

Федеральное агентство по образованию

Томский государственный
архитектурно-строительный университет

УПРАВЛЕНИЕ ТЕХНИЧЕСКИМИ СИСТЕМАМИ
Методические указания
и задания для контрольных работ

Составитель: П.В. Бурков

Томск 2008

Управление техническими системами: задания и методические указания для контрольных работ / Сост. П.В. Бурков. – Томск: Изд-во Том. гос. архит-строит. ун-та, 2008. – 23 с.

Рецензент к.т.н. Ю.А. Орлов
Редактор Е.Ю. Глотова

Методические указания с заданиями для контрольных работ по дисциплине «Управление техническими системами» предназначены для студентов всех специальностей заочной формы обучения механического и лесотехнического факультетов.

Печатаются по решению методического семинара кафедры общей электротехники и автоматики, протокол № 8 от 7 мая 2007 г.

Утверждены и введены в действие проректором по учебной работе В.С. Дзюбо

с 23.05.08
до 23.05.13

Подписано в печать
Формат 60x84/16. Бумага офсет. Гарнитура Таймс. Печать офсет.
Уч.-изд.л. 1,2. Тираж 500 экз. Заказ №

Изд-во ТГАСУ, 634003, г. Томск, пл. Соляная, 2.
Отпечатано с оригинал-макета в ООП ТГАСУ.
634003, г. Томск, ул. Партизанская, 15.

ОБЩИЕ УКАЗАНИЯ

Контрольные работы выполняются аккуратно в ученических тетрадях в клетку с полями на страницах. Неряшливо выполненные работы, а также работы с частыми исправлениями будут отсылаться назад без проверки.

Вариант задания выбирается по последней цифре учебного шифра, который соответствует номеру зачетной книжки.

Вначале записывается вопрос и приводится схема устройства с необходимыми обозначениями и нумерацией. Схемы и рисунки выполняются карандашом. Ответы на вопросы или описания работы приборов и устройств должны сопровождаться ссылками на соответствующие обозначения или нумерацию элементов. При изложении следует стремиться к лаконичности, но с отображением принципиальной или физической сущности явлений и взаимодействий со всеми необходимыми объяснениями и обоснованиями.

Для составления полного и правильного ответа студенту необходимо проработать материал по всем литературным источникам, имеющимся в его распоряжении (2–3 источника, как минимум). В конце ответов приводятся данные по использованной литературе: автор, название, издательство, год выпуска, страница.

Повторно выполненную работу высылают вместе с незачтенной работой, исправления в незачтенной работе по замечаниям рецензента не допускаются. Поправки и уточнения в зачтенных работах допускаются во вклеенных листах-вставках.

При подготовке к зачету или экзамену полезно ответить на вопросы всех вариантов, провести анализ вопросов, их значения в практике, предложить свои вопросы, представляющие принципиальный, теоретический или практический интерес.

Непонятные или сложные вопросы, встречающиеся при изучении курса, необходимо записывать для четкого их формулирования при выяснениях на консультациях.

ЗАДАНИЯ К КОНТРОЛЬНЫМ РАБОТАМ

Контрольная работа № 1

Задание 1.1. Выполняется для всех вариантов контрольных работ.

Дать описание следующих вопросов с необходимыми схемами, графиками и рисунками.

1. Понятие об автоматических системах (АС) и их классификация.
2. Системы автоматического регулирования (САР):
 - задачи, решаемые САР;
 - принципы построения (регулирования) САР и их функциональные схемы;
 - понятие о передаточных функциях и структурных схемах.
3. Виды обратных связей, их назначение.
4. Устойчивость САР. Частотные критерии устойчивости. Критерии устойчивости Михайлова.
5. Классификация и характеристика объектов регулирования.
6. Устойчивость САР. Алгебраические критерии устойчивости. Критерии устойчивости Рауса–Гурвица.
7. Классификация САР (регуляторы прямого и непрямого действия, статическое и астатическое регулирование).
8. Типовые звенья САР. Безинерционное и дифференцирующее звенья (уравнения, передаточные функции).
9. Типовые звенья САР. Интегрирующее и апериодическое звенья (уравнения, передаточные функции).
10. Критерии качества автоматического регулирования. Пути повышения качества САР.
11. Последовательное и параллельное соединения звеньев. Их результирующие передаточные функции.
12. Типовые звенья САР. Колебательное звено (уравнение, передаточная функция).

Контрольная работа № 2

Задание.

Для проектируемой системы автоматического регулирования известна передаточная функция замкнутой системы, которая имеет вид:

$$W_{(p)} = \frac{K}{p(T_1 p + 1)(T_2 + 1) + K}$$

При этом известны значения параметров системы, сведенные в табл. 1 по вариантам.

Необходимо, используя критерий Михайлова, определить, устойчива ли система.

Таблица 1

| | Варианты задания | | | | | | | | | |
|----------|------------------|-----|-----|-----|-----|-----|-----|-----|-----|-----|
| | 1 | 2 | 3 | 4 | 5 | 6 | 7 | 8 | 9 | 0 |
| T_1 | 0,9 | 1 | 0,8 | 1 | 0,9 | 0,8 | 1 | 0,9 | 0,8 | 1 |
| T_2, c | 20 | 23 | 26 | 20 | 23 | 26 | 20 | 23 | 26 | 20 |
| K | 0,4 | 0,5 | 0,6 | 0,4 | 0,5 | 0,6 | 0,4 | 0,5 | 0,6 | 0,4 |

Методические указания

Для выполнения задания необходимо изучить критерий Михайлова, позволяющий косвенно оценить устойчивость системы и выполнить задание по следующему плану:

1. Формулировка критерия Михайлова.
2. Что необходимо знать о системе, чтобы оценить ее устойчивость с помощью критерия Михайлова?
3. Как из передаточной функции системы получить характеристическое уравнение, и какие преобразования нужно выполнить над этим уравнением, чтобы использовать его для оценки устойчивости с помощью критерия Михайлова.

4. Следуя вышеизложенному, получите характеристическое уравнение системы, замените в уравнении параметр p на $j\omega$, выделите вещественную и мнимую части уравнения.
5. Вычислите вещественную и мнимую части для ω , равной 0, 5, 10, 20, 40, 50.
6. По полученным данным постройте годограф Михайлова.
7. Приведите основные свойства годографа (кривой) Михайлова и, используя их, дайте оценку устойчивости системы, для которой построена кривая.

Контрольная работа № 3

1. Синтезировать в формате моделирующей программной системы CLASSIC3 структурную схему САУ согласно заданным вариантам. Определить передаточную функцию по задающему воздействию номинальной замкнутой системы и характеристический полином замкнутой САУ.

2. Для определения устойчивости замкнутой САУ по критерию Михайлова преобразуем характеристический полином замкнутой САУ в частотный полином путем подстановки $s = j\omega$: Годограф Михайлова может быть построен в среде моделирующей системы CLASSIC3. Для этого необходимо изобразить одно звено, назначив его одновременно входным и выходным. Передаточную функцию этого звена установить равной характеристическому полиному. Амплитудно-фазовая характеристика (АФХ) этого фиктивного звена и будет представлять собой годограф Михайлова. При этом необходимо крупным планом (за счет установки пределов построения АФХ) изобразить начальную часть годографа. Начальное значение частоты построения АФХ фиктивного звена надо установить возможно меньшей, например, $\omega = 0,0001 \text{ с}^{-1}$.

3. Переходной характеристике соответствуют показатели качества. Анализ переходной характеристики показывает, что показатели качества замкнутой САУ в динамических режимах

могут быть улучшены, если провести оптимизацию регулятора. Определить показатели качества в формате моделирующей программной системы CLASSIC3.

4. Исследовать методом цифрового моделирования:

- а) объект управления (по управляющему и возмущающему воздействиям);
- б) систему модального управления с измеряемыми координатами (по управляющему и возмущающему воздействиям);
- в) систему «объект управления – наблюдатель полного порядка» (по управляющему воздействию с отклонением по начальным условиям);
- г) систему модального управления, замкнутую через «наблюдатель полного порядка» (по управляющему воздействию);
- д) систему «объект управления – наблюдатель пониженного порядка» (по управляющему воздействию с отклонением по начальным условиям);
- е) систему модального управления, замкнутую через «наблюдатель пониженного порядка» (по управляющему воздействию).

| Варианты структурных схем и параметров объекта управления | | |
|--|----------------------------------|--|
| № варианта студента по списку | Вариант структурной схемы | Вариант параметров объекта управления |
| 1 | 1 | 1 |
| 2 | 2 | 2 |
| 3 | 3 | 3 |
| 4 | 4 | 4 |
| 5 | 5 | 5 |
| 6 | 6 | 1 |
| 7 | 7 | 2 |
| 8 | 1 | 3 |
| 9 | 2 | 4 |
| 10 | 3 | 5 |

Окончание таблицы

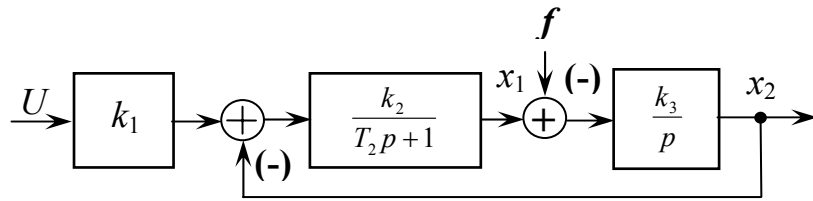
| № варианта студента по списку | Вариант структурной схемы | Вариант параметров объекта управления |
|-------------------------------|---------------------------|---------------------------------------|
| 11 | 4 | 1 |
| 12 | 5 | 2 |
| 13 | 6 | 3 |
| 14 | 7 | 4 |
| 15 | 1 | 5 |
| 16 | 2 | 1 |
| 17 | 3 | 2 |
| 18 | 4 | 3 |
| 19 | 5 | 4 |
| 20 | 6 | 5 |
| 21 | 7 | 1 |
| 22 | 1 | 2 |
| 23 | 2 | 3 |
| 24 | 3 | 4 |
| 25 | 4 | 5 |
| 26 | 5 | 1 |
| 27 | 6 | 2 |
| 28 | 7 | 3 |
| 29 | 1 | 4 |
| 30 | 2 | 5 |

Таблица параметров объектов управления

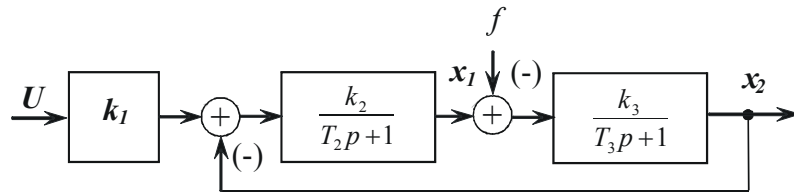
| № варианта параметров | K_1 о.е. | K_2 о.е. | K_3 о.е. | T_1 с | T_2 с | T_3 с |
|-----------------------|---------------|---------------|---------------|------------|------------|------------|
| 1 | 2,2 | 1,5 | 2,0 | 1 | 3 | 5 |
| 2 | 1,5 | 1,0 | 1,2 | 0,8 | 3 | 1,7 |
| 3 | 2,5 | 1,4 | 0,7 | 1,3 | 2 | 1 |
| 4 | 3,0 | 0,8 | 1,1 | 0,7 | 1 | 1,6 |
| 5 | 2,5 | 0,7 | 1,5 | 1,5 | 2 | 0,8 |

Структурные схемы объектов управления

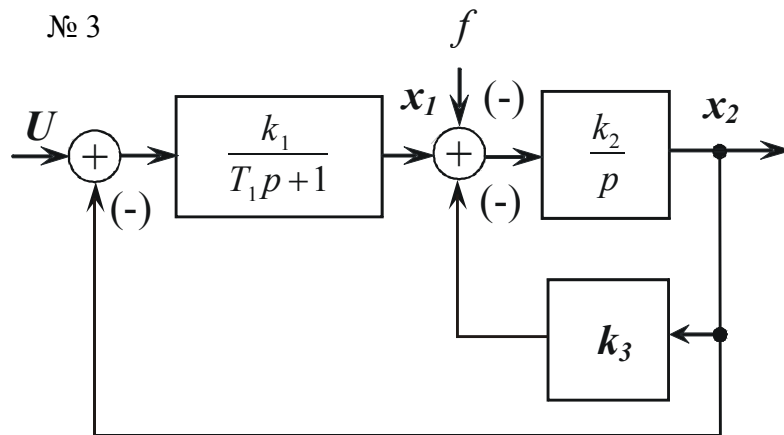
№ 1



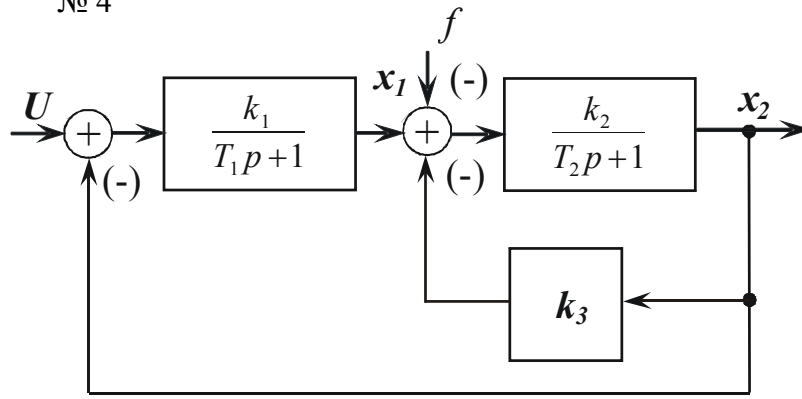
№ 2



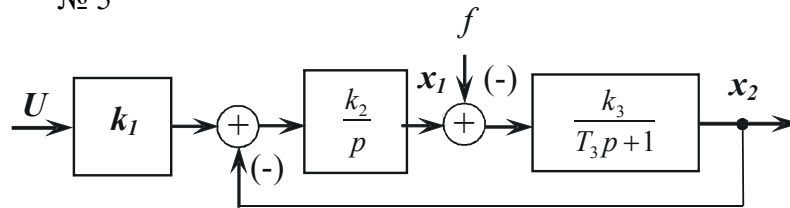
№ 3



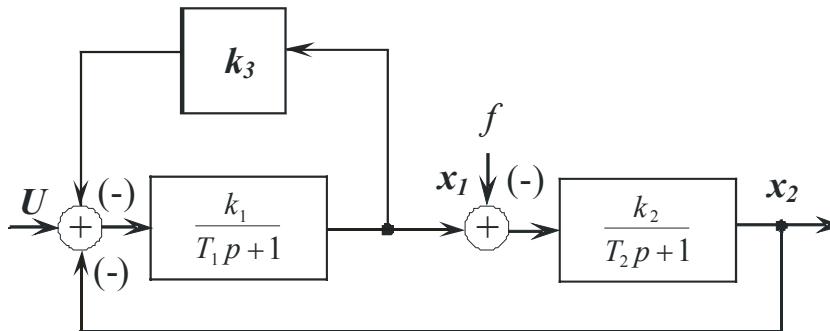
№ 4

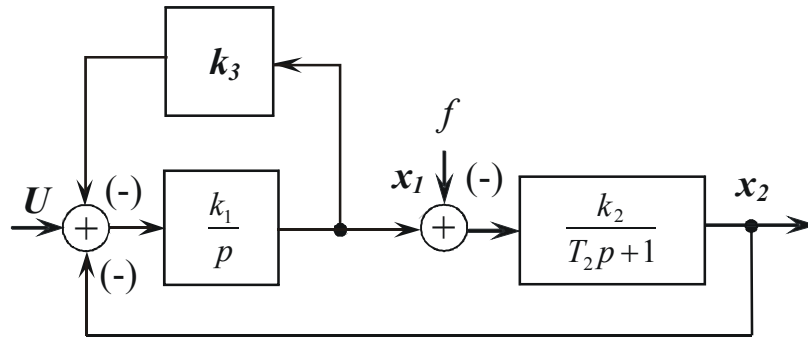


№ 5



№ 6





ПРИМЕР РЕШЕНИЯ

1. На рис. 1 представлена принципиальная схема системы управления скоростью электродвигателя постоянного тока независимого возбуждения M . Управление осуществляется двигателем от усилителя постоянного тока УПТ. Частота вращения двигателя измеряется датчиком скорости BR . Сигнал, пропорциональный частоте вращения, снимается с потенциометра R_1 , вычитается из задающего напряжения U_3 , которое устанавливается потенциометром R_2 . Разностный сигнал поступает на усилитель УПТ. За счет отрицательной обратной связи значение частоты вращения двигателя поддерживается на заданном уровне с определенной точностью. Потенциометр R_1 предназначен для настройки коэффициента передачи цепи обратной связи по частоте вращения. Система автоматического управления частотой вращения двигателя является статической, что предопределяет наличие ошибки управления в статическом режиме. Устранить статическую ошибку можно за счет введения специальных корректирующих устройств при оптимизации регулятора. САУ характеризуется следующими исходными данными:

$K_R=0,5$ – коэффициент передачи потенциометра R_1 ;

$K_{\text{тр}} = U_{\text{тр}}/\omega = 0,4$ (В·с) – коэффициент передачи тахогенератора;
 $c = E_{\text{д}}/\omega = 0,7$ (В·с) – конструктивный коэффициент двигателя;
 $L_{\text{я}} = 0,01$ (Гн) – индуктивность цепи обмотки якоря двигателя;
 $R_{\text{я}} = 0,1$ (Ом) – сопротивление цепи обмотки якоря двигателя;
 $J = 0,8$ (Н·м·с²) – момент инерции вращающихся масс, приведенный к валу двигателя;

$$W_y(s) = \frac{10}{0,04s + 1} \quad \text{– передаточная функция усилителя УПТ.}$$

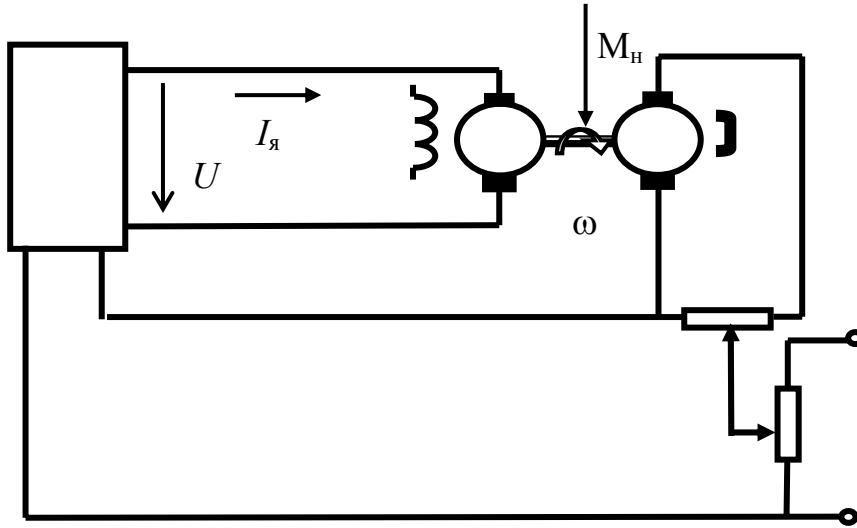


Рис. 1

2. Функциональная схема системы автоматического управления частотой вращения электродвигателя постоянного тока независимого возбуждения показана на рис. 2. Элемент сравнения ЭС образован соответствующим соединением потенциометров R_1 и R_2 . Обозначения остальных элементов функциональной схемы соответствуют обозначениям на принципиаль-

ной схеме. На функциональной схеме стрелками указаны направленные воздействия элементов друг на друга. Возмущением для САУ является момент нагрузки двигателя M_n .

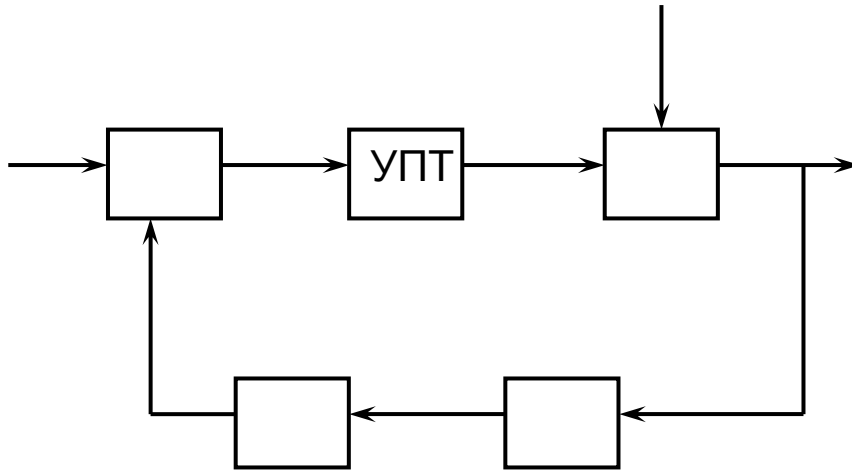
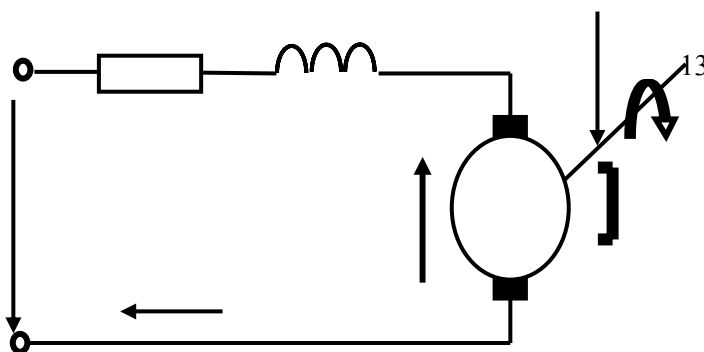


Рис. 2

3. Для составления структурной схемы САУ выведем передаточные функции двигателя по управляющему и возмущающему воздействиям (рис. 3).

Двигатель Д характеризуется сопротивлением цепи якоря $R_{я}$ и индуктивностью $L_{я}$. На вход двигателя подается напряжение U (управление). При вращении двигателя с угловой частотой ω возникает ЭДС E .



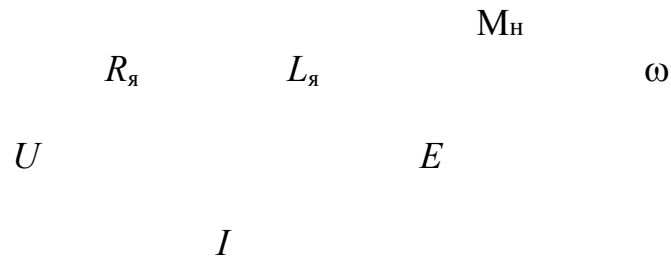


Рис. 3

На валу электродвигателя действует момент нагрузки M_n (возмущение). Двигатель развивает момент M_d . За выходную величину примем угловую частоту вращения вала ω .

Двигателю соответствует исходная система уравнений

$$\left. \begin{aligned} U &= E + IR_{\text{я}} + L_{\text{я}}dI/dt, \\ Jd\omega/dt &= M_d - M_n, \\ M_d &= cI, \\ E &= c\omega, \end{aligned} \right\} (1)$$

где c – постоянный конструктивный коэффициент.
В операторной форме уравнения (1) запишутся как

$$\left. \begin{aligned} U &= E + (R_{\text{я}} + L_{\text{я}}p)I, \\ Jp\omega &= M_d - M_n, \\ M_d &= cI, \\ E &= c\omega. \end{aligned} \right\} (2)$$

Систему уравнений (2) можно уже рассматривать как алгебраическую систему. Для вывода передаточных функций

уравнения (2) приводятся к одному уравнению путем исключения промежуточных величин, при этом все переменные заменяются на их изображения по Лапласу: $U \rightarrow U(s)$, $I \rightarrow I(s)$, $\omega \rightarrow \omega(s)$, $M_n \rightarrow M_n(s)$, $M_d \rightarrow M_d(s)$, $E \rightarrow E(s)$. При определении передаточной функции по управлению $W_{dy}(s)$ надо полагать $M_n(s)=0$, а при определении передаточной функции по возмущению $W_{дв}(s)$ надо полагать $U(s)=0$.

Выполнив указанную последовательность действий, получим:

$$W_{dy}(s) = \frac{\dot{r}(s)}{U(s)} = \frac{c}{JL_я s^2 + JR_я s + c^2} = \quad (3)$$

$$= \frac{K_1}{T_я T_м s^2 + T_м s + 1},$$

$$W_{дв}(s) = \frac{\dot{r}(s)}{M_n(s)} = \frac{L_я s + R_я}{JL_я s^2 + JR_я s + c^2} = \quad (4)$$

$$= \frac{K_2(T_я s + 1)}{T_я T_м s^2 + T_м s + 1},$$

где $T_я = L_я/R_я = 0,01$ с; $T_м = JR_я/c^2 = 0,16$ с; $K_1 = 1/c = 1,43$;
 $K_2 = R_я/c^2 = 0,2$.

В соответствии с рассчитанными параметрами передаточные функции двигателя в числовом выражении принимают вид

$$W_{dy}(s) = \frac{\dot{r}(s)}{U(s)} = \frac{1,43}{0,0016s^2 + 0,16s + 1}; \quad 15$$

(5)

$$W_{ог}(s) = \frac{rI(s)}{M_{II}(s)} = \frac{0,2(0,1s + 1)}{0,0016s^2 + 0,16s + 1} =$$
$$= \frac{0,02s + 0,2}{0,0016s^2 + 0,16s + 1} \quad (6)$$

4. Структурная схема САУ представлена на рис. 4.

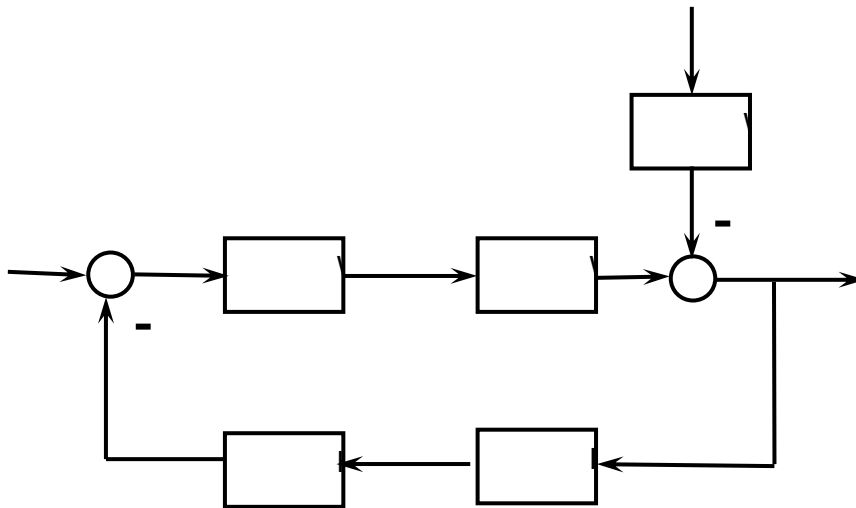


Рис. 4

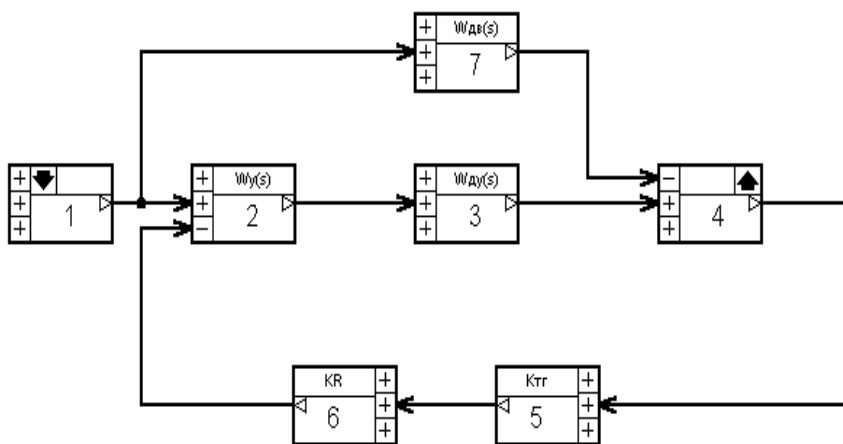


Рис. 5

В формате моделирующей программной системы CLASSIC3 структурная схема САУ изображена на рис. 5.

5. Передаточная функция по задающему воздействию номинальной замкнутой системы согласно структурной схеме приводится к выражению

$$\begin{aligned} W_3(s) &= \frac{W_y(s)W_{\text{дy}}(s)}{1 + W_y(s)W_{\text{дy}}(s)K_{\text{тt}}K_R} = \\ &= \frac{3,7}{1 + 0,05s + 0,002s^2 + 0,000016s^3}. \end{aligned} \quad (7)$$

Передаточная функция разомкнутой системы по задающему воздействию приводится к выражению

$$\begin{aligned} W_p(s) &= W_y(s)W_{\text{дy}}(s)K_{\text{тt}}K_R = \\ &= \frac{2,86}{1 + 0,2s + 0,008s^2 + 0,000064s^3}. \end{aligned} \quad (8)$$

6. Номинальная САУ изначально является одноконтурной и при оптимизации регулятора никаких дополнительных преобразований структурной схемы не требуется.

7. Характеристический полином замкнутой САУ согласно выражению (7) определится как

$$D(s) = a_0 s^3 + a_1 s^2 + a_2 s + a_3 = \quad (9)$$

$$= 0,000016s^3 + 0,002s^2 + 0,05s + 1.$$

По коэффициентам характеристического полинома замкнутой САУ составим определитель Гурвица:

$$\Delta = \begin{vmatrix} a_1 & a_3 & 0 \\ a_0 & a_2 & 0 \\ 0 & a_1 & a_3 \end{vmatrix} = \begin{vmatrix} 0,002 & 1 & 0 \\ 0,000016 & 0,05 & 0 \\ 0 & 0,002 & 1 \end{vmatrix}.$$

Все коэффициенты характеристического уравнения (9) положительны, а определитель с четным индексом

$$\Delta_2 = \begin{vmatrix} a_1 & a_3 \\ a_0 & a_2 \end{vmatrix} = 0,002 \cdot 0,05 - 0,000016 \cdot 1 \geq 0.$$

Следовательно,

$$\Delta_3 = a_3 \cdot \Delta_2 = 1 \cdot (0,002 \cdot 0,05 - 0,000016 \cdot 1) \geq 0$$

Замкнутая САУ устойчива.

Для определения устойчивости замкнутой САУ по критерию Михайлова преобразуем характеристический полином (9) замкнутой САУ в частотный полином путем подстановки $s = j\omega$:

$$D(j\omega) = a_0 (j\omega)^3 + a_1 (j\omega)^2 + a_2 j\omega + a_3 =$$

Найдем корни уравнений $P(\omega) = 0$ и $Q(\omega) = 0$. Корнями будут значения частот, при которых вещественная и мнимая части обращаются в нуль. Так как годограф Михайлова строится для

положительных значений частоты, то будем рассматривать только положительные корни.

Для уравнения

$$1 - 0,002\omega^2 = 0 \quad \text{корень } \omega = 22,4 \text{ c}^{-1}.$$

Для уравнения

$\omega(0,05 - 0,000016\omega^2)$ определяем корни

$$\omega_0 = 0; \omega_2 = 55,9 \text{ c}^{-1}.$$

Расположив корни в порядке возрастания их значений, заключаем, что ω_0 принадлежит уравнению $Q(\omega)=0$, корень ω_1 принадлежит уравнению $P(\omega)=0$ и ω_2 принадлежит уравнению $Q(\omega)=0$. Система устойчива, так как выполняется условие перемежаемости корней.

Годограф Михайлова может быть построен в среде моделирующей системы CLASSIC3. Для этого необходимо изобразить одно звено, назначив его одновременно входным и выходным. Передаточную функцию этого звена установить равной характеристическому полиному (9). Амплитудно-фазовая характеристика этого фиктивного звена и будет представлять собой годограф Михайлова. При этом необходимо крупным планом (за счет установки пределов построения АФХ) изобразить начальную часть годографа. Начальное значение частоты построения АФХ фиктивного звена надо установить возможно меньшей, например, $\omega = 0,0001 \text{ c}^{-1}$.

На рис. 6 показан годограф Михайлова для рассматриваемой замкнутой САУ, построенный таким способом. Годограф начинается на вещественной положительной оси комплексной плоскости в точке $P(\omega) = 1$, последовательно в положительном направлении проходит три квадранта, нигде не возвращается и не обращается в нуль. Форма годографа соответствует устойчивой системе третьего порядка.

8. Переходная характеристика номинальной замкнутой САУ показана на рис.7. Переходной характеристике соответствуют показатели качества, представленные на рис. 8. Анализ переходной характеристики показывает, что показатели качества замкнутой САУ в динамических режимах могут быть улучшены, если провести оптимизацию регулятора.

Для выбора и оптимальной настройки регулятора САУ должна быть приведена к простейшей одноконтурной алгоритмической схеме (рис. 9).

На схеме обозначены: $W_p(s)$ – передаточная функция регулятора, $W_o(s)$ – передаточная функция некоторого условного объекта управления с передаточной функцией, равной передаточной функции разомкнутой одноконтурной САУ. Для нашего случая $W_o(s)$ будет равна передаточной функции (8). Согласно используемой нами методики оптимизации необходимо записать передаточную функцию (8) в нормированной форме. С этой целью представим характеристический полином передаточной функции двигателя

$0,0016s^2+0,16s+1$ в виде

$$T_2^2 s^2 + T_1 s + 1, \text{ где } T_2^2 = 0,0016, T_1 = 0,16.$$

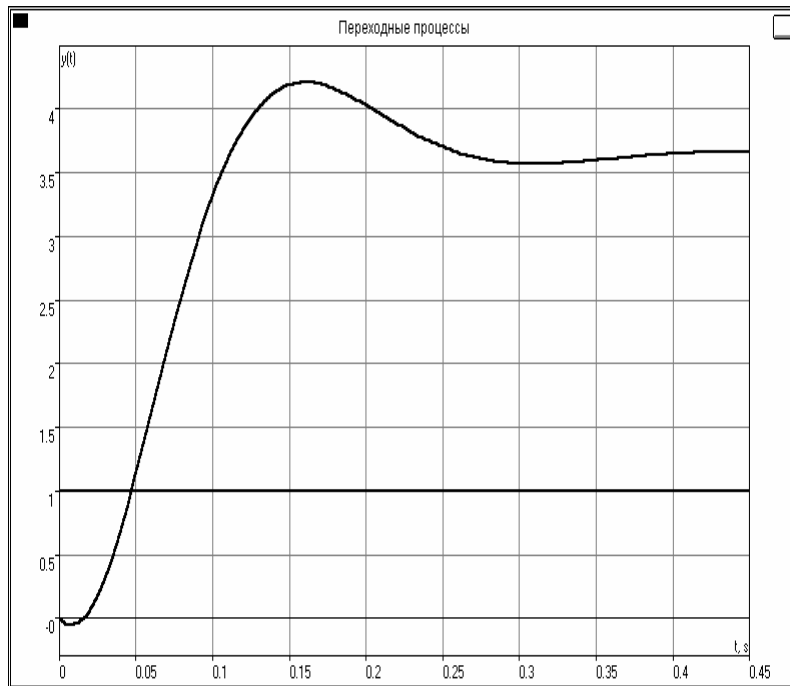


Рис. 7

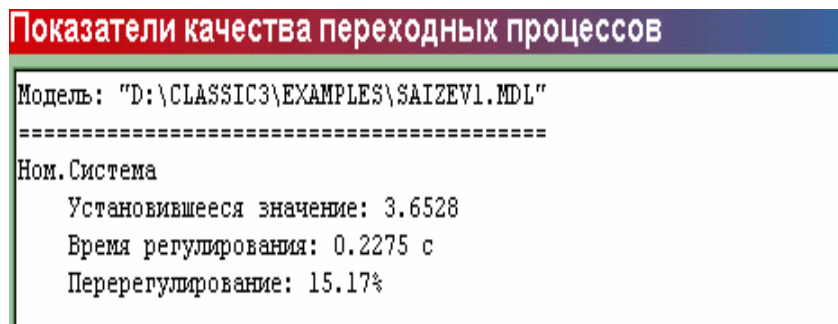


Рис. 8

Корни полинома

$$p_{1,2} = \frac{-T_1 \pm \sqrt{T_1^2 - 4T_2^2}}{2T_2^2} = \frac{-0,16 \pm \sqrt{0,0256 - 0,0064}}{2 \cdot 0,0016};$$

$$p_1 = -6,25; p_2 = -93,7.$$

Тогда передаточную функцию двигателя можно представить как

$$W_{\text{дв}}(s) = \frac{K_1}{(T_3s + 1)(T_4s + 1)} = \frac{1,43}{(0,16s + 1)(0,01s + 1)},$$

$$\text{где } T_3 = \frac{1}{p_1}; T_4 = \frac{1}{p_2}$$

– некоторые условные постоянные времени.

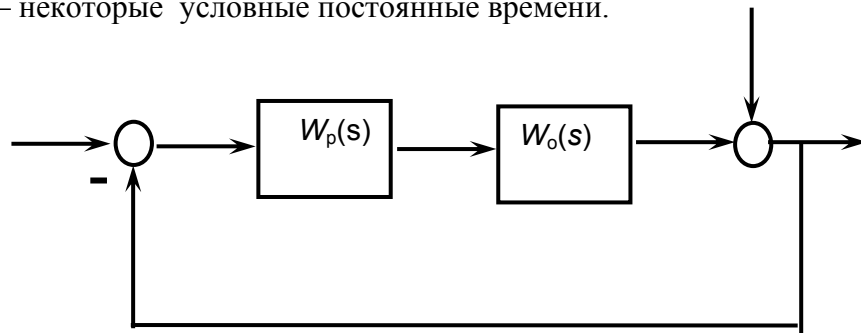


Рис. 9

С учетом выполненных преобразований передаточная функция условного объекта управления будет иметь вид

$$W_o(s) = W_p(s) = \frac{2,86}{(0,04s + 1)(0,01s + 1)(0,16s + 1)}.$$

СПИСОК РЕКОМЕНДУЕМОЙ ЛИТЕРАТУРЫ

Основная литература

1. Востриков, А.С. Теория автоматического регулирования: учеб. пособие для вузов /А.С.Востриков. – М.: Высш. шк., 2004. –52 с.
2. Ерофеев, А.А. Теория автоматического управления / А.А. Ерофеев.– СПб.: Политехника, 2002. – 400 с.
3. Мельников, А.А. Теория автоматического управления техническими объектами автомобилей и тракторов /А.А. Мельников. – М.: Академия, 2003. – 360 с.
4. Мельников, А.А. Управление техническими объектами автомобилей и тракторов. Системы электроники и автоматики /А.А. Мельников. – М.: Академия, 2003. – 480 с.
5. Соломенцев, Ю.М. Теория автоматического управления: учебник для машиностроительных вузов / Ю.М. Соломенцев. – М.: Высш. шк., 2003. – 384 с.
6. Брюханов, В.Н. Теория автоматического управления: учебник для машиностроительных спец. вузов /В.Н. Брюханов. – М.: Высшая школа 2000. – 126 с.
7. Брюханов, В.Н., Теория автоматического управления: учеб. пособие /В.Н. Брюханов, [и др.]. –Изд. 2-е, испр. – М.: Высшая школа, 1999. – 269 с.

Дополнительная литература

1. Санковский, Е.А., Справочное пособие по теории систем автоматического регулирования и управления / Под общ. ред. Е.А. Санковского.– Мн.: Высш. шк., 1973. – 1974 с.