

МИНИСТЕРСТВО НАУКИ И ВЫСШЕГО ОБРАЗОВАНИЯ
РОССИЙСКОЙ ФЕДЕРАЦИИ

Федеральное государственное автономное образовательное
учреждение высшего образования
«СЕВАСТОПОЛЬСКИЙ ГОСУДАРСТВЕННЫЙ УНИВЕРСИТЕТ»

МОРСКОЙ ИНСТИТУТ

Л.А. Краснодубец

ТЕОРИЯ УПРАВЛЕНИЯ СУДОВЫМИ СИСТЕМАМИ

Методические указания
к выполнению расчётно-графической работы на тему
«Компьютерный анализ САУ как линейно-динамической системы»

Севастополь
СевГУ
2024

УДК 681.5.01:001.891–057.875(076)
ББК 31.291я73
К782

Р е ц е н з е н т :
В.Е. Высоцкий – д-р техн наук, профессор

Краснодубец Л.А.

К782 Теория управления судовыми системами : методические указания к выполнению расчётно-графической работы «Компьютерный анализ САУ как линейно-динамической системы» / Л. А. Краснодубец ; Севастопольский государственный университет, Морской институт. – Севастополь : СевГУ, 2024. – 18 с. – Текст : электронный.

Предназначены для студентов очной и заочной форм обучения Севастопольского государственного университета, Морского института, специальности 26.05.07 – Эксплуатация судового электрооборудования и средств автоматики, выполняющих курсовую работу по дисциплине «Теория управления судовыми системами».

УДК 681.5.01:001.891–057.875(076)
ББК 31.291я73

Рассмотрено и рекомендовано к изданию на заседании кафедры «Судовое электрооборудование» Морского института ФГАОУ ВО «Севастопольский государственный университет» в качестве методических указаний по дисциплине «Теория управления судовыми системами» для студентов специальности 26.05.07 – Эксплуатация судового электрооборудования и средств автоматики, протокол № 9 от 3 апреля 2024 г.

© Краснодубец Л.А., 2024
© ФГАОУ ВО «Севастопольский
государственный университет», 2024

ОГЛАВЛЕНИЕ

Введение	4
1. Компьютерный анализ САУ как линейно-динамической системы	5
1.1. Исходные данные	5
1. 2. Задание на выполнение РГР	5
2. Методические указания	8
2.1. Вычисление передаточных функций	8
2.2 Построение частотных характеристик	11
2.3. Определение статической ошибки	12
2.4. Определение частоты среза и запасов устойчивости	12
2.5. Определение прямых показателей качества.....	12
2.6. Построение дифференциального уравнения замкнутой ЛДС	13
Литература	13
Контрольные вопросы.....	13
Приложение А. Программа анализа устойчивости ЛДС.....	15
Приложение Б. Программа анализа критического режима ЛДС.....	16
Приложение В. Программа анализа переходных режимов в ЛДС.....	17
Приложение Г Варианты заданий.....	18

ВВЕДЕНИЕ

Цель расчётно-графического задания (РГР), которое выполняется студентами ОФО и ЗФО при изучении дисциплины «Теория управления судовыми системами» в течение 6 семестра обучения, состоит в приобретении практических навыков владения технологией компьютерного анализа линейных динамических систем (ЛДС), математическое описание которых представлено линейными дифференциальными уравнениями с постоянными коэффициентами, передаточными функциями и структурными схемами. В ходе выполнения курсовой работы студент в соответствии с индивидуальным заданием решает задачи классического анализа ЛДС с применением вычислительной техники – исследование устойчивости, расчёт показателей качества переходных процессов и стационарных режимов.

В процессе выполнения РГР, являющейся важной составляющей для профессиональной подготовки судовых электромехаников в обеспечение раздела АП/6 Конвенции ПДНВ-95 (Функция – Электрооборудование, электронная аппаратура и системы управления).

В результате выполнения КР студент приобретает знания и умения, позволяющие овладеть элементами компетенций судовых электромехаников в сфере «Наблюдение за эксплуатацией электрических и электронных систем, а также систем управления», а именно: знание основ автоматики, автоматических систем и технологии управления (ПСК-6).

1. КОМПЬЮТЕРНЫЙ АНАЛИЗ САУ КАК ЛИНЕЙНОЙ ДИНАМИЧЕСКОЙ СИСТЕМЫ

1.1. Исходные данные

Подлежащая анализу замкнутая (с отрицательной обратной связью) САУ как стационарная линейная динамическая система (ЛДС) задана математической моделью в виде структурной схемы, которая представлена на рисунке 1. Элементы структурной схемы – передаточные функции имеют вид апериодических звеньев первого порядка

$$W_1(s) = \frac{K_1}{T_1 s + 1}; \quad W_2(s) = \frac{K_2}{T_2 s + 1}; \quad W_3(s) = \frac{K_3}{T_3 s + 1}.$$

Варианты задания и соответствующие им параметры передаточных функций T_1 , T_2 , T_3 , K_1 , K_3 приведены в таблице В1 приложения В. Величина коэффициента K_2 сначала полагается равной единице, а далее выбирается из условия устойчивости и качества переходной характеристики.

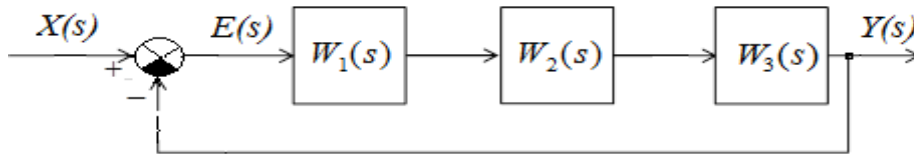


Рисунок 1 – Структурная схема исследуемой ЛДС

1.2. Задание на выполнение РГР

1.2.1. Найти передаточные функции ЛДС, используя структурную схему, изображённую на рисунке 1, а именно:

- разомкнутой системы $W_p(s) = Y(s)/E(s)$ при $E(s) = X(s)$ (т.е. разомкнута обратная связь);
- замкнутой системы $W_z(s) = Y(s)/X(s)$;
- замкнутой системы по ошибке $W_e(s) = E(s)/X(s)$.

1.2.2. Провести первичный анализ исследуемой ЛДС. Для этой цели следует выполнить анализ устойчивости исследуемой ЛДС с помощью её математической модели в виде структурной схемы, изображённой на рисунке 1, при заданных в таблице Г1 параметрах: постоянных времени T_1 , T_2 , T_3 и коэффициентах усиления K_1 , K_3 , а также полагая $K_2 = 1$. Для решения этой задачи можно воспользоваться программой компьютерного анализа устойчивости ЛДС, приведенной в приложении А, – `Stability_LTI_Analysis`. При этом необ-

ходимо исследовать устойчивость замкнутой ЛДС, построив для этой цели с помощью передаточной функции разомкнутой ЛДС $W_p(s)$ следующие графики:

- $W_p(j\omega)$ – амплитудно-фазовой частотной характеристики (АФЧХ) разомкнутой системы (годограф Найквиста);

- $L(\omega) = 20 \lg |W_p(j\omega)|$, $\varphi(\omega)$ – логарифмических АЧХ и ФЧХ характеристик (ЛАЧХ и ЛФЧХ) разомкнутой системы (диаграмма Боде), при помощи которых следует определить запасы устойчивости по модулю и по фазе (это для случая, когда ЛДС окажется устойчивой). В случае, если ЛДС будет в результате первичного анализа неустойчивой, то следует уменьшать коэффициент K_2 и повторять анализ устойчивости до тех пор, пока устойчивое состояние не будет достигнуто и будет возможным определить по диаграммам Боде запасы устойчивости.

1.2.3. Выполнить первичный анализ переходного режима устойчивой ЛДС. Для анализа переходного режима следует построить график переходной характеристики $h(t)$ с помощью программы анализа переходных режимов, приведенной в приложении В, – `Transient_mode_analysis`. При этом используется передаточная функция $W_z(s)$ замкнутой ЛДС, исходные параметры T_1 , T_2 , T_3 , K_1 , K_3 и параметр K_2 , значение которого было определено при анализе устойчивости в п. 1.2.2.

Построенные графики в п. 1.2.2 и 1.2.3 использовать для определения запасов устойчивости и прямых показателей качества переходных процессов, а также статической ошибки в стационарном (установившемся) режиме.

1.2.4. Исследовать критический режим функционирования ЛДС. Для этой цели следует воспользоваться программой анализа критического режима ЛДС. При заданных в таблице Г1 параметрах (соответственно постоянных времени T_1 , T_2 , T_3 и коэффициентов усиления K_1 , K_3) найти граничное (критическое) значение коэффициента усиления $K_2 = K_{kp}$ по формуле (2.1), приведенной в разделе 2 «Методические указания». При найденном $K_2 = K_{kp}$ замкнутая ЛДС с передаточной функцией $W_z(s)$ будет находиться на границе устойчивости.

1.2.5. Повторить задание п. 1.2.2 и 1.2.3 при $K_2 = K_{kp}$ с помощью программы, приведенной в приложении В, – `Critical_mode_analysis`, сделав вывод о запасах устойчивости, характере и качестве переходного режима в замкнутой ЛДС, находящейся на границе устойчивости.

1.2.6. Полагая $K_2 = K_{kp}/5$, повторить задание п. 1.2.2 и 1.2.3, используя подходящие программы и полученные с их помощью графики характеристик, найти и проанализировать следующие основные показатели качества исследуемой замкнутой ЛДС с передаточной функцией $W_z(s)$:

- время установления – t_p [с], время нарастания (первого установления) – t_n [с] и перерегулирование σ [%];

- запасы устойчивости исследуемой ЛДС по амплитуде ΔL [дБ] и фазе $\Delta \varphi$ [град];

- e_{st} – статическую ошибку в установившемся режиме при подаче на вход исследуемой системы единичного ступенчатого воздействия, частоту среза ω_c [1/с].

1.2.7. Построить по передаточной функции $W_z(s)$ замкнутой ЛДС дифференциальное уравнение, связывающее вход $x(t)$ и выход $y(t)$.

1.2.8. Используя систему визуального моделирования *Simulink*, найти решение дифференциального уравнения, построенного в п. 1.2.7 при нулевых начальных условиях и $x(t) = 1(t)$. Сравнить полученный результат с графиком переходной характеристики, который получен в п. 1.2.6.

1.2.9. Оформить ход и результаты работы, выполненной в соответствии с вариантом задания, в форме пояснительной записки с иллюстрациями в виде графиков, а также скринов командного окна системы MATLAB. Сделать выводы по каждому пункту выполненного задания, а в разделе «Заключение» привести результаты анализа исследуемой ЛДС в виде показателей качества, представленных в числовой форме с указанием размерностей физических величин.

2. МЕТОДИЧЕСКИЕ УКАЗАНИЯ

2.1. Вычисление передаточных функций

2.1.1. Передаточные функции

$$W_p(s) = Y(s)/E(s), W_z(s) = Y(s)/X(s) \text{ и } W_e(s) = E(s)/X(s).$$

находятся с использованием правил структурных преобразований. Если при расчетах передаточных функций по структурной схеме, изображенной на рисунке 1, используется система *MATLAB*, то следует подготовить в окне редактора *Edit* *m*-файл, содержащий необходимые командные строки, формирующие программу (скрипт), и воспользоваться (если нужно) командой *minreal()*.

Например, командная строка в редакторе *Edit* для вычисления передаточной функции $W_p(s)$ разомкнутой САУ (в соответствии со структурной схемой, изображённой на рисунке 1) по правилам структурных преобразований примет вид

$$W_p = W1*W2*W3*Woc$$

$W1, W2, W3$ – идентификаторы, представляющие в среде *MATLAB* передаточные функции ЛДС соответственно $W_1(s), W_2(s), W_3(s)$;

Woc – идентификатор передаточной функции обратной связи, которая в данной работе принята единичной: $W_{oc}(s) = 1$.

Для получения представления передаточной функции, например, $W_1(s)$ в среде *MATLAB* следует использовать командную строку в виде

$$W1 = tf([K1],[T1 \ 1])$$

В квадратных скобках записываются коэффициенты передаточной функции соответственно числителя и знаменателя (через пробел).

Командная строка для вычисления передаточной функции замкнутой САУ записывается следующим образом

$$W_z = \text{minreal}(W/(1+Wp))$$

$W = W1*W2*W3$ – передаточная функция прямой цепи ЛДС.

2.1.2. Для вычисления передаточной функции замкнутой ЛДС по ошибке можно воспользоваться формулой

$$W_e(s) = \frac{E(s)}{X(s)} = \frac{X(s) - Y(s) * W_{oc}}{X(s)} = 1 - \frac{Y(s)}{X(s)} * W_{oc} = 1 - W_z(s) * W_{oc}.$$

Командная строка при этом примет вид

$$We = 1 - Wz * Woc$$

2.1.3. Для нахождения характеристического уравнения замкнутой ЛДС можно поступить следующим образом. Находится передаточная функция $W_z(s)$ замкнутой ЛДС через передаточную функцию $W_p(s)$ разомкнутой в виде

$$W_z(s) = \frac{W_p(s)}{1 + W_p(s)},$$

где

$$W_p(s) = W_1(s) * W_2(s) * W_3(s) * W_{oc}(s) \text{ при } W_{oc}(s) = 1.$$

Пусть $W_p(s) = \frac{A(s)}{B(s)}$. В таком случае передаточная функция замкнутой ЛДС будет иметь вид

$$W_z(s) = \frac{A(s) / B(s)}{1 + A(s) / B(s)} = \frac{A(s)}{B(s) + A(s)} = \frac{A(s)}{D(s)},$$

где $D(s) = B(s) + A(s)$ – полином (многочлен) относительно переменной s в знаменателе передаточной функции $W_z(s)$ замкнутой системы, который называют характеристическим. Таким образом, складывая числитель и знаменатель передаточной функции разомкнутой ЛДС можно получить характеристический полином замкнутой ЛДС.

Например, в соответствии с рисунком 1 и правилами структурных преобразований можно найти выражения для $A(s)$ и $B(s)$ в следующем виде

$$B(s) = (T_1s + 1)(T_2s + 1)(T_3s + 1) = a_3s^3 + a_2s^2 + a_1s + a_0,$$

$$A(s) = K_1K_2K_3.$$

Далее путем сложения левых и правых частей найденных выражений и приравниванием полученной суммы к нулю получается искомого характеристическое уравнение в виде

$$D(s) = a_3s^3 + a_2s^2 + a_1s + a_0 + K_1K_2K_3 = a_3s^3 + a_2s^2 + a_1s + a_{0k} = 0,$$

где $a_{0k} = a_0 + K_1K_2K_3$.

При помощи характеристического уравнения можно исследовать устойчивость системы, изображенной на рисунке 1. Например, необходимое и достаточное условие устойчивости, в соответствии с критерием И.А. Вышнеградского будет иметь вид неравенства

$$a_1 a_2 > a_0 a_3 \text{ при всех } a_i > 0.$$

Полученное неравенство можно использовать для построения уравнения, из которого при заданных T_1, T_2, T_3, K_1, K_3 можно определить граничное значение (критическое) коэффициента передачи K_2 , при котором ЛДС будет находиться на границе устойчивости. Следует отметить, что начальное значение этого коэффициента принимается равным единице. Далее, принимая его в качестве варьируемого параметра, можно найти его критическое значение из уравнения, полученного из неравенства Вышнеградского путем замены знака «>» на знак «=», а также использования выражений для коэффициентов a_i через параметры T_1, T_2, T_3, K_1, K_3 , значения которых приведены в таблице А1. Таким образом, получается следующая формула

$$K_2 = K_{kp} = \frac{a_2 a_1 - a_0 a_3}{a_3 K_1 K_3}, \quad (2.1)$$

где $a_0 = 1$; $a_1 = T_1 + T_2 + T_3$; $a_2 = (T_1 + T_2)T_3 + T_1 T_2$; $a_3 = T_1 T_2 T_3$.

Найденное критическое значение $K_2 = K_{kp}$ используется для анализа динамического качества ЛДС, находящейся на границе устойчивости. При этом можно использовать программу анализа критических режимов ЛДС `Critical_mode_analysis`, приведенной в приложении Б.

Далее значение коэффициента $K_2 = K_{kp}$ уменьшается в 5 раз (тем самым увеличивается степень и запасы устойчивости) и проводится анализ качества устойчивой ЛДС с помощью программы `Transient_mode_analysis`. При этом показатели динамического качества можно улучшить за счёт дальнейшего снижения величины K_2 . Однако, при этом показатель качества ЛДС в установившемся (стационарном) режиме – статическая ошибка будет увеличиваться, что приведёт к ухудшению точности.

Таким образом, повышая степень устойчивости ЛДС путём снижения коэффициента усиления в прямой цепи, следует ожидать снижения статической точности. Обратное утверждение так же имеет место: повышение статической точности (снижение статической ошибки) путём увеличения коэффициента усиления приводит к уменьшению степени устойчивости вплоть до полной её потери.

Примечание. При использовании системы MATLAB для расчета искомых передаточных функций в тексте программы, написанной на скрипте в редакто-

ре Edit, коэффициент K_2 (как варьируемый параметр системы) следует принять равным единице. В результате искомые передаточные функции будут показаны в командном окне в числовом виде. При этом коэффициенты a_i могут быть определены при помощи следующего программного кода (скрипта), набранного в редакторе Edit или в командном окне Command Window:

```
Woc=1
Wp=W1*W2*W3*Woc
[num,den]=tfdata(Wp,'v')
a3=den(1)
a2=den(2)
a1=den(3)
a0=den(4)
```

Коэффициенты a_i соответствуют полиному $B(s)$ знаменателя передаточной функции $W_p(s)$. При этом полином числителя имеет вид

$$A(s) = K_1 K_2 K_3.$$

Как ранее было показано, характеристический полином замкнутой системы $D(s)$ определится как сумма полинома знаменателя $B(s)$ и полинома числителя $A(s)$ передаточной функции $W_p(s)$ и примет вид

$$D(s) = a_3 s^3 + a_2 s^2 + a_1 s + a_0 + K_1 K_2 K_3$$

или

$$D(s) = a_3 s^3 + a_2 s^2 + a_1 s + a_{0k},$$

где $a_{0k} = a_0 + K_1 K_2 K_3$.

2.2. Построение частотных характеристик

АФЧХ $W_p(j\omega)$ строится на комплексной плоскости. Ось абсцисс – действительная (Re), а ось ординат – мнимая (Im). Частота изменяется от 0 до $+\infty$. Все остальные характеристики имеют ось абсцисс, на которой откладывается частота ω (для ЛАЧХ и АФЧХ в логарифмическом масштабе) и соответствующую ось ординат (это модуль или фаза).

Все частотные характеристики строятся следующим образом. Задавая величину ω дискретно: $\omega = 0, \omega_1, \omega_2, \dots$, находят соответствующее значение ординаты и по точкам строят характеристику. Обычно ЛАЧХ $L(\omega)$ строится в виде асимптотической характеристики, состоящей из отрезков прямых. Однако, для построения частотных характеристик удобнее воспользоваться функциями

MATLAB. Например, АФЧХ $W_p(j\omega)$ (годограф Найквиста) строится с помощью функции $nyquist(Wp)$, а ЛАЧХ и АФЧХ в логарифмическом масштабе строятся при помощи функции $bode(Wp)$, где Wp – переменная MATLAB, которая соответствует передаточной функции разомкнутой системы, изображенной на рисунке 1.

2.3. Определение статической ошибки

Статическая ошибка САУ, структурная схема которой изображена на рисунке 1, в установившемся состоянии определяется по формуле

$$e_{st} = \frac{1}{1+K}, \text{ где } K = K_1 K_2 K_3.$$

Для вычисления статической ошибки можно использовать функцию $dsgain(We)$ системы MATLAB, полагая

$$W_e(s) = 1 - W_z(s) * W_{oc}.$$

2.4. Определение частоты среза и запасов устойчивости

Частота среза – это значение частоты, при котором амплитудная логарифмическая характеристика $L(\omega)$ пересекает ось частот (абсцисс) в точке, где $L(\omega) = 0$. Запасы устойчивости ΔL и $\Delta \phi$ также находятся из графиков логарифмических характеристик, выводимых на экран монитора компьютера в виде диаграмм Бode.

2.5. Определение прямых показателей качества ЛДС

Показатели качества динамических свойств ЛДС определяются по графику переходной характеристики, который можно построить, используя функцию $step(Wz)$ системы MATLAB, где Wz – переменная MATLAB, соответствующая передаточной функции $W_z(s)$ замкнутой системы.

Перерегулирование σ определяется по формуле

$$\sigma = \frac{h(t)_{\max} - h(\infty)}{h(\infty)} 100\%,$$

где $h(t)_{\max}$ – максимальное значение ординаты переходной характеристики $h(t)$; $h(\infty)$ – установившееся значение ординаты переходной характеристики $h(t)$.

2.6. Построение дифференциального уравнения

По известной передаточной функции замкнутой системы $W_z(s)$, связывающей изображение заданного входного воздействия (единичного скачка) $X(s)=1/s$ и искомого выхода $Y(s)$ системы, можно получить алгебраическое уравнение относительно переменной s из соотношения

$$Y(s) = W_z(s)X(s) = \frac{K_1 K_2 K_3}{a_3 s^3 + a_2 s^2 + a_1 s + a_0} X(s)$$

в виде

$$(a_3 s^3 + a_2 s^2 + a_1 s + a_0)Y(s) = K_1 K_2 K_3 X(s).$$

Далее, применяя обратное преобразование Лапласа к полученному алгебраическому уравнению, путём следующих подстановок

$$s \rightarrow \frac{d}{dt}; Y(s) \rightarrow y(t); X(s) \rightarrow x(t)$$

можно найти искомое дифференциальное уравнение в виде

$$a_3 \frac{d^3 y(t)}{dt^3} + a_2 \frac{d^2 y(t)}{dt^2} + a_1 \frac{dy(t)}{dt} + a_0 y(t) = K_1 K_2 K_3 x(t).$$

При этом коэффициенты полученного дифференциального уравнения будут совпадать с коэффициентами исходной передаточной функции.

Решение этого дифференциального уравнения рекомендуется выполнить методом моделирования при помощи среды визуального моделирования *Simulink*.

Литература

1. Бесекерский В.А. Теория систем автоматического регулирования / В.А. Бесекерский, Е.П. Попов. – СПб.: Профессия, 2003. – 752 с.

Контрольные вопросы

1. Сформулируйте основные критерии качества стационарных ЛДС.
2. Виды математических моделей стационарных ЛДС.
3. Как по дифференциальному уравнению получить передаточную функцию?
4. Свойства передаточной функции.
5. Основные передаточные функции одноконтурной ЛДС.
6. Как по передаточной функции построить дифференциальное уравнение?

7. Функциональные и структурные схемы ЛДС. Основные правила преобразования структурных схем.
8. Цель и задачи анализа ЛДС.
9. Частотные характеристики и частотные критерии устойчивости. Построение диаграммы Боде для исследования устойчивости замкнутой ЛДС.
10. Определение запасов устойчивости для замкнутой ЛДС.
11. Понятие устойчивости ЛДС. Необходимое и достаточное условие устойчивости ЛДС.
12. Анализ устойчивости замкнутой ЛДС методом определения полюсов ее передаточной функции.
13. Необходимое и достаточное условие устойчивости линейной ЛДС. Применение *MATLAB*.
14. Исследование переходных режимов. Переходная характеристика и методы ее построения.
15. Импульсная характеристика ЛДС. Построение с помощью *Simulink*.
16. Применение *MATLAB* для определения показателей качества ЛДС.
17. Исследование стационарных (установившихся) режимов. Передаточная функция по ошибке. Вычисление статической ошибки.
18. *MATLAB*. Пример программы построения переходной характеристики.
19. *Simulink*. Пример *S*-модели для построения переходной характеристики.
20. *MATLAB*. Пример построения карты размещения на комплексной плоскости нулей и полюсов передаточной функции.
21. Пример решения дифференциального уравнения при помощи *Simulink*.
22. Как вычислить перерегулирование при помощи *MATLAB* и *Simulink*.

Программа анализа устойчивости ЛДС

```

%Stability_LTI_Analysis.m
%Анализ устойчивости ЛДС
%Исходные данные
T1=0.6; T2=1.6; T3=0.9; K1=2;K3=3.9;Woc=1;
K2=1
W1=tf([K1],[T1 1])% Ввод ПФ структурной схемы ЛДС
W2=tf([K2],[T2 1])
W3=tf([K3],[T3 1])
W=W1*W2*W3 % Вычисление ПФ прямой цепи ЛДС
Wp=W*Woc % Вычисление ПФ разомкнутой ЛДС
[num,den]=tfdata(Wp,'v')
a3=den(1)
a2=den(2)
a1= den(3)
a0=den(4)
a0k=a0+K1*K2*K3
if a1*a2 > a0k*a3 %Критерий Вышнеградского
disp('Устойчивая')
else disp('Неустойчивая')
end
Wz=minreal(W/(1+Wp)) %Вычисление ПФ замкнутой ЛДС

disp('Полюсы замкнутой ЛДС')
pole(Wz) % Вычисление полюсов ПФ Wz
figure(1)
pzmap(Wz) %Построение карты полюсов и нулей Wz
figure(2)
nyquist(Wp) %Годограф Найквиста(АФЧХ) для Wp
figure(3)
bode(Wp) ; grid %Диаграммы Боде (ЛАЧХ и ФЧХ) для Wp

```

Программа анализа критического режима ЛДС

```
% Critical_mode_analysis.m
%Анализ критического режима ЛДС
%Исходные данные

T1=0.6; T2=1.6; T3=0.9; K1=2; K3=3.9;Woc=1;K2_1=1
a0=1; a1=T1+T2+T3; a2=(T1+T2)*T3+T1*T2;
a3=T1*T2*T3 % Вычисление коэфф. хар-го уравнения 1
K2_k=(a2*a1-a0*a3)/(a3*K1*K3)%Критический коэфф. k2_k
W1=tf([K1],[T1 1])% Ввод ПФ структурной схемы ЛДС
W2=tf([K2_k],[T2 1])
W3=tf([K3],[T3 1])
W=W1*W2*W3 % Вычисление ПФ прямой цепи ЛДС
Wp=W*Woc % Вычисление ПФ разомкнутой ЛДС
Wz_k=minreal(W/(1+Wp))%Вычисление ПФ замкнутой ЛДС
We_k=minreal(1-Wz_k*Woc)% ПФ замкнутой ЛДС по ошибке
disp('Полюсы замкнутой ЛДС')
pole(Wz_k) % Вычисление полюсов ПФ Wz_k
figure(1)
pzmap(Wz_k) %Построение карты полюсов и нулей Wz_k
figure(2)
nyquist(Wp) %Годограф Найквиста(АФЧХ) для Wp
figure(3)
bode(Wp) %Диаграммы Боде(ЛАЧХ и ФЧХ)для Wp
figure(4)
step(Wz_k) %Переходная характеристика для Wz_k
disp('Статическая ошибка замкнутой ЛДС')
e_st = dcgain(We_k) %Статическая ошибка замкнутой ЛДС
```

Программа анализа переходных режимов в ЛДС

```
Transient_mode_analysis.m
%Анализ переходных режимов ЛДС
clear all
%Исходные данные
T1=0.6; T2=1.6; T3=0.9; K1=2; K3=3.9;Woc=1;K2=1
W1=tf([K1],[T1 1])% Ввод ПФ структурной схемы ЛДС
W2=tf([K2],[T2 1])
W3=tf([K3],[T3 1])
W=W1*W2*W3 % Вычисление ПФ прямой цепи ЛДС
Wp=W*Woc % Вычисление ПФ разомкнутой ЛДС
Wz=minreal(W/(1+Wp))%Вычисление ПФ замкнутой ЛДС
We=minreal(1-Wz*Woc)% ПФ замкнутой ЛДС по ошибке
figure(1)
step(Wz) %Переходная характеристика для Wz
figure(2)
impulse(Wz)
disp('Статическая ошибка замкнутой ЛДС')
e_st = dcgain(We)%Статическая ошибка замкнутой ЛДС
```

Приложение Г

Таблица Г1– Варианты заданий к РГР

Номер варианта	T_1	T_2	T_3	K_1	K_3
1	2	3	4	5	6
1	0,01	0,2	0,06	16,5	1
2	0,02	0,3	0,07	16	1,1
3	0,03	0,4	0,08	15,5	1,2
4	0,04	0,5	0,09	15	1,3
5	0,05	0,6	0,1	14,5	1,4
6	0,06	0,7	0,15	14	1,5
7	0,07	0,8	0,2	13,5	1,6
8	0,08	0,9	0,25	13	1,7
9	0,09	1	0,3	12,5	1,8
10	0,05	1,1	0,15	12	1,9
11	0,06	1,2	0,2	11,5	2
12	0,07	1,3	0,25	11	2,1
13	0,08	1,4	0,3	10,5	2,2
14	0,09	1,5	0,35	10	2,3
15	0,1	1,6	0,4	9,5	2,4
16	0,01	0,2	0,1	9	2,5
17	0,02	0,3	0,2	8,5	2,6
18	0,03	0,4	0,3	8	2,7
19	0,04	0,5	0,4	7,5	2,8
20	0,05	0,6	0,5	7	2,9
21	0,06	0,7	0,6	6,5	3
22	0,07	0,8	0,7	6	3,1
23	0,08	0,9	0,8	5,5	3,2
24	0,09	1	0,9	5	3,3
25	0,1	1,1	0,4	4,5	3,4
26	0,2	1,2	0,5	4	3,5
27	0,3	1,3	0,6	3,5	3,6
28	0,4	1,4	0,7	3	3,7
29	0,5	1,5	0,8	2,5	3,8
30	0,6	1,6	0,9	2	3,9

Краснодубец Леонид Андреевич

**ТЕОРИЯ УПРАВЛЕНИЯ
СУДОВЫМИ СИСТЕМАМИ**

*Методические указания
к выполнению расчётно-графической работы*

В авторской редакции

Изд. № 95/2024. Объем 1,25 п.л. Усл. печ. л. 1,16. Уч.-изд. л. 1,23.
Издательский центр ФГАОУ ВО «Севастопольский государственный университет»