – регулятор скорости;

ДТ – датчик тока;

ВР – датчик угловой частоты вращения;

М – приводной двигатель;

U – задающее напряжение;

M_n – момент нагрузки на валу двигателя.

Если принять, что ДТ и ВР являются безынерционными статическими звеньями, то функциональной схеме соответствует структурная схема системы для отклонений координат, показанная на рис. 1. На структурной схеме не учтена внутренняя обратная связь по ЭДС двигателя. Часто при рассмотрении динамики системы подчиненного регулирования пренебрежение влиянием связи по ЭДС оказывается возможным. Физически это объясняется тем, что, как всякая замкнутая система, токовый контур стремится воспроизводить на выходе входной сигнал, которым в данном случае является напряжение регулятора скорости. Если изменения скорости вследствие значительной электрохимической постоянной времени происходят сравнительно медленно, а быстродействие контура, которое определяется частотой среза его ЛАЧХ $\omega_{ср} = 1/(2T_{\mu})$, велико, ток якоря изменяется в соответствии с изменением напряжения регулятора скорости независимо от действующего на контур возмущения в виде изменения ЭДС двигателя.

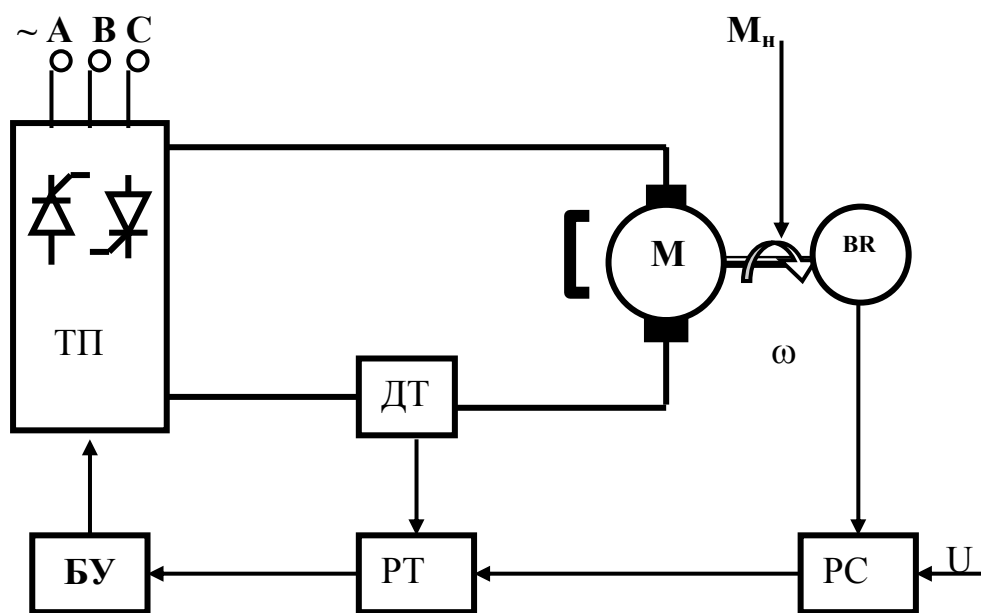


Рис. 2. Упрощенная функциональная схема двухконтурной системы подчиненного регулирования

На структурной схеме приведены передаточные функции тиристорного преобразователя $W_n(s) = k_n / (T_{\mu}s + 1)$, цепи якоря $W_{\text{я}}(s) = 1 / R_{\text{я}}(T_{\text{я}}s + 1)$, датчиков тока и частоты вращения $W_{\text{дт}}(s) = k_{\text{дт}}$, $W_{\text{дч}}(s) = k_{\text{дч}}$.

Для внутреннего контура (контура тока), в котором объектом является инерционное звено второго порядка

$$W_{01}(s) = W_{\text{ом}}(s) W_n(s) W_{\text{я}}(s) = \frac{k_{\text{дт}} k_n / R_{\text{я}}}{(T_n s + 1)(T_{\text{я}} s + 1)}, \quad (1)$$

целесообразно применить ПИ-регулятор с настройкой по критерию МО, т.е. с полной компенсацией наибольшей постоянной времени $T_{\text{я}}$ и с передаточной функцией

$$W_{P1} = \frac{R_{\text{я}}(T_{\text{я}} \cdot s + 1)}{2 \cdot T_{\mu} \cdot k_n \cdot k_{\text{ом}} \cdot s}, \quad (2)$$

из которой регулятору тока соответствует коэффициент передачи [6]

$$k_{\text{рм}} = \frac{T_{\text{я}} R_{\text{я}}}{2 k_n k_{\text{ом}} T_{\mu}}. \quad (3)$$

Эквивалентная передаточная функция замкнутого контура тока при выбранных настройках равна:

$$W_{13}(s) = \frac{1}{k_{\text{ом}} \cdot (2 \cdot T_{\mu}^2 \cdot s^2 + 2 \cdot T_{\mu} \cdot s + 1)} \approx \frac{1}{k_{\text{ом}} \cdot (2 \cdot T_{\mu} \cdot s + 1)} \quad (4)$$

Выбор параметров регулятора тока в соответствии с (2) приводит к тому, что рассматриваемый контур описывается передаточной функцией колебательного звена согласно (4) с коэффициентом демпфирования $\xi = \sqrt{2}/2$.

С учетом последнего упрощения объект регулирования в контуре частоты (последовательное соединение звеньев контура за исключением регулятора частоты) можно представить следующим образом:

$$W_{02}(s) = W_{13}(s) c \frac{1}{Jp} W_{\text{оч}}(s) = \frac{k_{\text{оч}} k_{\text{м}}}{k_{\text{ом}} s (2T_n s + 1)}, \quad (5)$$

где $k_{\text{м}} = c/J$.

Таким объектом можно управлять с помощью настроенного на МО П-регулятора с коэффициентом

$$k_{\text{рч}} = \frac{k_{\text{ом}}}{4k_{\text{оч}} k_{\text{м}} T_{\mu}}, \quad (6)$$

но при этом будет возникать существенная статическая ошибка по скорости, зависящая только от динамических параметров двигателя и преобразователя, и, следовательно, принципиально неустранимая. Поэтому в контуре частоты целесообразно применять ПИ-регулятор, настроенный на симметричный оптимум, т.е. с частичной компенсацией инерционности:

$$k_{\text{рч}} = \frac{k_{\text{ом}}}{4k_{\text{оч}} k_{\text{м}} T_{\mu}}, \quad T_u = 8T_{\mu}. \quad (7)$$

Для снижения больших перерегулирований, возникающих при ступенчатых изменениях входного сигнала, необходимо его пропускать через сглаживающий фильтр.

3. Описание лабораторного стенда

3.1. Состав стенда

Стенд состоит из приборной стойки с размещенным в ней тиристорным преобразователем и электромеханического агрегата, состоящего из двух высокомоментных электродвигателей – один из них исследуемый, а другой нагрузочный. Питание стенда осуществляется от трехфазной сети **ЗPEN~50 Гц 380 В**. Подключение стенда к сети осуществляется автоматом, размещенным в нижней части правой боковой панели.

3.2. Перевод обозначений на лицевой панели стенда

THYRISTORIZED DC MOTOR DRIVE – тиристорный привод постоянного тока

TEST MOTOR – исследуемый двигатель

ARMATURE VOLTAGE – напряжение якоря

ARMATURE CURRENT – ток якоря

POWER – энергия

ON – отключено

OFF – выключено

BRAKE MOTOR – нагрузочный двигатель

SPEED, rad/s – скорость, рад/с

REFERENCE VOLTAGE – опорное напряжение

BRAKE MOTOR CONTROL – управление нагрузочным двигателем

HAND CONTROL – ручное управление

LOGIC UNIT – блок логики

CMPT – компьютер

3.3. Описание функциональной схемы стенда

Функциональная схема стенда изображена в нижней половине передней панели стенда.

Питание электропривода осуществляется от сети трехфазного напряжения ~ 380 В 50 Гц (фазы R, S и T). На силовой трансформатор это напряжение подается через автомат токовой защиты QF. Одна группа вторичных обмоток силового трансформатора запитывает блок стабилизированного постоянного напряжения ± 15 В, вторая группа запитывает управляемый выпрямитель. Управляемый выпрямитель содержит два комплекта тиристорov: выпрямительный VS1...VS6 и инверторный VS7...VS12. Выпрямленное напряжение подается на исследуемый двигатель M1. Напряжение на якоре двигателя M1 контролируется вольт-

метром V1, а в цепь якоря включены амперметр A1 и измерительный шунт RS.

Напряжение, снимаемое с шунта RS, усиливается дифференциальным усилителем, собранным на операционном усилителе (ОУ) A11. Усиленный сигнал поступает на один из входов регулятора тока, собранного на ОУ A9. Таким образом, шунт RS и схема на ОУ A11 представляют собой датчик тока якоря двигателя M1.

Второй вход регулятора тока соединен с выходом регулятора скорости, собранного на ОУ A8. На первый вход регулятора скорости подается сигнал с задатчика скорости, представляющего собой потенциометр R1. Полярность задающего сигнала (т.е. направления вращения двигателя) задается переключателем S1.

На второй вход регулятора скорости поступает сигнал тахогенератора BR, который контролируется вольтметром V2, отградуированным в рад/с (прибор «**SPEED, r/s**»). Для дополнительной коррекции динамических свойств системы управления сигнал тахогенератора подается на второй вход регулятора скорости через дифференцирующее звено.

Как регулятор тока, так и регулятор скорости представляют собой ПИ-регуляторы. Однако, регулятор скорости является адаптивным регулятором: его коэффициент усиления K_G и постоянная времени τ изменяются в функции скорости вращения двигателя, компенсируя нелинейность зависимости коэффициента передачи тиристорного преобразователя от сигнала управления. Кроме того, являясь задатчиком для контура тока, регулятор скорости осуществляет еще и функцию нелинейного токоограничения. Значение допустимого тока по условиям коммутации зависит от скорости двигателя в соответствии с коммутационной кривой двигателя. Коммутационная кривая моделируется функциональным преобразователем, выходной сигнал которого выводится на гнездо 170.

Сигнал управления поступает с выхода регулятора тока в схему системы импульсно-фазового управления СИФУ (на один из входов компаратора A7 и функционально аналогичные ему). Работа СИФУ синхронизируется с сетевым напряжением посредством согласующих трансформаторов TV13...TV15.

СИФУ состоит из:

- фазосдвигающих цепочек (входные гнезда 131, 134, 137, выходные – 132, 135, 138), которые управляют работой генераторов пилообразного напряжения (выходные гнезда которых 133, 136, 139);
- схем формирования импульсов (элементы A7 и VT24, а также функционально аналогичные им);

- усилителей импульсов (транзисторы VT27 и VT28, а также функционально аналогичные им);
- импульсных трансформаторов VS1...VS12, вторичные обмотки которых формируют управляющие импульсы, отпирающие тиристоры.

Блок логики включает в себя схемы защит и индикаций, а также обеспечивает алгоритм раздельного управления группами тиристоров.

В данной модификации стенда нагрузочный двигатель M2 управляется устройством управления нагрузочным двигателем (**BRAKE MOTOR CONTROL**), включение которого производится выключателем S4, а регулировка скорости – потенциометром R2. Потенциометр R2 запитывается напряжением ± 15 В посредством переключателя S2. Изменением знака питающего напряжения достигается реверс двигателя M2. Схема устройства управления нагрузочным двигателем аналогична схеме устройства управления исследуемым двигателем, за исключением возможности модификации схем регуляторов и разрыва обратных связей по току и скорости.

4. Индикация состояния электропривода

В левой и правой верхних частях блока управления тиристорным преобразователем за оргстеклом выведены по 6 следующих светодиодных индикаторов готовности и защит, позволяющих оценивать работоспособность электропривода:

CP – ФАЗА (CONNECTING PROTECTION)

защита срабатывает при обрыве фаз, неправильном чередовании фаз и при отсутствии пилообразного напряжения;

OS – ПРЕВЫШЕНИЕ СКОРОСТИ (OVERSPEED)

защита срабатывает при превышении скорости вращения допустимого значения;

OC – ПЕРЕГРУЗКА ПО ТОКУ (OVERCURRENT)

защита срабатывает при превышении тока якоря допустимого значения;

OL – ДЛИТЕЛЬНАЯ ПЕРЕГРУЗКА ПО ТОКУ (OVERLOAD)

защита срабатывает при длительной работе в режиме токоограничения;

TG – ТАХОГЕНЕРАТОР (TACHOGENERATOR)

защита срабатывает при обрыве обратной связи по скорости;

RD – ГОТОВ (READY)

привод в исправности, можно подавать команду для работы.

На передней панели стенда возле условного изображения транзисторов VT31 и VT32 расположены светодиоды, индицирующие подачу управляющих импульсов на тиристоры прямого и реверсивного каналов.

5. Проверка работоспособности стенда

Предварительно выставить переключатели S1 и S2 в среднее положение; выключатели S3 и S4 разомкнуть; потенциометры R1 и R2 вывести в крайние левые положения.

Если стенд укомплектован компьютером, то переключатель S5 поставить в положение «**HAND CONTROL**».

Для проверки работоспособности исследуемого электропривода необходимо:

- включить сетевой автомат на левой боковой панели, при этом загорается световой индикатор «**POWER**»;
- соединить перемычками гнезда M1–M2 и M7–M8, тем самым введя обратные связи по скорости и по току якоря. Гнезда M3–M4 и M5–M6 разомкнуть для реализации ПИ-регуляторов по скорости и току;
- включить выключатель S3, выставить переключатель S1 в левое положение и поворачивая потенциометр R1 убедиться, что электромеханический агрегат вращается и его скорость вращения регулируется (контроль скорости осуществляется по индикатору «**SPEED, rad/s**»). Проверить реверс двигателя «**TEST MOTOR**» – M1 переключением на ходу переключателя S1 вправо до упора;
- переключатель S1 установить в среднее положение, потенциометр R1 вывести в крайнее левое положение, выключить выключатель S3.

ВНИМАНИЕ! Для исключения срабатывания защиты следить, чтобы скорость вращения не превышала 150 рад/с.

Для проверки нагрузочного привода необходимо:

- включить выключатель S4, выставить переключатель S2 в левое положение и поворачивая потенциометр R2 убедиться, что электромеханический агрегат вращается и его скорость вращения регулируется (контроль скорости осуществляется по индикатору «**SPEED, rad/s**») и что двигатель «**BRAKE MOTOR**» – M2 реверсируется переключением на ходу переключателя S2 вправо до упора; переключатель S2 установить в среднее положение, потенциометр R2 вывести в крайнее левое положение, выключить выключатель S4.

ВНИМАНИЕ! Если какой-либо двигатель не вращается или его скорость вращения не регулируется, необходимо обратиться к ведущему преподавателю!

6. Снятие статических характеристик электропривода в разомкнутой САУ

6.1. Измерение коэффициента ЭДС с исследуемого двигателя

Момент исследуемого двигателя М1 связан с током якоря выражением

$$M = c \cdot I.$$

Для измерения коэффициента c необходимо:

- включить выключатель S4, переключатель S2 поставить в левое положение;
- поворачивая потенциометр R2 вправо снять 2–3 значения угловой скорости вращения ω по прибору «**SPEED, rad/s**» и соответствующее значение ЭДС E исследуемого двигателя по показаниям вольтметра V1 «**ARMATURE VOLTAGE**». Рассчитать значение коэффициента c как среднее арифметическое нескольких отношений E/ω .

После окончания опыта выставить S2 в среднее положение, выключатель S4 разомкнуть, потенциометр R2 вывести в крайнее левое положение.

6.2. Для снятия механических характеристик необходимо:

- разомкнуть систему управления исследуемого электропривода с двигателем М1. Для этого необходимо разомкнуть переключки М1–М2 и М7–М8 в цепях обратных связей по скорости и току и поставить переключки между гнездами М3–М4 и М5–М6, тем самым реализовав П-регуляторы тока и скорости;
- включить выключатель S3, переключатель S1 поставить в правое положение и потенциометром R1 установить напряжение питания на исследуемом двигателе М1 равным $U_d = 10$ В по вольтметру V1 «**ARMATURE VOLTAGE**»;
- включить выключатель S4, переключатель S2 поставить в правое положение, включив этим двигатели встречно;
- поворачивая потенциометр R2 для 7–8 значений тока якоря I_1 исследуемого двигателя М1, определяемых по амперметру А1 «**ARMATURE CURRENT**», снять значения угловой скорости вращения ω по прибору «**SPEED, rad/s**», добившись изменения направления вращения исследуемого двигателя и тем самым переведя его из двигательного режима в режим торможения противовключением;
- вывести потенциометр R2 в левое положение;
- установить переключатель S2 в левое положение, включив этим двигатели согласно;

- поворачивая потенциометр R2 для 5–6 значений тока якоря I_1 исследуемого двигателя M1, определяемых по амперметру A1 «**ARMATURE CURRENT**», снять значения угловой скорости ω по прибору «**SPEED, rad/s**», добившись изменения направления тока якоря исследуемого двигателя и переведя его тем самым из двигательного режима в режим генераторного торможения.

Полученные данные занести в табл. 1.

Для напряжения питания $U_d = \dots$

Таблица 1

ω							
I							

ВНИМАНИЕ! При снятии характеристик следить за тем, чтобы показания амперметров не превышали значений 15 А!

Повторить последовательность действий по п. 6.2 для напряжений на якоре исследуемого двигателя равных $U_d = 5 \text{ В}$ и $U_d = 15 \text{ В}$.

После окончания опыта выставить переключатели S1 и S2 в среднее положение, выключатели S3 и S4 разомкнуть, потенциометры R1 и R2 вывести в крайнее левое положение.

7. Снятие характеристик электропривода в замкнутой САУ

7.1. Замкнуть систему регулирования исследуемого электропривода, для чего необходимо:

- поставить перемычки M7–M8 и M1–M2, тем самым введя отрицательные обратные связи по скорости и току якоря;
- разомкнуть перемычки M3–M4 и M5–M6, тем самым реализовав ПИ-регуляторы тока и скорости.

7.2. Снять механические характеристики, для чего необходимо:

- включить выключатель S3, переключатель S1 поставить в правое положение и потенциометром R1 установить напряжение питания на исследуемом двигателе M1 равным $U_d = 20 \text{ В}$ по вольтметру V1 «**ARMATURE VOLTAGE**»;
- включить выключатель S4, переключатель S2 поставить в правое положение, включив этим двигатели встречно;

- поворачивая потенциометр R2 для 5–6 значений тока якоря I_1 исследуемого двигателя M1, определяемых по амперметру A1 «**ARMATURE CURRENT**», снять значения угловой скорости ω по прибору «**SPEED, rad/s**» при работе двигателя в двигательном режиме;

- вывести потенциометр R2 в левое положение;

- установить переключатель S2 в левое положение, включив этим двигатели согласно;

- поворачивая потенциометр R2 для 5–6 значений тока якоря I_1 исследуемого двигателя M1, определяемых по амперметру A1 «**ARMATURE CURRENT**», снять значения угловой скорости вращения ω по прибору «**SPEED, rad/s**», добившись изменения направления тока якоря исследуемого двигателя и переведя его тем самым из двигательного режима в режим генераторного торможения.

Полученные данные занести в таблицу, аналогичную табл. 1.

После окончания опыта выставить переключатели S1 и S2 в среднее положение, выключатели S3 и S4 разомкнуть, потенциометры R1 и R2 вывести в крайние левые положения.

Повторить последовательность действий по п. 7.2 для двух других значений напряжения на якоре исследуемого двигателя $U_a = 30$ В и $U_a = 40$ В. Полученные экспериментальные данные занести в таблицы, аналогичные табл. 1.

8. Снятие характеристик переходных процессов в замкнутом тиристорном приводе

8.1. Переходные процессы при пуске и останове исследуемого двигателя без нагрузки в замкнутой системе управления

Для их снятия необходимо:

- информационные концы осциллографа включить в гнезда 168 и 161 для снятия сигналов скорости и тока;

- включить выключатель S3, переключатель S1 выставить в правое положение и при помощи потенциометра R1 разогнать исследуемый привод, установив $U_a = 40$ В и скорректировав при этом коэффициенты усиления сигналов по обоим каналам осциллографа;

- переключая переключатель S1 поочередно в среднее и правое положения, зарисовать осциллограммы переходных процессов по скорости и току;

- установить $U_a = 10$ В и повторить действия по предыдущему пункту.

По окончании опыта выставить переключатель S1 в среднее положение, выключатель S3 разомкнуть, потенциометр R1 вывести в крайнее левое положение.

8.2. Переходные процессы в замкнутом электроприводе при реверсе без нагрузки

Для их снятия необходимо:

- замкнуть выключатель S3, выставить переключатель S1 в правое положение и плавно поворачивая потенциометр R1 разогнать исследуемый привод до скорости 40 рад/с;
- на ходу привода переключить переключатель S1 в крайнее левое положение, тем самым среверсировав двигатель, и зарисовать осциллограммы сигналов по скорости и току;
- установить $U_d = 10$ В и повторить действия по предыдущему пункту.

По окончании опыта выставить переключатель S1 в среднее положение, выключатель S3 разомкнуть, потенциометр R1 вывести в крайнее левое положение.

8.3. Переходные процессы в замкнутом электроприводе при сбросе и набросе нагрузки

Для их снятия необходимо:

- включить выключатель S3, S1 выставить в правое положение и потенциометром R1 разогнать исследуемый привод, установив $U_d = 40$ В и скорректировав коэффициенты усиления сигналов по обоим каналам осциллографа;
- включить выключатель S4, переключатель S2 поставить в правое положение;
- плавно поворачивая потенциометр R2, нагрузить исследуемый двигатель током $I_1 = 10$ А (ток контролировать по амперметру A1 «**ARMATURE CURRENT TEST MOTOR**»);
- на ходу выключая и включая выключатель S4, зарисовать осциллограммы переходных процессов по скорости и току при сбросе и набросе нагрузки.

После окончания опыта выставить переключатели S1 и S2 в среднее положение, выключатели S3 и S4 разомкнуть, потенциометры R1 и R2 вывести в крайнее левое положение.

9. Программа работы

1. Ознакомиться с описанием работы стенда по п. 3,4 и 5.
2. Снять статические характеристики разомкнутой САУ по п. 6.
3. Снять статические характеристики замкнутой САУ по п. 7.
4. Снять статические характеристики замкнутой САУ по методике п. 7, заменив в контуре частоты вращения ПИ-регулятор на П-регулятор.
5. Оценить статическую точность при номинальном значении тока якоря в замкнутых системах с ПИ- и П-регуляторами в контуре частоты вращения.
6. Снять переходные процессы для частоты вращения и тока якоря в замкнутой САУ:
 - а) при пуске и останове исследуемого двигателя без нагрузки по п. 8.1;
 - б) при реверсе электропривода без нагрузки по п. 8.2;
 - в) при сбросе и набросе нагрузки по п. 8.3.

10. Содержание отчета

В отчете необходимо привести задание на выполнение лабораторной работы, структурную схему исследуемой системы, таблицы с экспериментальными данными, статические и динамические характеристики, выводы по работе и ответы на вопросы.

11. Вопросы

1. В чем заключается принцип подчиненного регулирования и каковы его достоинства?
2. Какими динамическими свойствами должен обладать внутренний контур по отношению к внешнему?
3. Как осуществляется ограничение выходной координаты внутреннего контура?
4. К какому типу звена стремятся в большинстве случаев привести замкнутые контуры в системе подчиненного регулирования?
5. Какой тип регулятора и с какой настройкой необходимо применять для контура тока?
6. Какие типы регуляторов применимы для контура частоты вращения?

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. Теория автоматического управления. В двух частях / под ред. А.А. Воронова. – М.: Высшая школа, 1986.
2. Лукас В.А. Теория автоматического управления. – М.: Недра, 1990.
3. Имаев Д.Х., Ковальски З., Яковлев В.Б., Пошихонов Л.Б., Цапко Г.П. Анализ и синтез систем управления. – Санкт-Петербург; Гданьск; Сургут; Томск: Изд-во СурГУ, 1998.
4. Зайцев А.П., Митаенко А.Д. Моделирование линейных систем автоматического управления: учебно-методическое пособие. – Томск: 1999.
5. Зайцев А.П. Основы теории автоматического управления: учеб. пособие. – Томск: Изд-во ТПУ, 2005.

1. НАЗНАЧЕНИЕ И ОСНОВНЫЕ ХАРАКТЕРИСТИКИ ПРОГРАММЫ CLASSIC-3

1.1. Формы представления моделей

Блок-схемы (структурные схемы) с произвольной организацией, формируемые с заданием геометрического образа или в табличном виде. Операторы блоков – передаточные функции.

1.2. Решаемые задачи

Ввод, редактирование моделей динамических систем.

Анализ свойств и характеристик систем управления :

- расчет характеристического полинома, передаточных функций, характеристик и показателей качества;
- анализ взаимосвязи корневых, временных и частотных характеристик;
- исследование влияния вариаций операторов блоков на свойства систем.

Анализ структурных особенностей, инвариантных

к операторам блоков:

- выявление автономных подсистем сложной системы;
- анализ инвариантности передач к подсистемам и отдельным блокам сложной системы;
- поиск контуров, путей и анализ их взаимоотношений;
- отображение результатов структурного анализа непосредственно на блок-схеме;
- автоматизированное формирование частных избыточных моделей систем управления по результатам структурного анализа.

1.3. Область применения

Учебный процесс – при изучении основ теории управления, компьютерных методов расчета сложных систем, современных методов анализа структурно-сложных систем с использованием теории графов.

Проектная практика в организациях – при создании современных систем управления объектами различного назначения.

1.4. Основные особенности программы

- оформлена приложением WINDOWS с соблюдением стандартов среды;

- многодокументный интерфейс с одновременным отображением моделей в различных формах представления;
- возможность расчета в интерактивном режиме сложных моделей высокой размерности;
- дружелюбный интерфейс с быстрой адаптацией к предпочтениям пользователя и минимальное время на освоение программы;
- развитый HELP с системой гиперссылок.

2. ЗАПУСК И НАСТРОЙКИ ПРОГРАММЫ

2.1. Запуск и работа с файлами моделей

Активизация WINDOWS-приложения **CLASSiC-3.01** вызывает появление на экране дисплея логотипа программы (изображен на титульном листе Описания). Логотип отображается в течение 5 с и может быть досрочно удален с экрана щелчком мыши по его изображению. После этого появляется входное меню программы: **Файл, Окно, Справка**. Работа с программой начинается с активизации меню **Файл** (рис. 2.1).

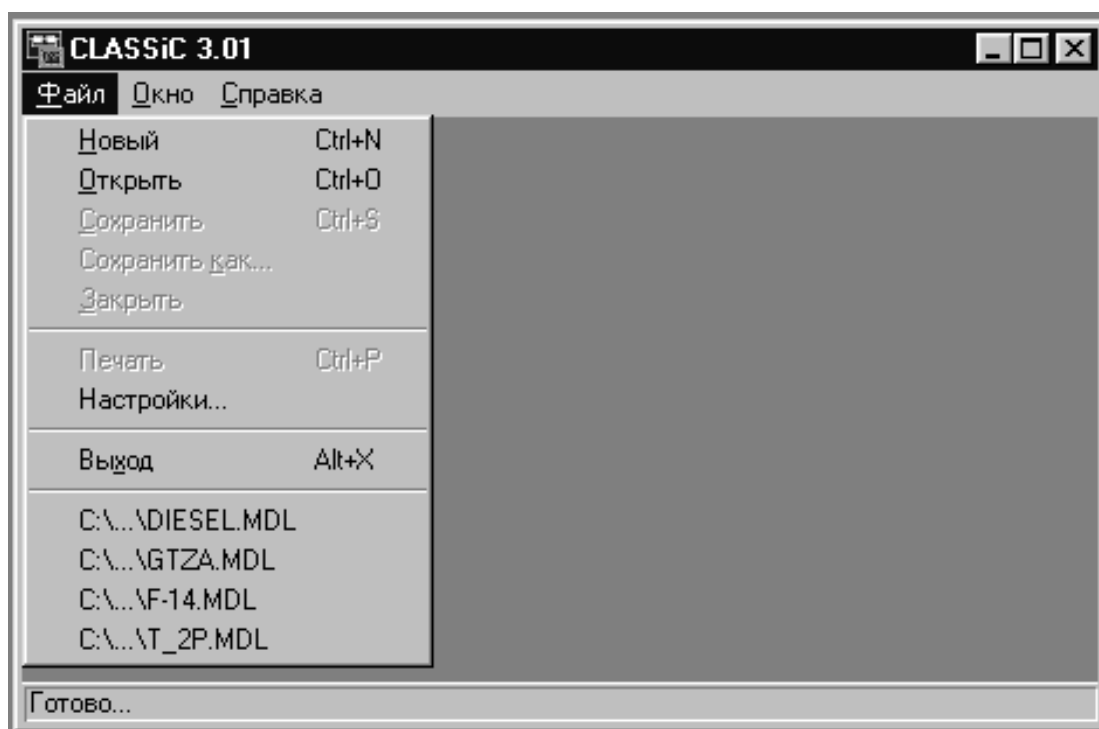


Рис. 2.1. Меню **Файл** программы

Первая строка меню используется при вводе новой модели.

Следующие четыре строки представляют собой стандартные WINDOWS-процедуры работы с файлами. Файлам моделей программы **CLASSiC-3.01** автоматически присваивается расширение *. **mdl**.

Строка **Печать** вызывает стандартные панели установки принтера; при задании команды собственно печати на принтер выводится поле активного окна программы.

Строка **Настройки** вызывает диалоговую процедуру задания предпочтений пользователя при выборе цветовых гамм, параметров отображения информации и т.д.

Нижние строки меню фиксируют имена последних из использованных программой моделей.

2.2. Настройки программы

Процедура **Настройки** включает в себя выбор цветовой гаммы и ряда параметров для работы с программой и для вывода изображений активных окон на принтер или в буфер обмена.

Панель **Настройки программы** изображена на рис. 2.2.

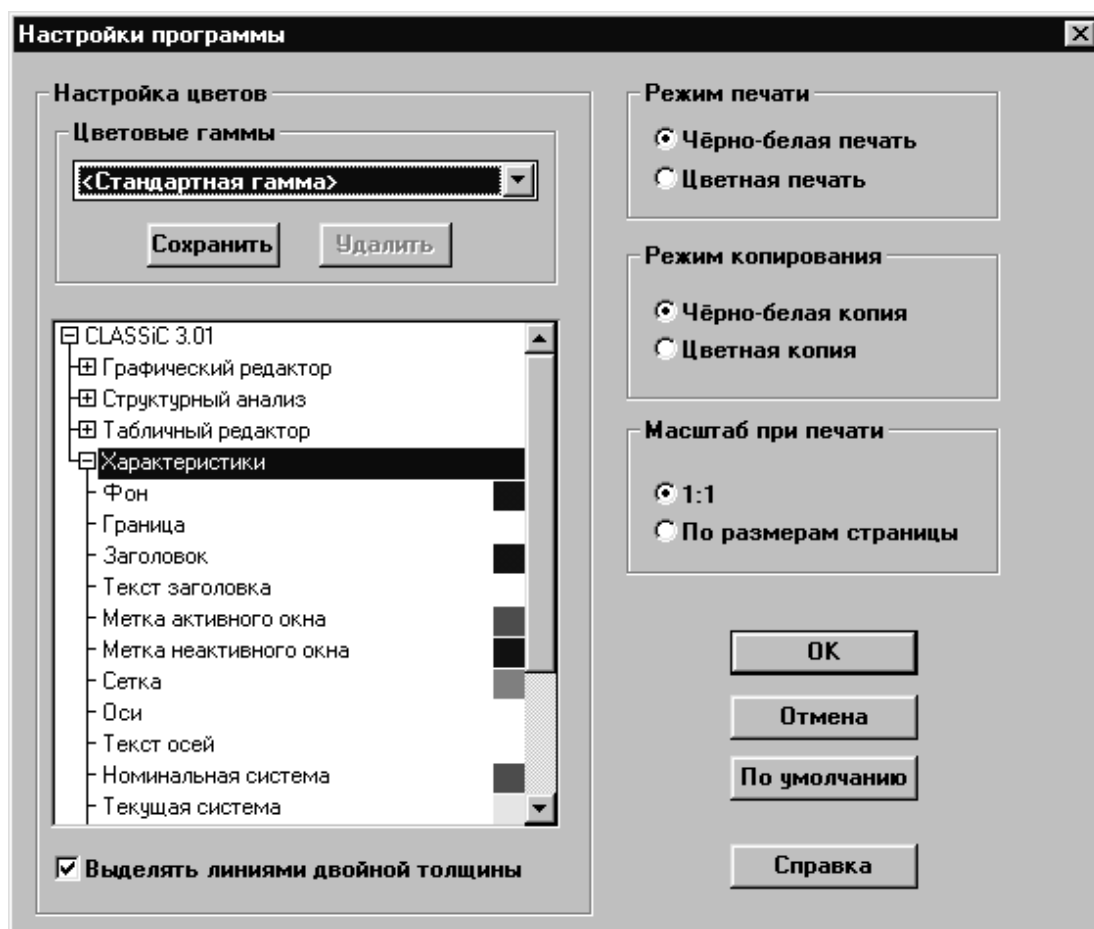


Рис. 2.2. Панель **Настройки программы**

Программа **CLASSiC-3.01** предлагает пользователю две заранее настроенные собственные цветовые гаммы: **<Стандартная гамма>** и **<Стандартная печать/копирование>**.

<Стандартная гамма> предназначена в основном для рабочего режима.

<Стандартная печать/копирование> имеет белый фон окон, что более предпочтительно для экономичной цветной печати.

Стандартные гаммы **не** допускают коррекции цветов, изменений и **не** могут быть удалены.

С учетом предпочтений пользователя и особенностей компьютеров можно корректировать цвета и параметры для рабочего режима и печати/копирования.

Для коррекции цвета конкретных объектов (фона, блоков, связей, осей графика и т.д.) рабочих окон в специальном окне панели **Настройки программы** имеется дерево. Раскрывая ветви этого дерева, можно получить список всех объектов рабочих окон с установленными цветами их отображения. Двойной щелчок мышью по находящемуся в списке требуемому объекту вызывает появление цветовой палитры, в которой можно выбрать и зафиксировать желаемый цвет конкретного объекта.

В графическом редакторе при отображении структурных особенностей динамических систем некоторые подмножества объектов структурных схем (блоков и связей) могут выделяться. Выделение осуществляется установленным цветом. Дополнительно предусмотрена возможность выделения этих объектов также и линиями двойной толщины (рис. 2.2). Эта же возможность имеется и для выделения кривых на графиках в окне **Характеристики**.

При черно-белой печати/копировании выделение элементов структурных схем производится линиями двойной толщины вне зависимости от установок в панели настройки.

Могут быть установлены (изменены) параметры режимов печати, копирования в буфер обмена, а также масштаба при печати.

Откорректированные цвета и параметры могут быть записаны пользователем в цветовые гаммы со своими именами. Таким образом, может быть создана библиотека цветовых гамм для различных режимов и условий работы.

При вызове программы **CLASSiC-3.01** автоматически устанавливается цветовая гамма, при которой было осуществлено предыдущее завершение программы.

Вызов панели **Настройки программы** может быть произведен из любого режима работы с программой; текущая переустановка цветов и параметров не требует завершения программы.

3. ВВОД И РЕДАКТИРОВАНИЕ МОДЕЛЕЙ

3.1. Формы задания моделей и типы редакторов программы CLASSiC-3.01

Модели динамических систем в программе задаются в форме структурных схем (блок-схем). На вход блока (звена) подключаются связи с выходов других блоков. Входные сигналы суммируются с учетом установленных на входах блоков знаков и преобразуются оператором, задаваемым передаточной функцией.

Задание моделей включает в себя процедуры ввода (размещения) блоков, соединения их связями и задания параметров блоков.

При задании параметров блока вводится его имя, изменяются число и знаки входов, задается передаточная функция и назначается ряд атрибутов.

При редактировании моделей добавляются или исключаются отдельные блоки и связи и корректируются параметры блоков.

Модели в программе **CLASSiC-3.01** могут быть введены с созданием графического образа структурной схемы, либо – без него, в текстовом виде.

При активизации пунктов меню **Файл|Новый** на экране появляется панель выбора формы задания модели (рис. 3.1).

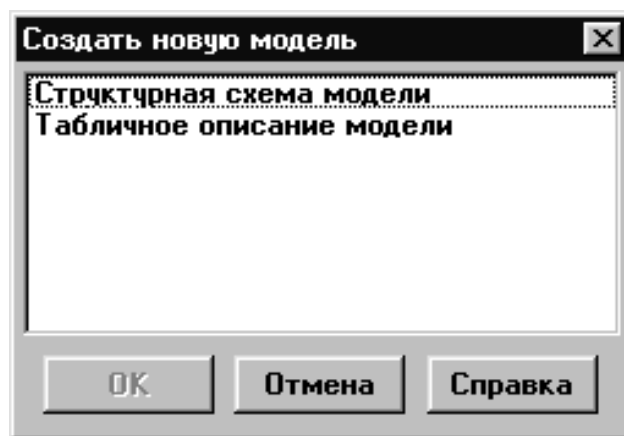


Рис. 3.1. Панель типов редакторов

При активизации строки **Структурная схема модели** открывается окно графического редактора.

При активизации строки **Табличное описание модели** открывается окно табличного редактора.

3.2. Ввод и редактирование моделей в графическом редакторе структурных схем

Активизация строки **Структурная схема модели** (рис. 3.1) приводит к появлению окна **Новая модель** с установленным режимом **Размещение блоков** (рис. 3.2).

Режим размещения блоков характеризуется наличием на поле окна модели мигающего курсора, имеющего очертания блока.

Для перемещения курсора блока используются клавиши [←], [→], [↓], [↑], при нажатии которых курсор перемещается на один шаг, соответствующий размеру клетки поля модели. Использование клавиш [Home], [End], [Up] и [Down] вызывает перемещение курсора по диагонали. Эти же команды при нажатой клавише [Shift] перемещают курсор с крупным шагом, соответствующим размеру курсора.

Курсор блока можно перемещать также с помощью мыши.

Собственно установка блока на месте курсора производится нажатием [Enter] или нажатием левой кнопки мыши. При этом появившемуся новому блоку присваивается следующий порядковый номер.

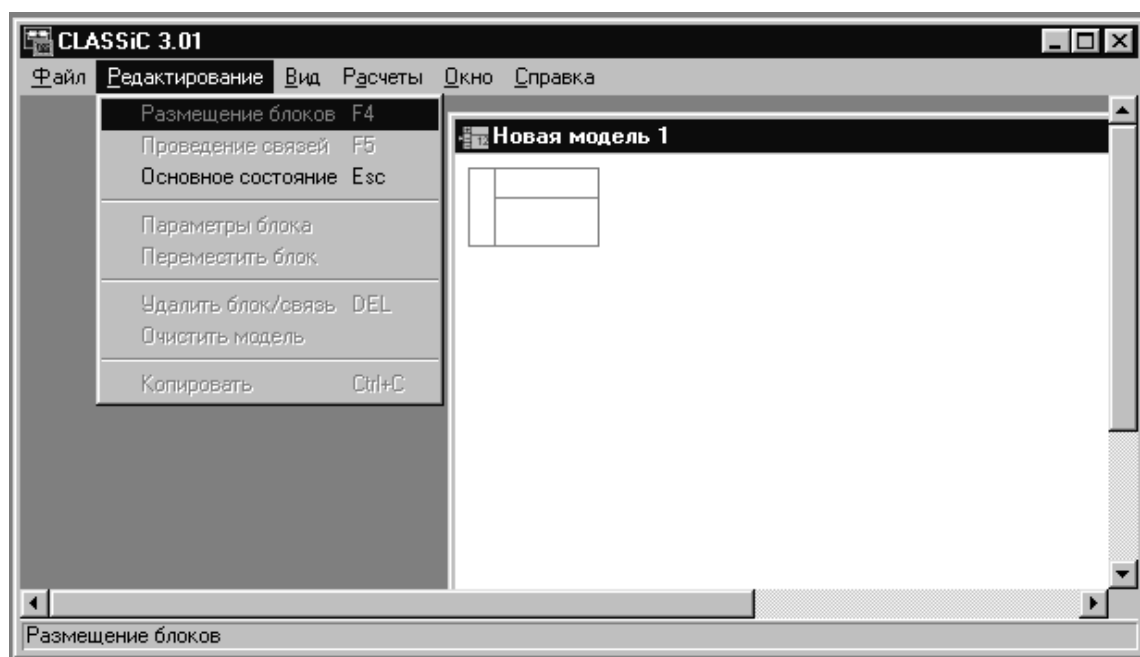


Рис. 3.2. Режим размещения блоков

Установленный блок (без связей) может быть перемещен на другое (свободное) место мышью при нажатой левой клавише.

После установки хотя бы одного блока становится доступной процедура записи модели в файл данных.

Режим **Проведение связей** доступен при наличии одного или большего числа блоков. Переход в этот режим осуществляется командой **[F5]** или через меню **Редактирование|Проведение связей**.

Режим **Проведение связей** сопровождается присутствием курсора связей (четырёхугольная звезда) на выходном порте выделенного (помеченного) или последнего введенного блока (рис. 3.3). Собственно проведение связи производится клавишами **[←]**, **[→]**, **[↓]**, **[↑]**, при нажатии которых курсор перемещается на один шаг, соответствующий размеру клетки поля модели. Связи проводятся только по линиям клетки вне зависимости от того, отображена ли клетка на экране.

При удерживании клавиши управления курсором в нажатом состоянии связь проводится до момента отпускания клавиши.

Проведение одной связи заканчивается, когда ее стрелка упирается во входной порт какого-либо блока. При этом курсор связи переходит на выходной порт этого блока. Перенос курсора связей на другой блок осуществляется одиночным щелчком мыши по требуемому блоку.

Удаление последнего отрезка **незаконченной** связи производится командой **[Backspace]**.

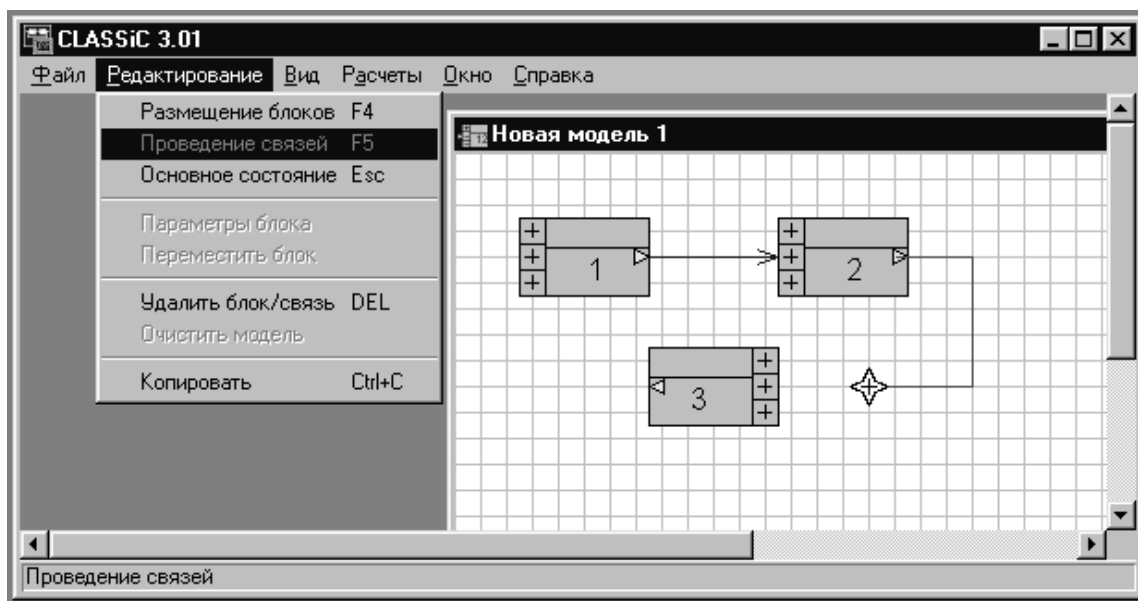


Рис. 3.3. Режим проведения связей

Для проведения связи с помощью мыши следует щёлкнуть левой кнопкой мыши над курсором связей (захватить курсор) и перемещать мышью, щёлкая левой кнопкой в местах поворота связи. Для стирания ошибочно проведённого отрезка связи необходимо двигать мышью назад, вдоль проведенного отрезка. Для того чтобы закончить связь на входном порте блока, необходимо щёлкнуть левой кнопкой на этом блоке.

Ввод и редактирование параметров блока производится при помощи панели **Параметры блока** (рис. 3.4). В левой части панели может быть задано **Имя** блока (до восьми символов).

Номер блока при вводе модели присваивается автоматически в порядке ввода блоков. Номер может быть изменен на другой из ряда 1, ..., 999; при этом производится контроль на наличие в модели блоков с таким номером.

Изменение **Ориентации** (по горизонтали) допускается для блоков, не имеющих связей. **Атрибуты** предполагают установку на блоке **Входа** и/или **Выхода** системы, а также придание ему статуса **Варьируемый**. Если указанные атрибуты были ранее установлены на других блоках, то при их назначении в редактируемом блоке произойдет переустановка атрибутов на данный блок.

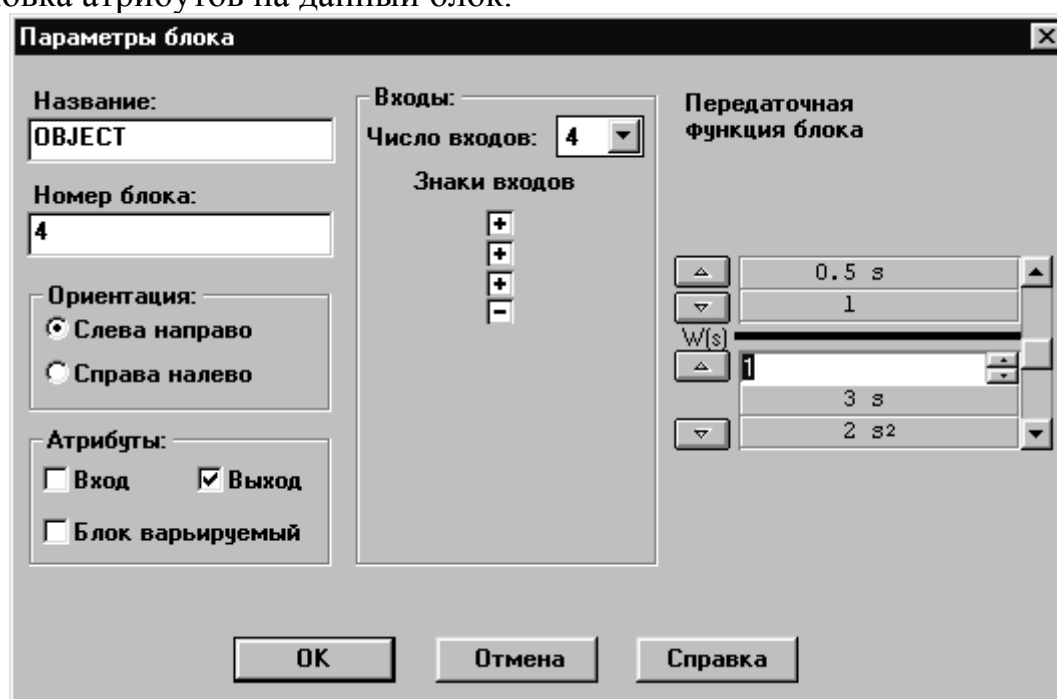


Рис. 3.4. Панель настройки параметров блока

В средней части панели может быть задано **число входных портов** блока. При задании модели в графическом редакторе каждый новый блок вводится с тремя входами (минимальное число входов). Количество входных портов может быть увеличено (до десяти), что сопровождается увеличением размера блока на поле модели вниз по вертикали (рис. 3.5). Возможность увеличения числа входов конкретного блока может быть запрещена, если под блоком в непосредственной близости расположены ранее введенные объекты схемы; при этом на экран выводится соответствующее сообщение.

Знак сумматора (при вводе блока на всех входных портах устанавливается «+») может быть изменен на противоположный. Для этого необходимо в панели **Параметры блока** на поле **Знаки входов** щелкнуть мышью по полю требуемого входного порта блока.

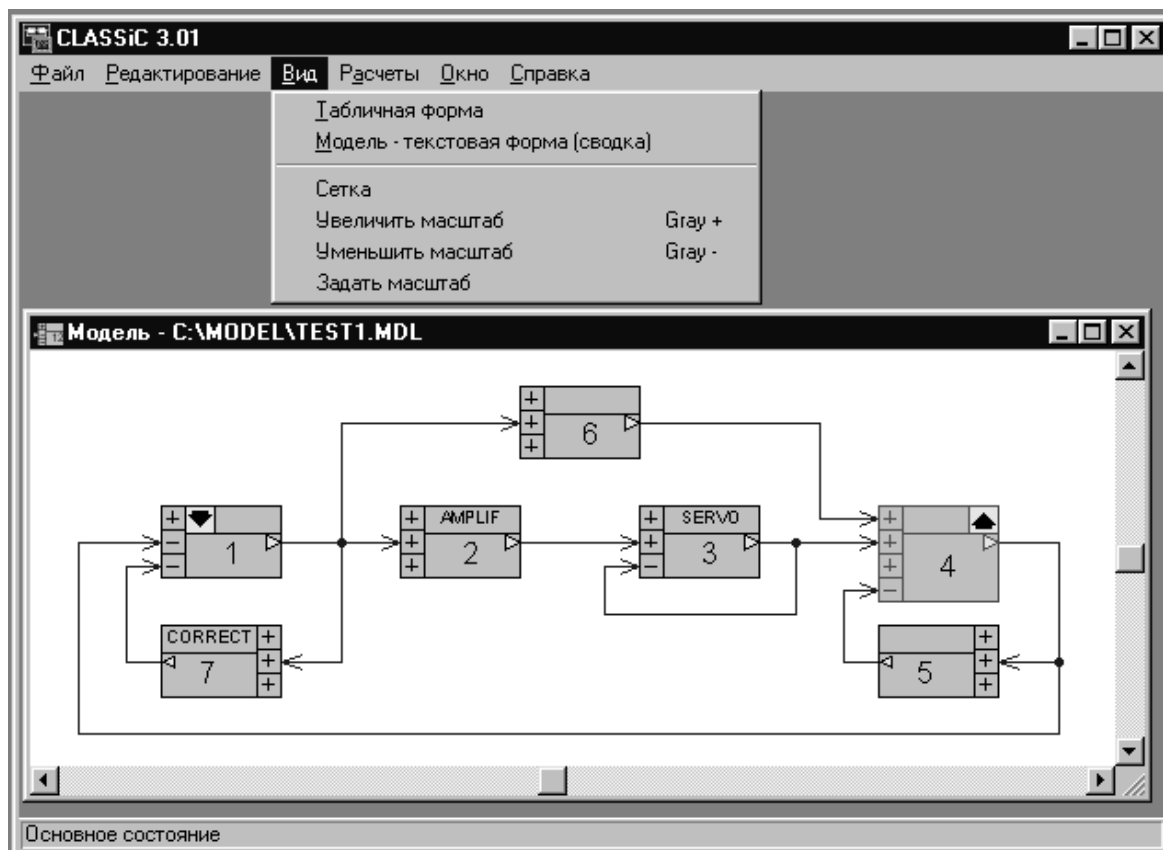


Рис. 3.5. Меню **Вид** графического редактора

В правой части панели задается оператор блока – передаточная функция. Изначально каждый заново введенный блок имеет передаточную функцию $W(s) = 0/0$. Ввод (редактирование) оператора производится заданием (изменением) коэффициентов при соответствующих степенях полиномов числителя и знаменателя. Для повышения или понижения степени полинома предусмотрены специальные кнопки на поле оператора блока в панели параметров.

Редактирование структуры модели предусматривает добавление отдельных объектов – блоков и связей в ранее введенную модель, а также их удаление.

Для удаления объекта необходимо его выделить (пометить). Выделение блока производится щелчком мыши по блоку. Для выделения связи требуется расположить конец стрелки курсора мыши на каком-

либо месте связи, нажать левую кнопку и, удерживая ее, провести курсором по отрезку связи. При стандартной цветовой гамме выделенный объект изображается на экране красным цветом. Собственно удаление производится командой **[Del]**.

Имеется возможность одновременного удаления всех объектов модели – пункты меню **Редактирование|Очистить модель**.

Допускается перемещение ранее установленного блока по полю модели – пункт меню **Редактирование|Переместить блок**. Пункт меню **Переместить блок** доступен при наличии на структурной схеме выделенного блока (не имеющего связей). При активизации этого пункта на выделенном блоке появляется специальный курсор, который можно перемещать по полю модели теми же командами, что и курсор размещения блоков. Фиксация блока на новом, не занятом другими объектами месте производится командой **[Enter]**.

Пункт меню **Вид** позволяет установить на экране или удалить сетку поля графической модели (рис. 3.3) и изменить масштаб изображения модели.

Изменение масштаба изображения сетки и остальных объектов структурной схемы командами **[Gray+]** и **[Gray-]** производится постепенно, на один шаг. При активизации пункта **Задать масштаб** на экран выводится специальная панель выбора размера изображения.

3.3. Ввод и редактирование моделей в табличном редакторе

При активизации строки **Табличное описание модели** (рис. 3.1) на экране появляется поле табличного редактора структурных схем (рис. 3.6).

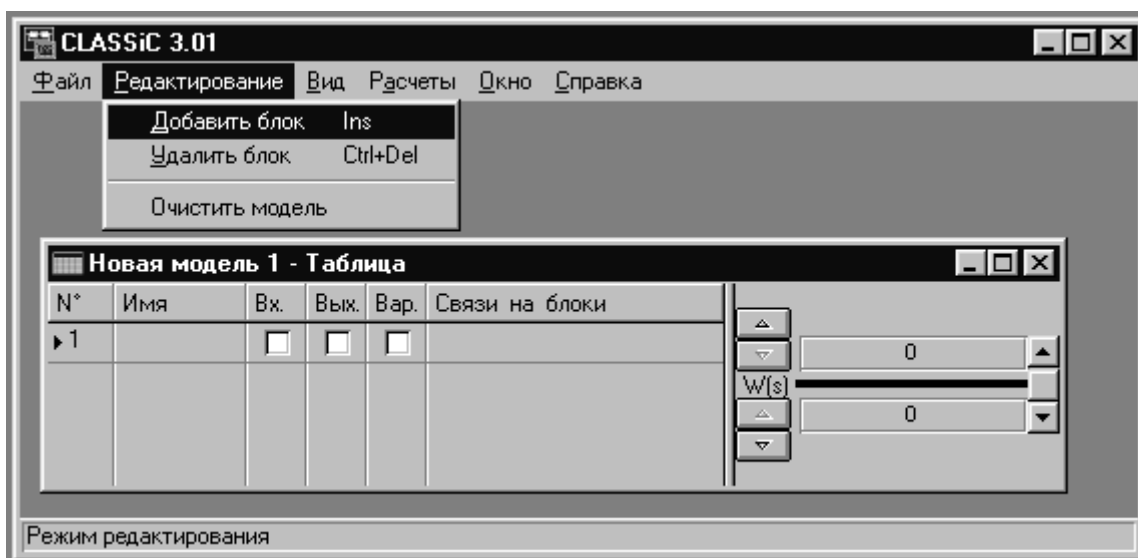


Рис. 3.6. Текстовый редактор моделей

Ввод блока производится через меню **Редактирование|Добавить блок** или командой **[Ins]** .

Связи с выхода текущего блока задаются перечислением номеров блоков, ко входам которых они должны быть подсоединены. При этом учитывается знак связи: при инвертировании сигнала на входе блока-приемника номер этого блока указывается со знаком «-».

Задание атрибутов блоков производится курсором мыши на соответствующих клетках «**Вх.**», «**Вых.**», «**Вар.**» и щелчком левой кнопки.

Выделение блока производится щелчком мыши в любом месте строки блока. При этом появляется треугольная метка перед номером блока.

В правой части поля таблицы располагается редактор передаточных функций, отображающий оператор активного блока. Этот редактор аналогичен используемому в панели **Параметры блока** графического редактора моделей.

Модель в табличном виде может быть получена преобразованием модели из графической формы: **Исходное состояние** графического редактора, меню **Вид|Табличная форма** (рис. 3.5). При этом образуется окно табличного редактора, которое является дочерним окном редактора графического.

На рис. 3.7. представлена модель в табличной форме, полученная из модели, изображенной на рис. 3.5.

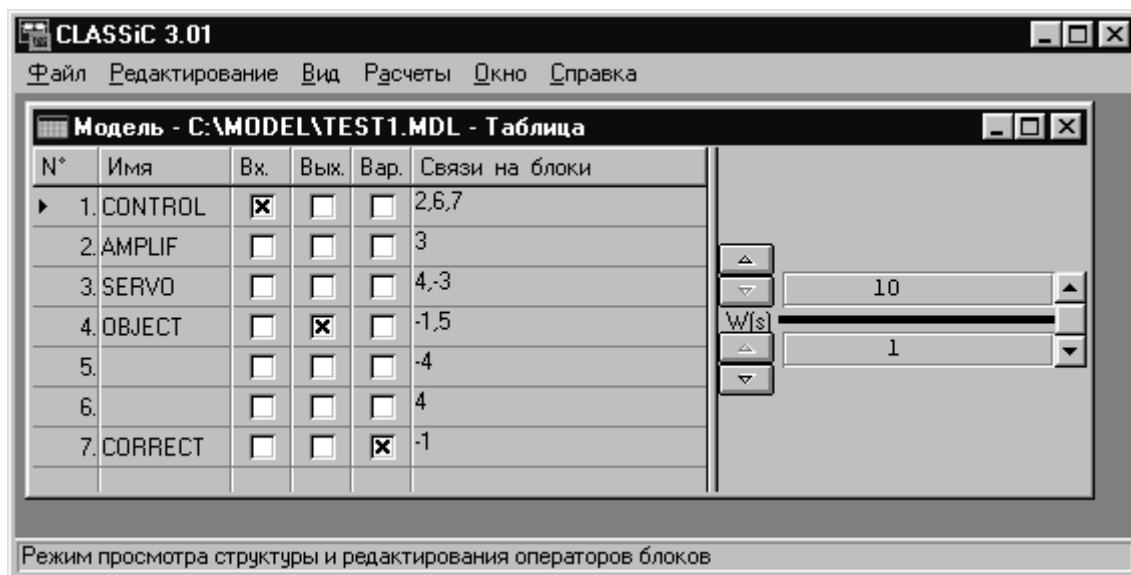


Рис. 3.7. Модель TEST1, преобразованная в графическую форму

В этом случае информация о составе блоков и их связях изменению в табличном редакторе не подлежит; это подтверждается сообщением в строке состояния. Допускается редактирование передаточных

функций блоков, что сопровождается передачей изменений операторов в графический редактор. При наличии двух окон одной модели в графическом и табличном виде активизация окна табличного редактора всегда сопровождается обновлением информации о модели.

Если табличную модель, полученную из графической, сохранить в файле с новым именем, она становится самостоятельной моделью, не имеющей аналога в графической форме. При этом табличный редактор приобретает возможность вносить изменения и в структуру модели.

3.4. Сводная информация о модели

Для документирования используемых в *CLASSiC-3.01* моделей предусмотрена текстовая форма, отображающая информацию о блоках, связях и передаточных функциях всех блоков. Сводная информация о модели выводится в окне специальной панели по меню **Вид|Модель – текстовая форма (сводка)** графического или текстового редакторов моделей. На рис. 3.8 представлен вид такой панели для модели TEST1, изображенной на рис. 3.5 и рис. 3.7.

Сводная информация о модели

Модель: "C:\MODEL\TEST1.MDL"

=====
 Количество блоков: 7
 Количество связей: 11
 =====

Блоки	Передаточные функции			Связи
	Числитель	Знаменатель	Степень	
#1 "CONTROL" Вход	10	1	0	2,6,7
#2 "AMPLIF"	5	0.15	1	3

Buttons: Закреть, Копировать, Сохранить..., Справка

Рис. 3.8. Панель Сводная информация о модели в текстовом виде

Каждая строка таблицы несет всю информацию о блоке.

В первом столбце таблицы приводится номер блока, имя (если оно присвоено), а также указываются атрибуты. Второй и третий столбцы перечисляют коэффициенты полиномов числителей и знаменателей передаточных функций блока, а четвертый столбец указывает степень аргумента при коэффициенте полинома. Крайний правый столбец перечисляет связи с выхода блока на входы других блоков (с учетом знаков).

С помощью предусмотренных кнопок содержимое окна (полностью или выделенная курсором мыши часть) может быть скопировано в буфер обмена или сохранено в файле в виде текста.

4. АНАЛИЗ СТРУКТУРНЫХ ОСОБЕННОСТЕЙ

4.1. Структурные особенности динамических систем, подлежащие анализу программой CLASSiC-3.01

Структурный анализ, проводимый программой CLASSiC-3.01, выявляет для динамических систем ряд свойств, инвариантных к операторам блоков. В связи с этим для структурного анализа могут быть использованы не полностью определенные модели, т.е. такие, операторы ряда или всех блоков которых не заданы. В программе CLASSiC-3.01 оператор блока считается неопределенным, если полином знаменателя его передаточной функции равен нулю.

Если модель представлена графическим редактором, то выявленные структурные особенности могут быть отображены непосредственно на структурной схеме. При этом предусмотрена процедура формирования частных моделей динамических систем на основе полученной информации. Возможен также вывод всей информации о структурных свойствах и в текстовом режиме.

Если модель представлена в табличной форме, то вывод всей информации о структурных свойствах возможен только в текстовом режиме.

При структурном анализе решаются следующие задачи.

1. Все множество блоков модели подразделяется на два непересекающихся подмножества. В состав первого подмножества входят блоки, образующие «контурную часть» модели, т.е. входящие в состав контуров. Второе подмножество образуют блоки, не входящие в состав ни одного контура.

2. В контурной части выявляются «Автономные контурные части» (АКЧ) – непересекающиеся подмножества блоков, образующих «сильно связанные подграфы» («сильные компоненты» графа – структурной схемы).

3. Находятся и перечисляются все контуры системы.

4. Находятся и перечисляются все пути передачи от входа к выходу системы.

5. Все множество блоков модели подразделяется на два непересекающихся подмножества. В состав первого подмножества входят блоки, участвующие в формировании передачи системы от входа к выходу. Второе подмножество образуют блоки, к которым передача инвариантна.

6. Анализируются отношения некасания контуров. В качестве дополнительной (специальной) информации приводятся некоторые сведения о составе слагаемых определителя графа (структурной схемы).

Результаты структурного анализа по п. 1–5 отображаются на структурной схеме и в текстовой форме. Информация по п. 6 представляется только текстом.

4.2. Анализ и отображение структурных особенностей в графическом режиме

На рис. 4.1. приведена модель, на которой иллюстрируется структурный анализ динамических систем, заданных в графическом редакторе. В ниспадающем меню пункт **Характеристики** (расчет передаточных функций и характеристик в корневой, временной и частотной областях) заблокирован, что свидетельствует о модели с не полностью заданными операторами.

Активизация строки **Структурные особенности** приводит к осуществлению процедуры анализа структурных особенностей и появлению двух новых окон (рис. 4.2).

Левое окно повторяет структуру системы с упрощенным изображением блоков. Заштрихованные прямоугольники составляют подмножество блоков, не входящих в контурную часть.

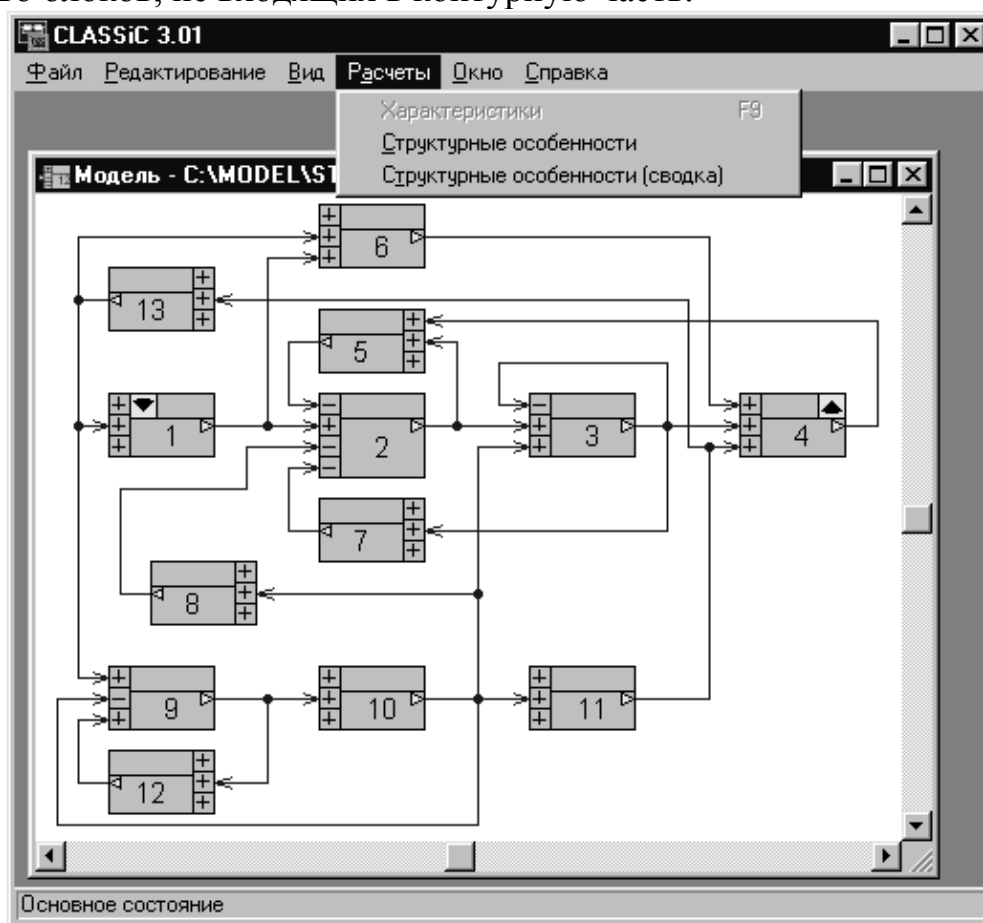


Рис. 4.1. Пример системы для анализа структурных свойств

Правое окно (дочернее левого) – **Навигатор**. Его назначение – представлять в виде дерева информацию о структурных свойствах и управлять процессом их отображения в левом окне.

На дереве рис. 4.2. активизирована строка выделения всей контурной части. При этом выводится и количество составляющих ее автономных контурных частей.

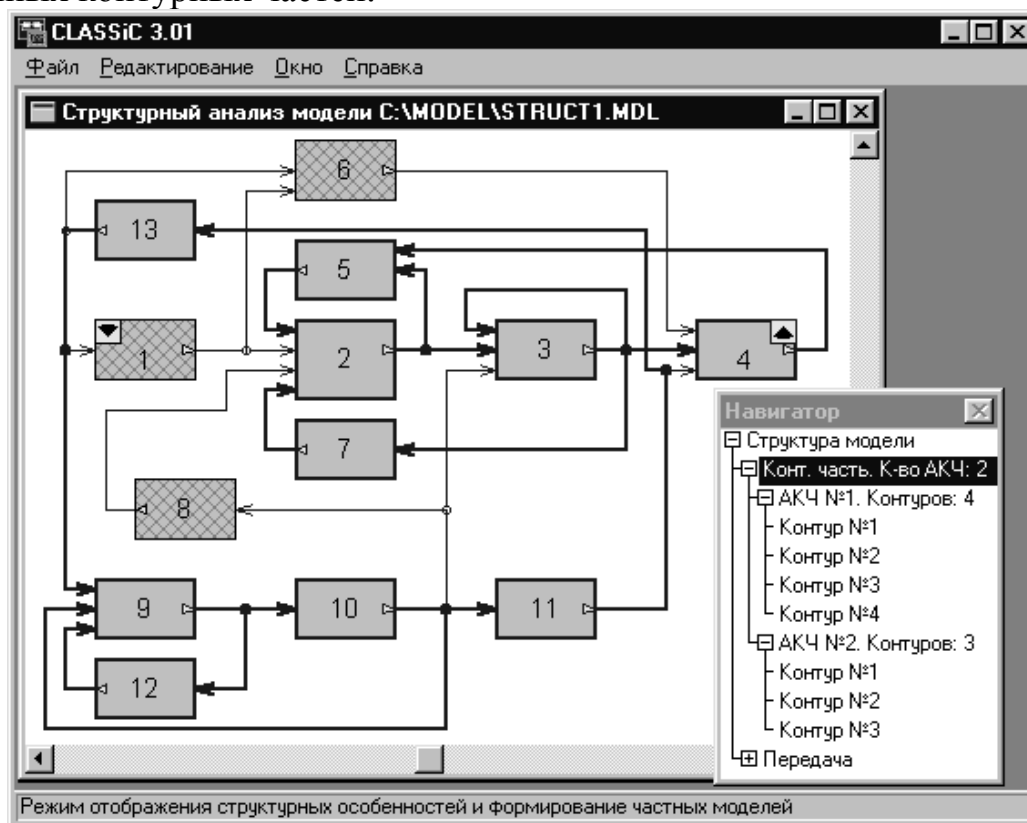


Рис. 4.2. Анализ контурной части системы

На структуре в левом окне линиями двойной толщины выделяются все блоки и связи, составляющие контурную часть.

Активизация следующих строк навигатора выделит на структуре подмножество всех блоков и связей, принадлежащих автономным контурным частям. Также по команде с навигатора может быть выделен отдельно каждый контур.

Активизация строки навигатора **Передача** вызовет выделение на структуре подмножества объектов (блоков и связей), участвующих в формировании оператора передачи от входа к выходу. Невыделенными останутся те блоки, к операторам которых назначенная передача инвариантна (рис. 4.3).

Активизация следующей строки навигатора приведет к одновременному отображению всех путей передачи (для рассматриваемой системы их два).

Возможно также и отображение отдельно каждого пути от входа к выходу.

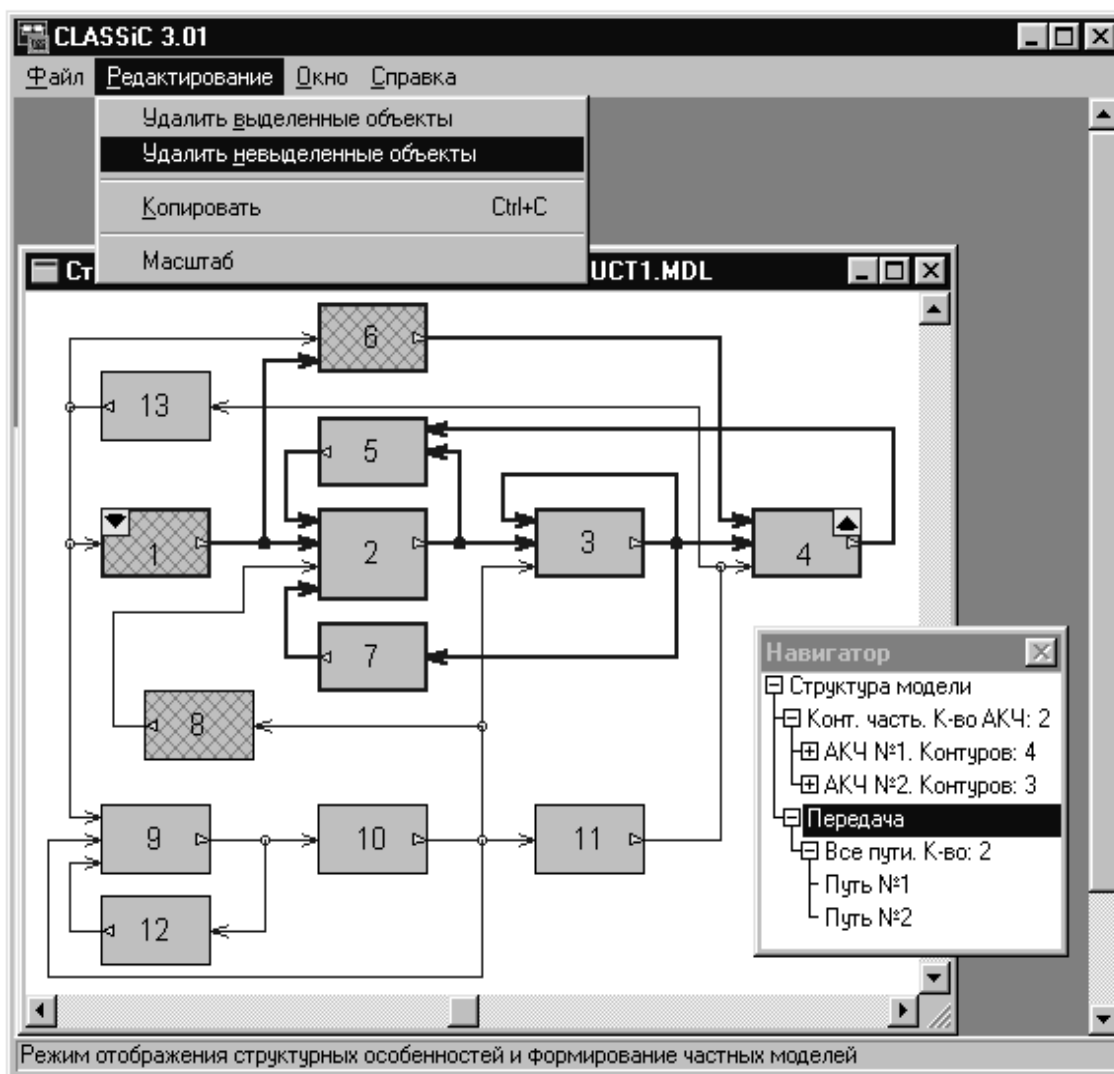


Рис. 4.3. Выделение всех объектов, формирующих назначенную передачу

4.3. Формирование частных моделей на основе структурного анализа.

На рис. 4.3 показано ниспадающее меню пункта **Редактирование** режима анализа структурных особенностей. Из него видно, что в программе предусмотрена процедура усечения модели путем одновременного удаления всех выделенных или невыделенных объектов. Выполнение команды **Удалить невыделенные элементы** приведет к появлению новой модели, а применение к ней команды **Структурные особенности** даст картину, изображенную на рис. 4.4.

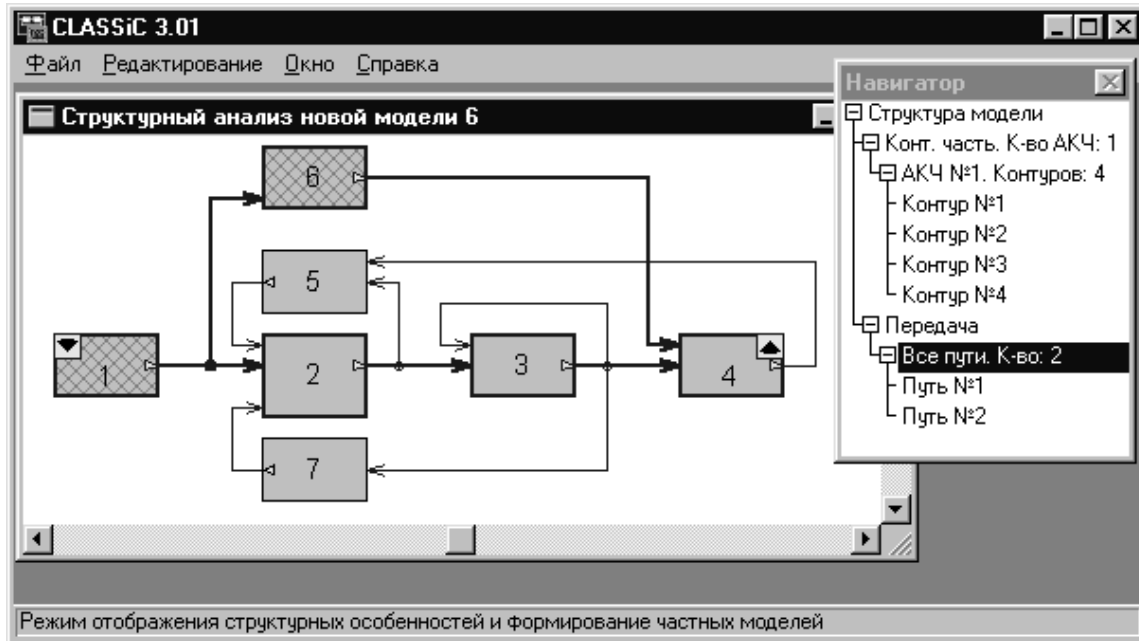


Рис. 4.4. Новая модель после удаления невыделенных объектов

В данном случае получили избыточную модель для передачи от блока 1 к блоку 4, содержащую только те блоки, которые участвуют в формировании оператора назначенной передачи. На рис. 4.4 показана ситуация, при которой на структуре обозначены все (в данном случае – два) пути передачи.

Аналогичными действиями из исходной модели могут быть получены частные модели, содержащие только контурную часть или отдельную автономную контурную часть, отдельный контур, все пути или отдельный путь передачи системы.

4.4. Отображение результатов структурного анализа в текстовой форме.

Для моделей, заданных графически, имеется возможность вывести сводную информацию по результатам анализа структурных особенностей в текстовой форме.

Если модель задана таблично, то такой вывод информации по результатам анализа структурных особенностей является единственно возможным.

Для получения сводной информации о модели и ее структурных свойствах необходимо выполнить команды меню **Расчеты|Структурные особенности (сводка)**. В результате на экране появится панель, вид которой приведен на рис. 4.5.

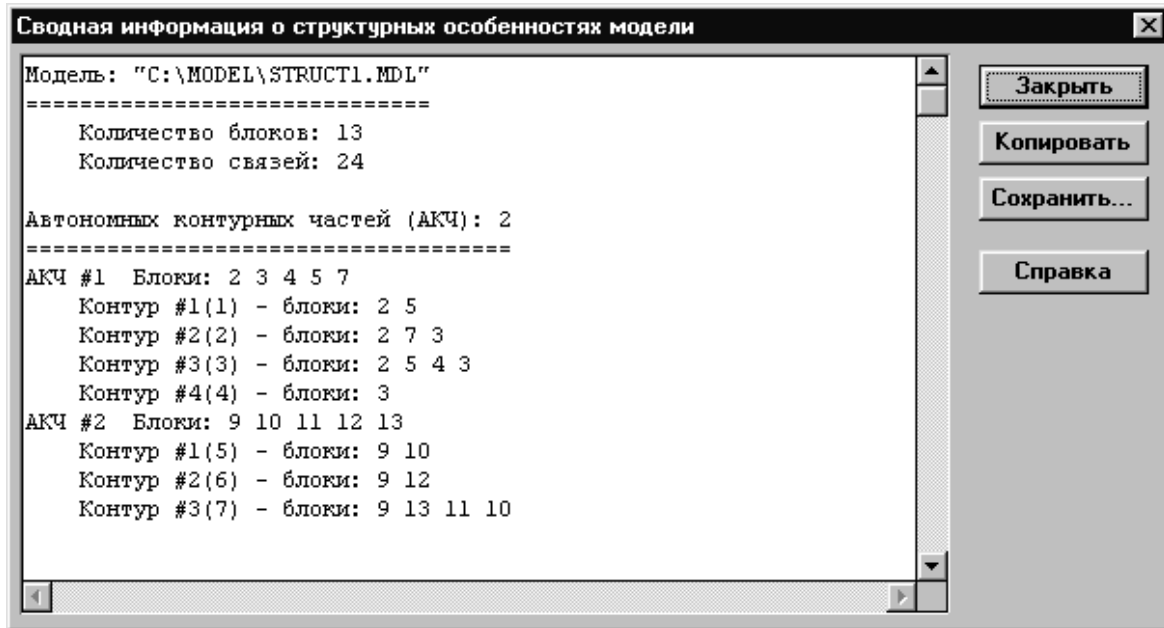


Рис. 4.5. Окно вывода результатов структурного анализа в текстовом виде

С помощью предусмотренных кнопок содержимое окна (полностью или выделенная курсором мыши часть) может быть скопировано в буфер обмена или сохранено в файле в виде текста.

Ниже приведено полное содержание этого окна для системы, изображенной на рис. 4.1.

Модель: "C:\MODEL\STRUCT1.MDL"

=====

Количество блоков: 13

Количество связей: 24

Автономных контурных частей (АКЧ): 2

=====

АКЧ #1 Блоки: 2 3 4 5 7

Контур #1(1) – блоки: 2 5

Контур #2(2) – блоки: 2 7 3

Контур #3(3) – блоки: 2 5 4 3

Контур #4(4) – блоки: 3

АКЧ #2 Блоки: 9 10 11 12 13

Контур #1(5) – блоки: 9 10

Контур #2(6) – блоки: 9 12

Контур #3(7) – блоки: 9 13 11 10

Внеконтурная часть

=====

Блоки: 1 6 8

Информация о назначенной передаче вход–выход:

=====

Блоки, определяющие передачу:

{ 1 2 3 4 5 6 7 }

Блоки, к которым передача инвариантна:

{ 8 9 10 11 12 13 }

Пути от входа к выходу:

Путь #1: блоки { 1 6 4 }

Путь #2: блоки { 1 2 3 4 }

Дополнительная информация:

=====

Отношения некасания контуров

АКЧ #1

Контур #1(1): 4

Контур #2(2): ---

Контур #3(3): ---

Контур #4(4):

Число пар некасающихся контуров – 1

Число слагаемых определителя АКЧ – 6

АКЧ #2

Контур #1(5): ---

Контур #2(6): ---

Контур #3(7):

Число пар некасающихся контуров – 0

Число слагаемых определителя АКЧ – 4

Общее число слагаемых определителя: 24

Техническая информация

=====

Время анализа топологии 0:00:00.175

Помимо информации, которая отображается в графическом редакторе при структурном анализе, здесь дополнительно также приведены отношения некасания контуров внутри каждой автономной контурной части, а также общая информация о составе определителя графа – структурной схемы.

5. АНАЛИЗ ХАРАКТЕРИСТИК И РАСЧЕТ ПОКАЗАТЕЛЕЙ КАЧЕСТВА

5.1. Общий вид характеристик

По модели в форме структурной схемы, заданной в графическом или табличном редакторе, с использованием меню **Расчеты – Характеристики** или по команде **[F9]** производится расчет передаточной функции и расчет и построение характеристик в корневой, временной и частотной областях.

Результаты отображаются в окне **Характеристики – Общий вид** (рис. 5.1).

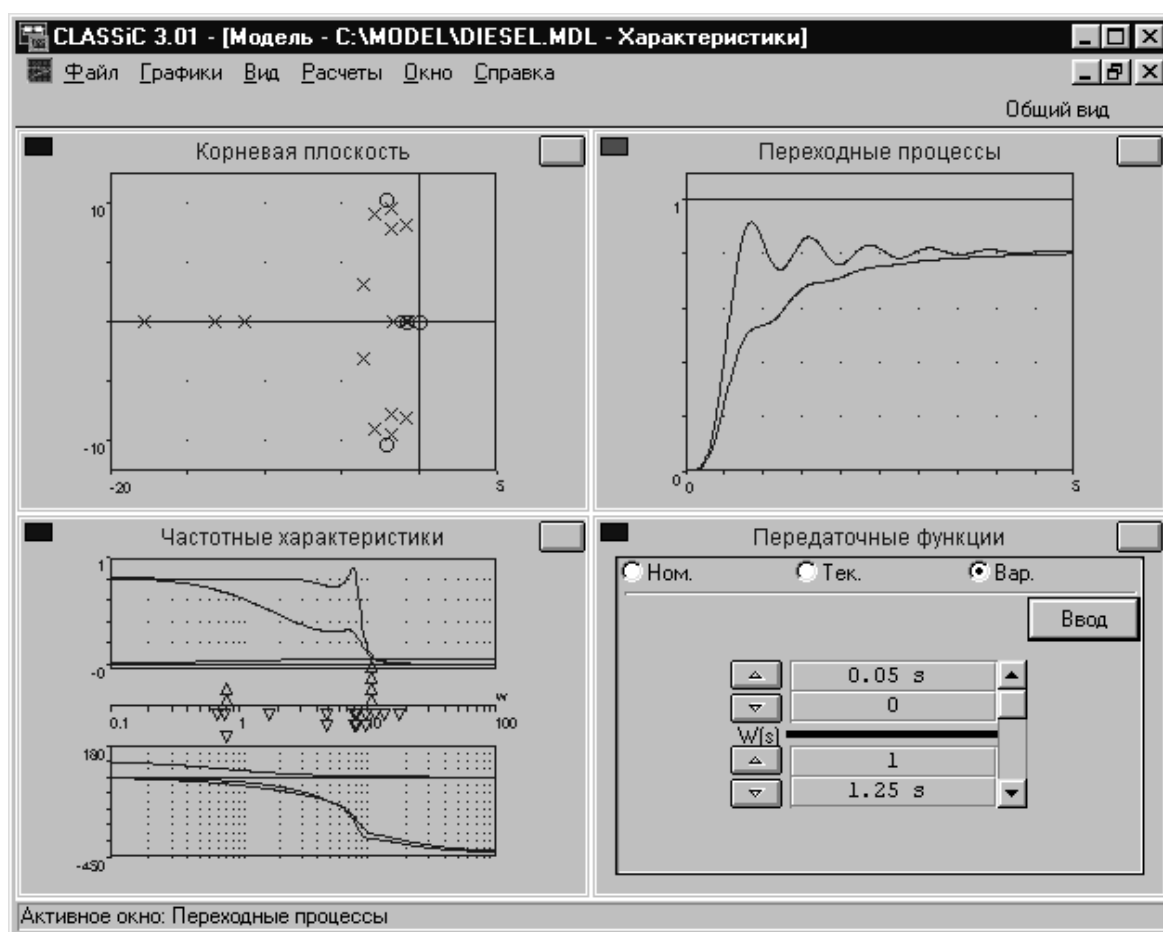


Рис. 5.1. Окно Характеристики – Общий вид

Если в исходной модели назначен варьируемый блок, то в окне передаточных функций может быть изменен его оператор. В этом случае по команде **[Ввод]** пересчитываются и отображаются характеристики:

- **номинальной** (исходной) системы, полученные при номинальном (установленном в модели) операторе варьируемого блока;
- **текущей** системы, рассчитанные при измененном операторе варьируемого блока;
- непосредственно самого **варьируемого блока**.

Для подробного изучения характеристик и редактирования параметров графиков каждое из четырех окон может быть развернуто на весь экран, для чего используется специальная кнопка в правом верхнем углу окна (рис. 5.1).

Для переключения между окнами характеристик может быть также использовано меню **Вид** или указанные в его списке команды (рис. 5.2).



Рис. 5.2. Меню Вид окна Характеристики – Общий вид

Назначение диапазонов по осям графиков, изменение числа точек и других параметров, назначение конкретных характеристик для отображения и вывод в специальном окне значений показателей качества осуществляется по ниспадающему меню **Графики** (рис. 5.3). Это же меню может быть вызвано щелчком правой кнопки мыши по любому месту поля графиков.

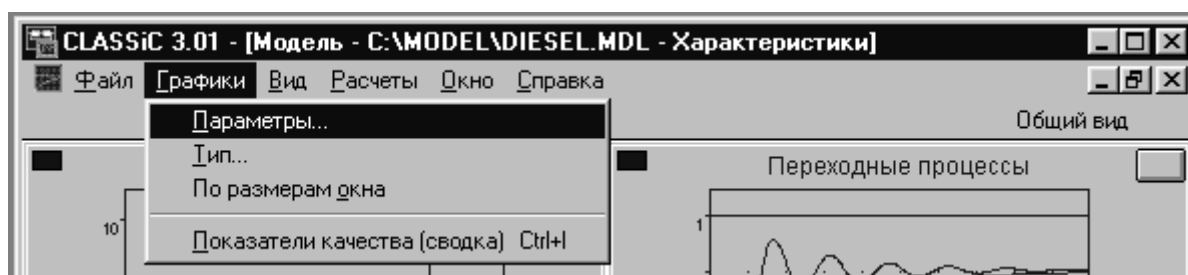


Рис. 5.3. Меню редактирования параметров отображения характеристик и показателей качества

Меню **Расчеты** дает возможность перенести новый оператор варьируемого блока в структурную схему модели, по которой были получены характеристики (рис. 5.4).

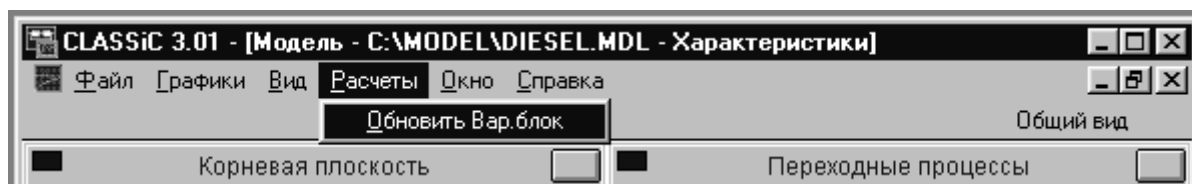


Рис. 5.4. Меню **Расчеты** окна характеристик

Эта операция переопределяет текущую систему как новую номинальную.

5.2. Окно Передаточные функции

В этом окне выводятся и редактируются передаточные функции с применением редактора передаточных функций, аналогичного тому, который используется для задания и редактирования операторов блоков исходных моделей.

Изначально выводится передаточная функция номинальной системы. Если в исходной модели назначен варьируемый блок и непосредственно в окне **Характеристики** было проведено изменение оператора варьируемого блока, зафиксированное нажатием кнопки **Ввод** (рис. 5.1), то могут быть выведены также передаточные функции текущей системы и самого варьируемого блока.

Для номинальной и текущей систем редактор передаточных функций работает только в режиме просмотра, а для варьируемого блока – и в режиме редактирования.

Развернутое на весь экран окно **Передаточные функции** имеет вид, представленный на рис. 5.5.

Имеющаяся справа от столбца коэффициентов полоса прокрутки позволяет выводить на поле окна все коэффициенты полиномов высоких степеней.

Для одновременного отображения в компактном виде целиком передаточных функций и для документирования информации следует использовать пункты меню **Вид|Передаточные функции (сводка)** – рис. 5.2. При этом образуется окно с выводом передаточных функций в текстовой форме (рис. 5.6).

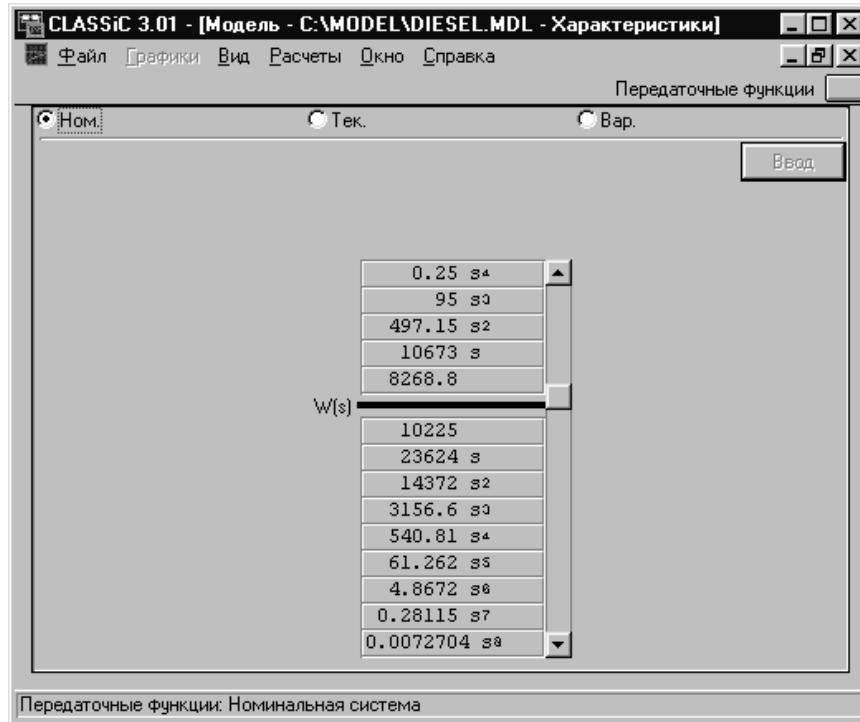


Рис. 5.5. Вид редактора передаточных функций

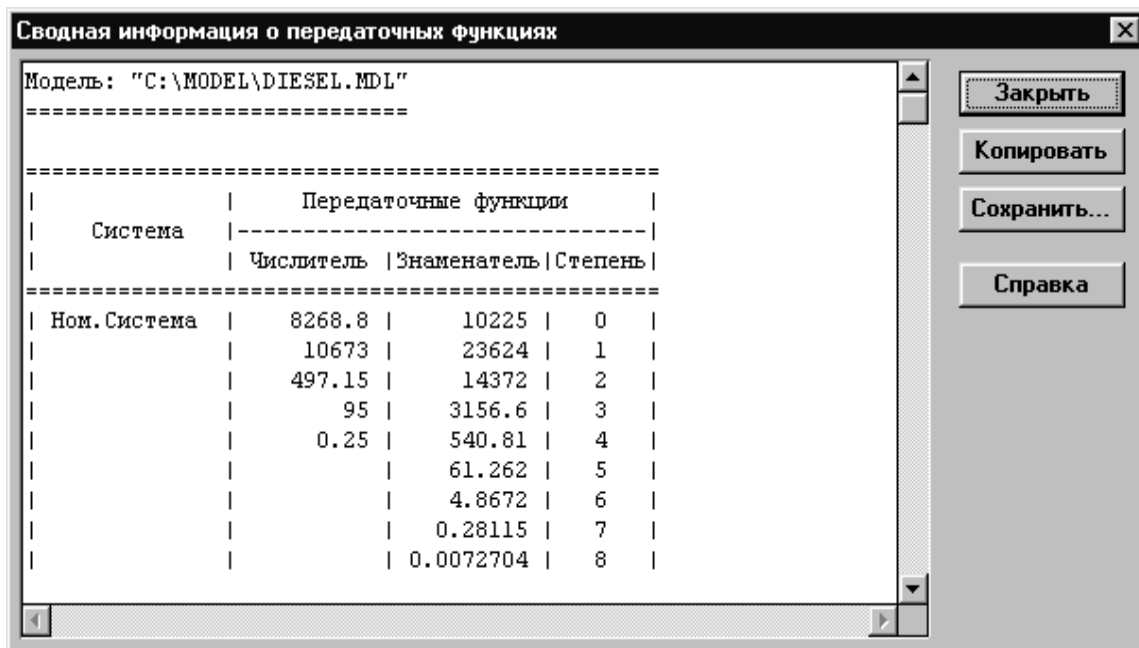


Рис. 5.6. Панель вывода сводной информации о передаточных функциях

В первом столбце указывается принадлежность передаточной функции – номинальной, текущей систем и варьлируемого блока. Второй и третий столбцы перечисляют коэффициенты полиномов числителя и

знаменателя. Правый столбец указывает степени аргумента при коэффициентах полиномов.

Вся информация окна либо выделенная с помощью мыши ее часть может быть скопирована в буфер обмена или записана в текстовый файл данных, для чего на панели имеются соответствующие кнопки.

5.3. Окно Корневая плоскость

На рис. 5.7 представлена корневая плоскость и ее панель настройки параметров, вызываемая из меню **Графики|Параметры**. Полюсы отображаются крестиками, нули – окружностями.

Масштаб в сторону увеличения может быть изменен также с помощью «резиновой рамки», т.е. растягиванием прямоугольника на плоскости с помощью мыши при нажатых кнопке мыши и клавише [Ctrl].

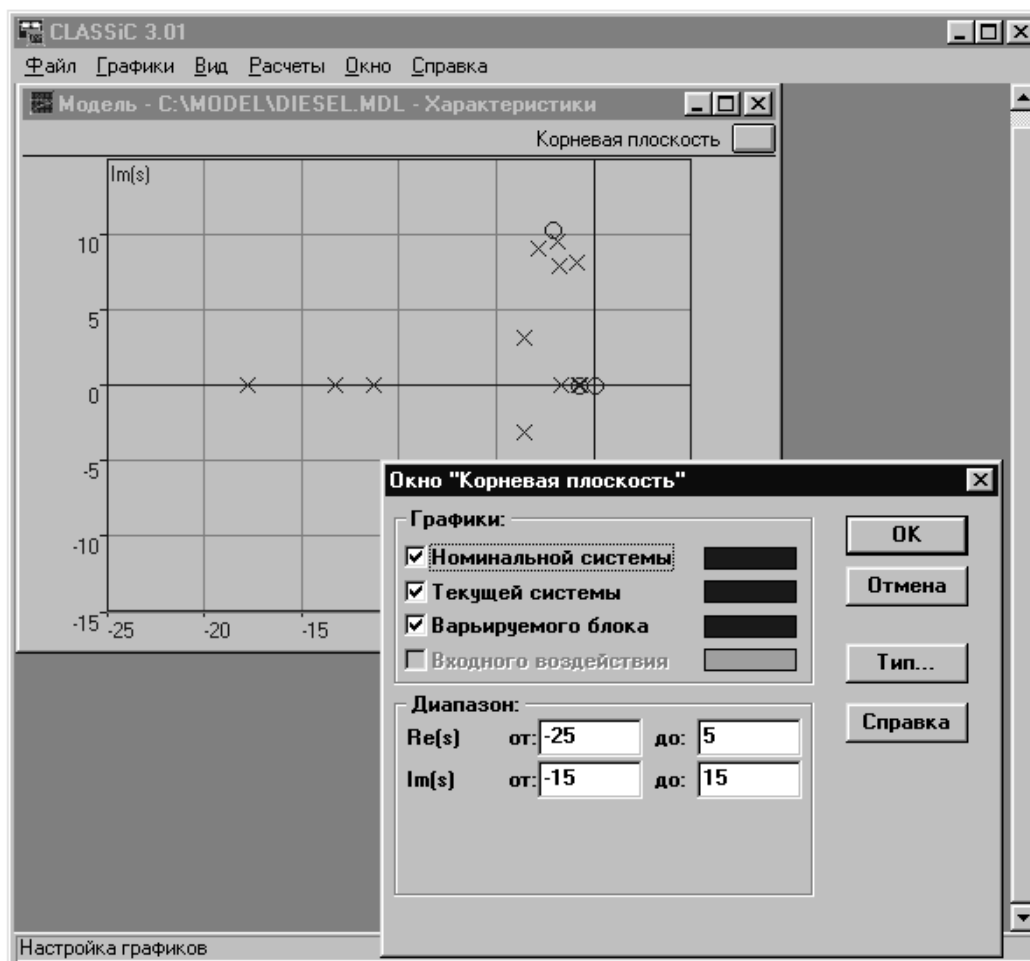


Рис. 5.7. Корневая плоскость и панель настройки параметров

На рис. 5.8 изображена панель, вызываемая из меню **Графики|Тип**. Используя эту панель, можно назначить для вывода только полюсы или только нули передаточных функций.

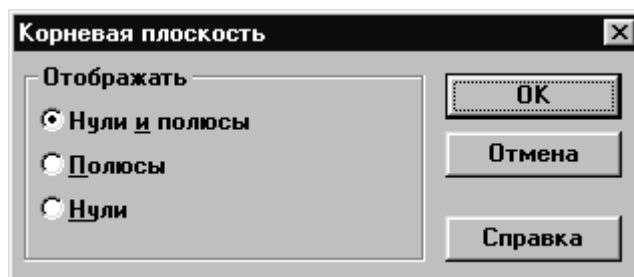


Рис. 5.8. Панель **Тип** для корневой плоскости

На рис. 5.9 представлена панель вывода сводной информации в текстовом виде. Отображаются нули и полюсы передаточных функций номинальной, текущей систем, а также варьируемого блока.

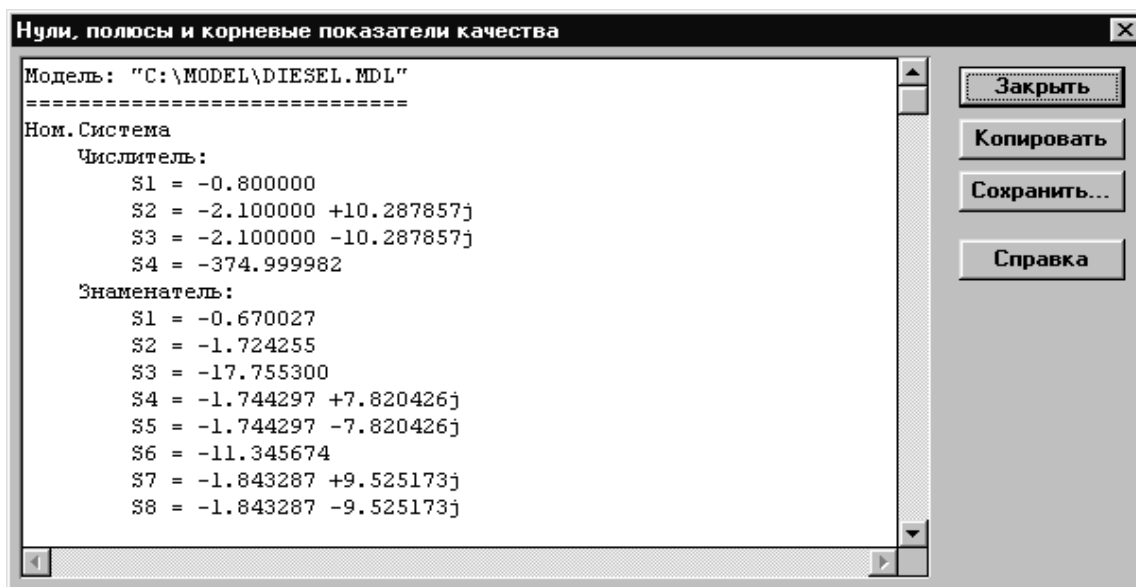


Рис. 5.9. Панель вывода сводной информации для корневой плоскости

Для номинальной и текущей систем, если их полюсы принадлежат левой полуплоскости, также рассчитываются и выводятся корневые показатели качества – абсолютное затухание и относительное затухание.

5.4. Окно **Переходные процессы**

На рис. 5.10. изображены графики переходных процессов – входного воздействия, номинальной и текущей систем.

По меню **Графики|Тип** для окна **Переходные процессы** вызывается панель выбора типа и задания параметров входного воздействия (рис. 5.10).

При задании синусоидального входного сигнала на панели выбора типа в качестве параметра появляется также и частота колебаний.

Показатели качества для нерасходящихся переходных процессов номинальной и текущей систем отображаются в текстовой форме в окне, аналогичном по формату, изображенному на рис. 5.9, – меню **Графики|Показатели качества (сводка)**.

При ступенчатом входном воздействии определяются время регулирования и установившееся значение. При условии, что наибольшее значение процесса не превосходит установившееся более чем на 100 %, определяется перерегулирование; в противном случае – максимальное (минимальное) значение.

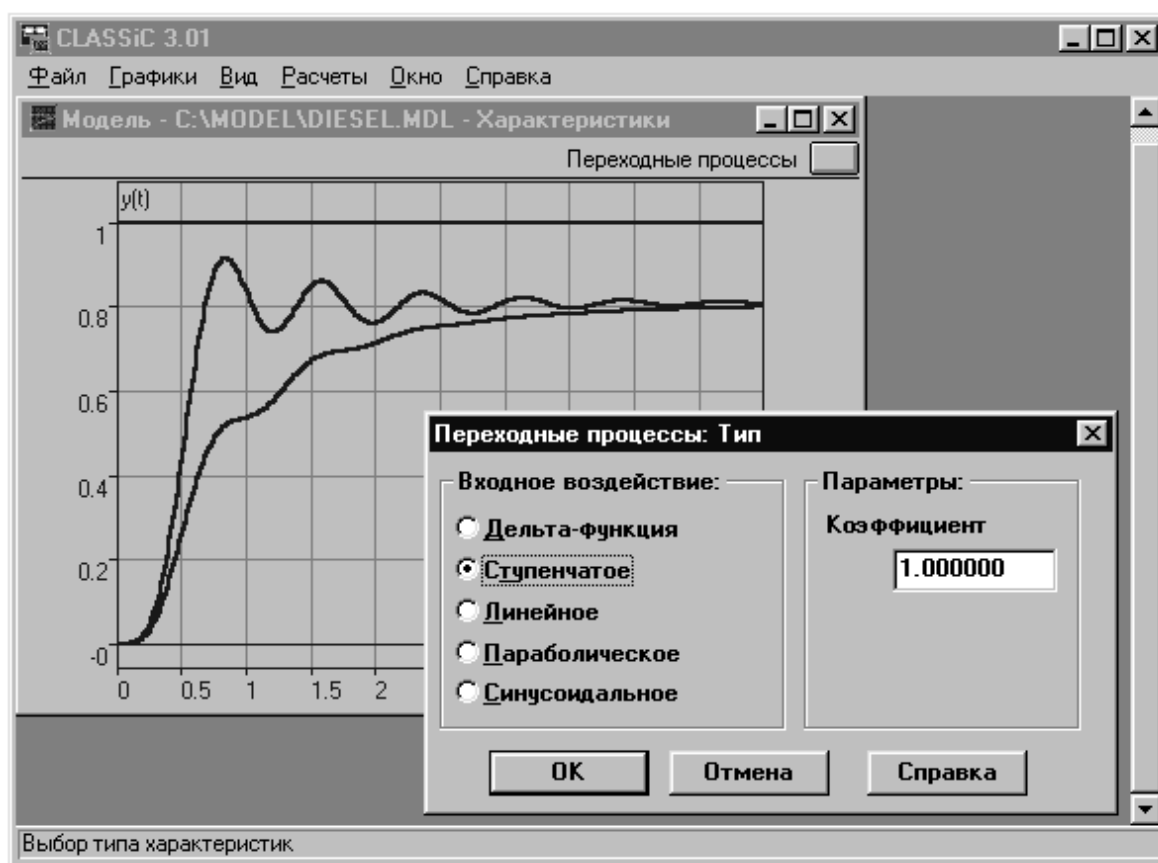


Рис. 5.10. Графики переходных процессов и панель выбора входного воздействия

В случаях δ -функции, линейного и параболического воздействий определяются максимальное (минимальное) значение, время регулирования и установившееся значение переходного процесса.

5.5. Окно Частотные характеристики

На рис. 5.11 представлены логарифмические амплитудные и частотные характеристики номинальной, текущей систем, а также варьируемого блока.

На этом же рисунке изображена панель выбора типа частотных характеристик – меню **Графики|Тип**. Графики над осью частот отображают амплитудные характеристики; под осью частот – фазовые.

На оси частот также отображаются модули нулей и полюсов передаточных функций. Масштаб, число точек и другие параметры изменяются с помощью панели – меню **Графики|Параметры**.

Масштаб в сторону укрупнения может быть изменен также с помощью «резиновой рамки», т.е. растягиванием прямоугольника на плоскости графиков или на оси частот с помощью мыши при нажатых кнопке мыши и клавише **[Ctrl]**.

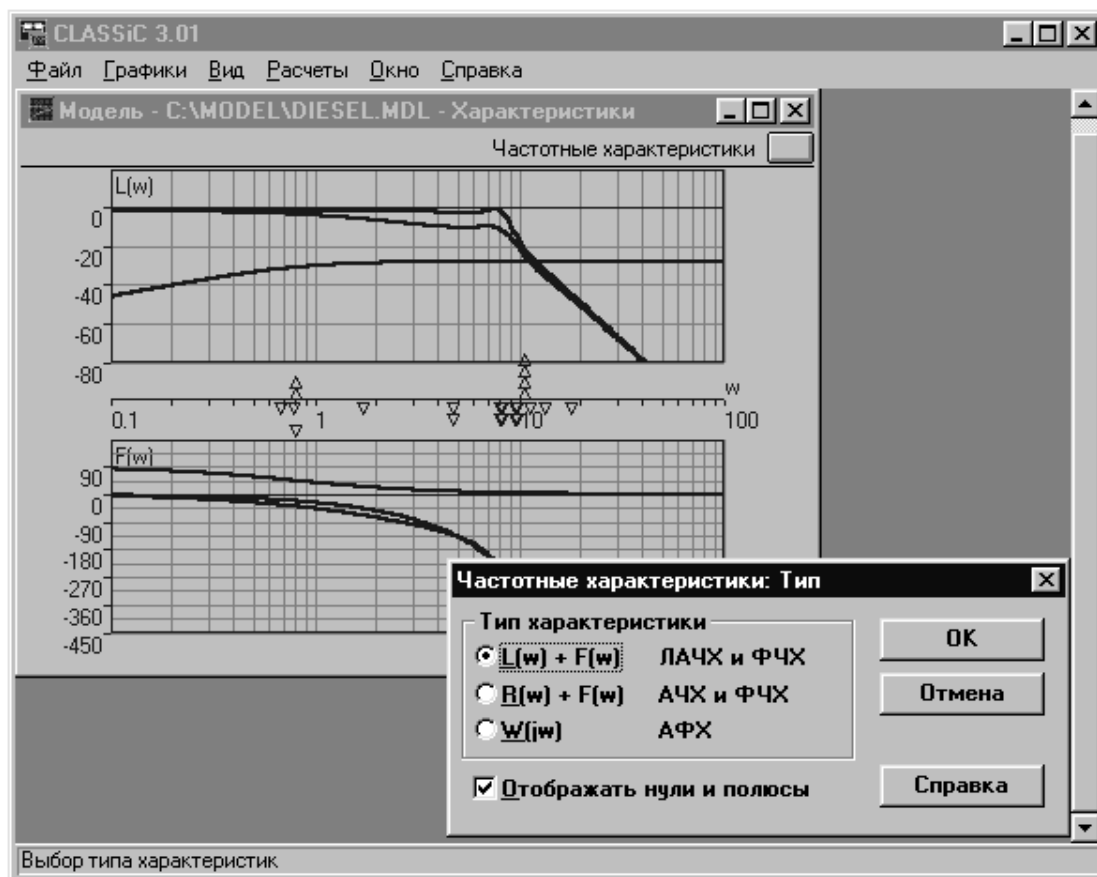


Рис. 5.11. Логарифмические частотные характеристики и панель выбора типа характеристик

На рис. 5.12 изображены амплитудно-фазовые частотные характеристики номинальной и текущей систем.

Показан пример оцифровки точки одной из характеристик.

При вызове панели (меню **Графики**|**Показатели качества (сводка)**) определяются и отображаются в текстовой форме те показатели качества из нижеследующих, которые могут быть определены с учетом особенностей частотных характеристик:

- запас по фазе;
- частота среза;
- запас по модулю;
- частота π ;
- показатель колебательности;
- частота резонанса.

Перечисленные показатели качества определяются вне зависимости от типа выбранных для отображения частотных характеристик.

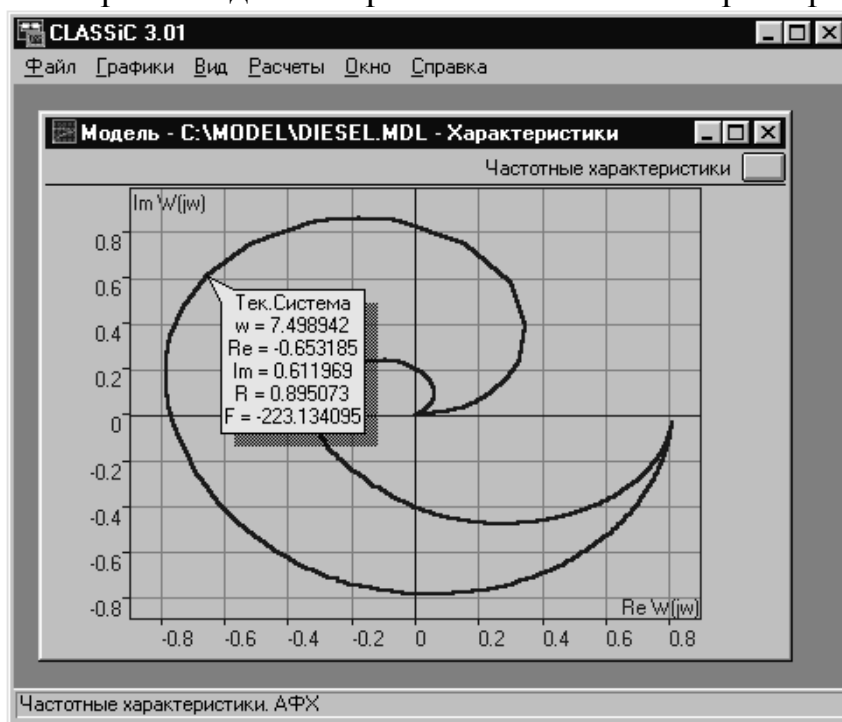


Рис. 5.12. Амплитудно-фазовые характеристики

6. ЗАКЛЮЧЕНИЕ

Программа **CLASSiC-3.01** предоставляет возможность расчета в интерактивном режиме сложных систем большой размерности. Программа протестирована на моделях различных технических систем с развитой организацией (до 100 блоков), определители графов (структурных схем) которых содержат десятки и сотни тысяч слагаемых, общий порядок уравнений – 40.

Учебное издание

ТЕОРИЯ АВТОМАТИЧЕСКОГО УПРАВЛЕНИЯ

Лабораторный практикум

Часть 2

Составители

ЗАЙЦЕВ Александр Петрович
МИТАЕНКО Анатолий Дмитриевич
ОБРАЗЦОВ Константин Валентинович

Научный редактор

кандидат технических наук, доцент
Ю.Н. Дементьев


**Отпечатано в Издательстве ТПУ в полном соответствии
с качеством предоставленного оригинал-макета**

Подписано к печати 00.00.2011. Формат 60x84/16. Бумага «Снегурочка».
Печать XEROX. Усл. печ. л. 5,24. Уч.-изд. л. 4,74.
Заказ . Тираж 100 экз.



Национальный исследовательский Томский политехнический университет
Система менеджмента качества
Издательства Томского политехнического университета сертифицирована
NATIONAL QUALITY ASSURANCE по стандарту BS EN ISO 9001:2008



ИЗДАТЕЛЬСТВО  ТПУ. 634050, г. Томск, пр. Ленина, 30
Тел./факс: 8(3822)56-35-35, www.tpu.ru