

МИНИСТЕРСТВО НАУКИ И ВЫСШЕГО ОБРАЗОВАНИЯ
РОССИЙСКОЙ ФЕДЕРАЦИИ

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

Морской институт

Л.А. Краснодубец

ТЕОРИЯ АВТОМАТИЧЕСКОГО УПРАВЛЕНИЯ

**Методические указания
к выполнению расчётно-графической работы**

Севастополь
СевГУ
2019

УДК 681.5.01: 001.891–057.875(076)
ББК 39.965я73
К782

Р е ц е н з е н т:

А.В. Скатков – профессор кафедры «Информационные
и компьютерные технологии», д.т.н., профессор

Краснодубец Л.А.

К782 Теория автоматического управления: метод. указания к выполнению
расчётно-графической работы / Л.А. Краснодубец. – Севастополь: СевГУ,
2019. – 40 с.

Методические указания предназначены для студентов очной и заочной форм обучения Севастопольского государственного университета, Морского института, специальности 26.05.07 — Эксплуатация судового электрооборудования и средств автоматики, выполняющих расчётно-графическую работу по дисциплине «Теория автоматического управления».

УДК 681.5.01: 001.891–057.875(076)
ББК 39.965я73

Рассмотрено и рекомендовано кафедрой «Судовое электрооборудование» Морского института ФГАОУ ВО «Севастопольский государственный университет» в качестве методических указаний по дисциплине «Теория автоматического управления» для студентов специальности 26.05.07 – Эксплуатация судового электрооборудования и средств автоматики, протокол № 12 от 14 июня 2018 г.

Изд. № 119/19. Объем 2,5 п.л.
РИИЦМ ФГАОУ ВО «Севастопольский государственный университет»

© Краснодубец Л.А. 2019
© ФГАОУ ВО «Севастопольский
государственный университет», 2019

ОГЛАВЛЕНИЕ

Введение	4
Расчётно-графическая работа № 1	
1. Анализ САУ как линейной динамической системы.....	5
2. Методические указания.....	6
Расчётно-графическое задание № 2	
1. Математическое описание электропривода постоянного тока	11
2. Синтез регулятора для электропривода.....	25
3. Содержание этапов выполнения расчётно-графической работы.....	32
4. Содержание и оформление пояснительной записки	33
Литература.....	35
Приложение А. Варианты заданий к работе № 1.....	36
Приложение Б. Варианты заданий к работе № 2.....	37
Приложение В. Фрагмент программы анализа САУ.....	38
Приложение Г. Программа для расчёта параметров моделей.....	39
Приложение Д. Контрольные вопросы.....	40

ВВЕДЕНИЕ

Цель расчётно-графической работы (РГР), которая выполняется студентами ОФО и ЗФО при изучении дисциплины «Теория автоматического управления» в течение двух семестров, состоит в закреплении практических навыков владения технологией управления, которая включает анализ и синтез систем автоматического управления, а также их компьютерное моделирование. РГР состоит из двух частей.

Первая часть выполняется в 5 семестре и посвящена решению задач анализа линейных динамических систем. При этом с помощью математических моделей и пакетов прикладных программ решаются практические задачи исследования устойчивости и основных режимов функционирования изучаемых автоматических систем путём построения графиков их частотных и временных характеристик и на этой основе определения числовых значений прямых показателей качества.

Вторая часть, посвящённая решению задач синтеза САУ, выполняется в 6 семестре. В ходе выполнения этой части работы студент в соответствии с индивидуальным заданием производит расчёт параметров математических моделей функциональных элементов судового электропривода, вычисляет параметры оптимальной настройки автоматического регулятора, а также методом компьютерного моделирования проверяет соответствие показателей качества синтезированной САУ их заданным значениям.

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 РГР 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).

РАСЧЁТНО-ГРАФИЧЕСКАЯ РАБОТА № 1

1. АНАЛИЗ САУ КАК ЛИНЕЙНОЙ ДИНАМИЧЕСКОЙ СИСТЕМЫ

1.1. Исходные данные

Подлежащая анализу замкнутая (с 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 аperiодических 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 А1 приложения А. Величина коэффициента K_2 сначала полагается равной единице, а далее выбирается из условия устойчивости.

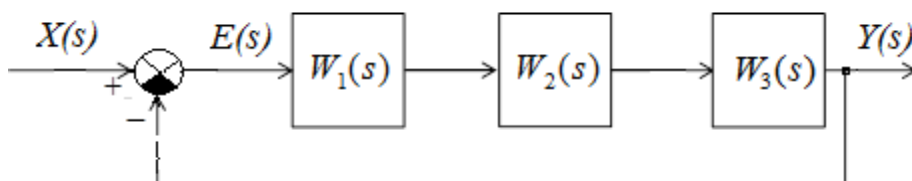


Рисунок 1. – Структурная схема исследуемой ЛДС

1.2. Задание на выполнение РГР

1.2.1. Найти передаточные функции:

- разомкнутой системы $W_p(s) = Y(s)/X(s)$ 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. Найти характеристическое уравнение замкнутой системы. Для этой цели, используя критерий И.А. Вышнеградского или А. Гурвица, записать в общем виде условия устойчивости для коэффициентов этого уравнения. При заданных в таблице А1 параметрах соответственно постоянных времени T_1 , T_2 , T_3 и коэффициентов усиления K_1 , K_3 найти граничное значение коэффициента усиления K_2 (принимая его за неизвестную переменную), при котором система еще устойчива.

1.2.3. Построить 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);
- $h(t)$ – переходной характеристики.

1.2.4. Используя графики построенных характеристик, найти и проанализировать следующие основные показатели качества исследуемой ЛДС:

- ε_{st} – статическую ошибку в установившемся режиме при подаче на вход исследуемой системы единичного ступенчатого воздействия;
- частоту среза ω_c [1/с], а также запасы устойчивости исследуемой системы по амплитуде ΔL [Дб] и фазе $\Delta \varphi$ [град];
- время регулирования (установления) – t_p [с], время нарастания (первого установления) – t_n [с] и перерегулирование σ [%].

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

1.2.6. Используя систему визуального моделирования *Simulink*, найти решение дифференциального уравнения, построенного в п. 1.2.5 при нулевых начальных условиях и $x(t) = 1(t)$. Сравнить полученный результат с графиком переходной характеристики, который получен в п. 1.2.3.

1.2.6. Оформить результаты работы и сделать выводы.

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

$$Wp=W1*W2*W3,$$

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

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

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

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

Командная строка для вычисления передаточной функции замкнутой САУ записывается следующим образом

$$Wz=mineral(Wp/(1+Wp)).$$

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

$$W_e(s) = 1 - W_z(s).$$

Командная строка при этом примет вид

$$We=1-Wz.$$

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

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

Пусть $W_p(s) = \frac{A(s)}{B(s)}$. В таком случае передаточная функция замкнутой САУ 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 САУ можно получить характеристический полином замкнутой САУ.

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 искомое 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

$$a_1a_2 > a_{0k}a_3 \text{ при всех } a_i > 0.$$

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 САУ будет находиться на границе устойчивости. Этот коэффициент принимается неизвестным и находится из уравнения, полученного из неравенства Вышнеградского путем замены знака «>» на знак «=», а также выражения 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

$$K_2 = \frac{a_2a_1 - a_0a_3}{a_3K_1K_3},$$

где

$$a_0 = 1; a_1 = T_1 + T_2 + T_3; a_2 = (T_1 + T_2)T_3 + T_1T_2; a_3 = T_1T_2T_3.$$

Далее найденное критическое значение K_2 уменьшается в 2 раза.

Примечание. При использовании системы *MATLAB* для расчета искомых передаточных функций в тексте программы, написанной в редакторе *Edit*, коэффициент K_2 (как 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*:

```

Wp=W1*W2*W3;
[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, 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

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

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 *dcgain(We)* системы *MATLAB*, полагая $W_e(s) = 1 - W_z(s)$.

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 диаграммы Боде.

2.5. Определение времени регулирования t_p , времени нарастания t_n и перерегулирования σ

Показатели качества динамических свойств САУ 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.

2.6. Построение дифференциального уравнения

По известной передаточной функции замкнутой системы $W_z(s)$, связывающей изображение заданного входа $X(s) = 1/s$ 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, можно найти искомое дифференциальное уравнение. При этом порядок и коэффициенты найденного дифференциального уравнения будут совпадать с порядком и коэффициентами исходной передаточной функции. Решение этого дифференциального уравнения рекомендуется выполнить при помощи среды визуального моделирования *Simulink*.

РАСЧЁТНО-ГРАФИЧЕСКАЯ РАБОТА № 2

1. МАТЕМАТИЧЕСКОЕ ОПИСАНИЕ ЭЛЕКТРОПРИВОДА ПОСТОЯННОГО ТОКА

1.1. Описание функциональной схемы электропривода

Электроприводом называется управляемая электромеханическая система, предназначенная для преобразования электрической энергии в механическую энергию поступательного либо вращательного движения. Электропривод состоит из электрической и механической частей, которые объединяет электромеханический преобразователь. В роли такого преобразователя чаще всего выступает исполнительный электродвигатель, соединенный через редуктор с механическим устройством (например, барабаном лебёдки или рулевой машиной), приводимым в движение. Управление исполнительным двигателем осуществляется при помощи автоматического регулятора.

Рассматриваются две разновидности электропривода в зависимости от типа объекта управления: электропривод со статическим или с астатическим объектами управления. Электропривод со статическим объектом применяется в качестве замкнутой САУ для управления угловой скоростью рабочего механизма, например, скоростью вращения намоточного барабана подъёмного механизма лебёдки. Функциональная схема такого электропривода, часто называемого скоростным, приведена на рисунке 1.1.

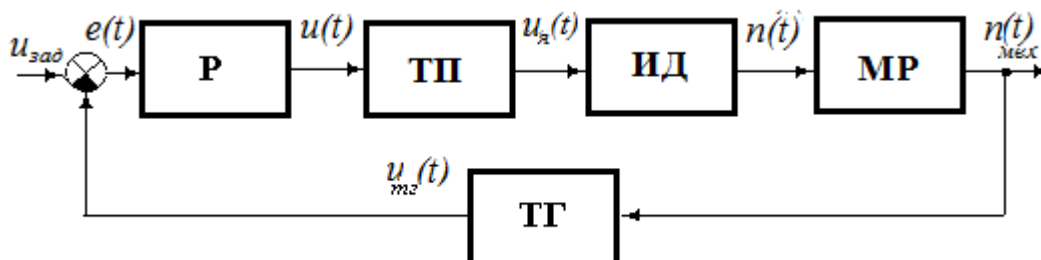


Рисунок 1.1. – Функциональная схема скоростного электропривода с тиристорным преобразователем и механическим редуктором

На рисунке 1.1 приняты следующие обозначения:

Р – регулятор; ТП – тиристорный преобразователь;

ИД – исполнительный двигатель; РМ – редуктор механический;

ТГ – тахогенератор (датчик обратной связи).

В скоростном электроприводе управляемой величиной является угловая скорость. Задающий сигнал в виде постоянного напряжения $u_{зад}$ [В], пропорционального требуемой скорости вращения $n(t)$ [об/мин] рабочего механизма, сравнивается в суммирующем устройстве с выходным напряжением $u_{мг}(t)$ [В] тахогенератора ТГ, который соединён с механическим редуктором МР, являющимся нагрузкой исполнительного двигателя ИД. Таким образом, выполняя

функцию датчика угловой скорости рабочего механизма, тахогенератор ТГ по цепи отрицательной обратной связи замкнутой системы автоматического управления передаёт на её вход информацию о состоянии объекта управления, где формируется в виде сигнала $e(t)$ напряжение ошибки управления (рассогласования) в соответствии с уравнением обратной связи

$$e(t) = u_{зад} - u_{мг}(t).$$

Цель управления замкнутой САУ электроприводом – обеспечить в процессе функционирования стремление ошибки управления $e(t)$ к нулю. Поэтому сигнал сформированной ошибки $e(t)$ поступает на вход регулятора, который в соответствии с установленным на нём законом (алгоритмом) управления формирует на выходе управляющий сигнал $u(t)$, обеспечивающий с помощью тиристорного преобразователя ТП напряжение $u_a(t)$ на клеммах исполнительного электродвигателя ИД, необходимое для вращения его ротора (якоря), соединённого с входным валом механического редуктора МР, со скоростью $n(t)$. При этом выходной вал редуктора МР будет вращаться со скоростью $n_{мех}(t)$ вместе с ротором тахогенератора ТГ, выходное напряжение которого $u_{мг}(t)$ в качестве сигнала отрицательной обратной связи обеспечит стремление ошибки управления $e(t)$ к нулю в соответствии с уравнением обратной связи.

Функциональная схема скоростного электропривода, изображённая на рисунке 1.1, не содержит в своём составе интегрирующих звеньев. Поэтому скоростной электропривод является статической системой, то есть системой с ненулевой статической ошибкой.

Электропривод с астатическим объектом применяется в качестве замкнутой САУ для управления углом поворота (или линейным перемещением) рабочего механизма, например, руля. Такой электропривод, функциональная схема которого приведена на рисунке 1.2, называют следящим.

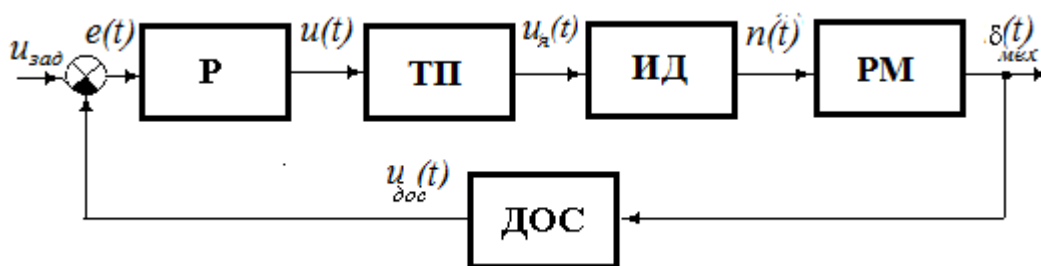


Рисунок 1.2. – Функциональная схема следящего электропривода с тиристорным преобразователем и рулевой машиной

В следящем электроприводе, в отличие от скоростного, управляемой величиной является угол поворота рабочего механизма, например, руля водоизмещающего судна. Так как угол поворота $\delta(t)$ связан с угловой скоростью $\omega(t)$ соотношением

$$\frac{d\delta(t)}{dt} = \omega(t) \quad \text{или} \quad \delta(t) = \int_0^t \omega(\tau) d\tau, \quad \text{где} \quad \omega(t) = n(t)/9,55 \text{ [рад/с]},$$

то скоростной электропривод можно превратить в следящий, если к исполнительному электродвигателю подключить интегрирующее звено, например, рулевую машину, как показано на рисунке 1.2. Введение в прямую цепь электропривода рулевой машины РМ, передаточная функция которой устанавливает связь между входом – изображением угловой скорости $\Omega(s)$ и выходом – изображением угла поворота $\Delta(s)$ (при нулевых начальных условиях) равносильно введению в прямую цепь интегрирующего звена

$$W_{pm}(s) = \frac{\Delta(s)}{\Omega(s)} = \frac{1}{T_{pm}s},$$

что превращает его в систему с астатическим объектом, то есть в систему с нулевой статической ошибкой от управляющего воздействия. Принцип действия следящего электропривода (принцип управления с отрицательной обратной связью) не отличается от скоростного электропривода. Разница только в виде обратной связи. В скоростном электроприводе сигнал обратной связи пропорционален скорости, а в следящем – угловому или линейному перемещению.

Для скоростного привода задающий сигнал $u_{зад} = const$ и задача системы управления заключается в поддержании режима, когда выходная величина (угловая скорость) удерживается на заданном постоянном уровне. Такой режим называют режимом стабилизации, а системы его обеспечивающие – системами стабилизации. Для следящего привода задающий сигнал $u_{зад}(t) = var$ представляет собой произвольную функцию $f(t)$ и задача системы управления заключается в повторении этой функции на выходе, то есть $\delta(t) = f(t)$. Такой режим называют следящим, а системы его обеспечивающие – следящими системами. Для следящих систем в качестве обратной связи используют датчик положения.

1.2. Математическое описание ДПТ с независимым возбуждением

По роду тока электропривод разделяется на привод переменного и постоянного тока. В электроприводе постоянного тока используется двигатель постоянного тока (ДПТ), который имеет различные схемы включения: с независимым, параллельным и последовательным возбуждением. В данной работе исследуется двигатель постоянного тока с независимым возбуждением (НВ) при управлении по цепи якоря. В таком случае ДПТ с НВ рассматривается как звено системы управления, имеющее вход – клеммы якорной цепи и выход – вал якоря (ротора). При этом входной величиной является напряжение $u_a(t)$, подаваемое на клеммы якорной цепи двигателя, а выходной – угловая скорость $n(t)$ вращения вала ротора.

Эквивалентная схема замещения ДПТ НВ изображена на рисунке 1.3.

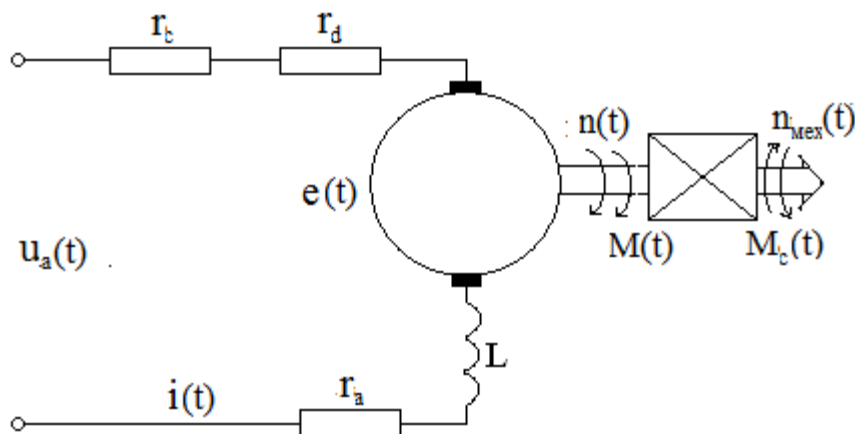


Рисунок 1.3. – Эквивалентная схема включения ДПТ с независимым возбуждением

Основные уравнения для описания математической модели двигателя постоянного тока с независимым возбуждением, формирующим постоянный магнитный поток, в динамическом режиме при управлении по цепи якоря могут быть получены при помощи законов Кирхгофа и Ньютона.

Руководствуясь II законом Кирхгофа, по эквивалентной схеме, изображенной на рисунке 1.3, можно составить дифференциальное уравнение (1.1), описывающее динамику электромагнитных процессов в якорной цепи ДПТ с НВ (электрическая часть).

В соответствии со II законом Ньютона для вращающихся тел можно построить дифференциальное уравнение (1.2), описывающее динамику вращения якоря вместе с выходным валом под действием электромагнитного момента, развиваемого ДПТ, и моментом нагрузки, приложенного к его выходному валу (механическая часть).

$$u_a(t) = Ri(t) + e(t) + L \frac{di(t)}{dt}, \quad (1.1)$$

$$M(t) = M_c(t) + J \frac{d\omega(t)}{dt}, \quad (1.2)$$

$$e(t) = C_e \omega(t), \quad (1.3)$$

$$M(t) = C_m i(t), \quad (1.4)$$

где

$u_a(t)$ – напряжение на якорной обмотке двигателя, [В];

$e(t)$ – электродвижущая сила (ЭДС), возникающая на якорной обмотке при вращении якоря, В;

$i(t)$ – ток якоря, [А];

$M(t)$ – электромагнитный момент двигателя, [Нм];

$M_c(t)$ – момент сопротивления движению (нагрузки), [Нм];

$n(t)$ – скорость вращения вала электродвигателя (ротора), [об/мин];

$\omega(t) = n(t) / 9,55$ – угловая скорость вращения вала электродвигателя, $[\text{с}^{-1}]$;

$R = r_a + r_c + r_d$ – суммарное активное сопротивление якорной цепи, $[\text{Ом}]$;

L – индуктивность якорной обмотки, $[\text{Гн}]$;

$J = J_\partial + J_{\text{мех}}^{np}$ – суммарный момент инерции, приведенный к валу двигателя, $[\text{кг м}^2]$;

$J_{\text{мех}}^{np} = J_{\text{мех}} / k_{\text{ред}}^2$ – момент инерции механической нагрузки, приведенный к валу электродвигателя, $[\text{кг м}^2]$;

$J_{\text{мех}}$ – момент инерции рабочего механизма (барабана лебедки), $[\text{кг м}^2]$;

$k_{\text{ред}}$ – коэффициент передачи механического редуктора;

C_e – коэффициент пропорциональности для ЭДС двигателя, $[\text{Вс}]$;

C_m – коэффициент пропорциональности для момента двигателя, $[\text{Нм/А}]$.

При использовании управления по цепи якоря на обмотку возбуждения подается постоянное напряжение U_e , равное напряжению питания $U_{\text{ном}}$. При этом магнитный поток Φ , создаваемый этой обмоткой, можно считать постоянным.

С точки зрения будущей математической модели выделим зависящие от времени t входные переменные (воздействия) и переменные состояния (переменные, стоящие под знаком производной).

К входным переменным отнесем следующие:

$u_a(t)$ – напряжение якоря;

$M_c(t)$ – момент сопротивления движению.

К переменным состояния отнесем следующие:

$\omega(t)$ – угловая скорость вращения вала двигателя;

$i(t)$ – ток якорной цепи.

В качестве выходов могут приниматься переменные состояния – все вместе или какая-нибудь одна, например, чаще всего в роли выходной переменной выступает угловая скорость $\omega(t)$ вращения вала двигателя.

Остальные переменные, зависящие от времени (электромагнитный момент $M(t)$ и ЭДС двигателя $e(t)$), могут быть выражены через переменные состояния и найдены с помощью уравнений (1.3) и (1.4).

Постоянные коэффициенты, входящие в уравнения (1.1) – (1.4), рассматриваются как параметры и рассчитываются при помощи справочных данных и уравнений стационарных режимов. Например, по приведенным в справочной таблице Б1 номинальным значениям входного напряжения $U_{\text{ном}}$ и тока якорной цепи $I_{\text{ном}}$, номинальным значениям мощности $P_{\text{ном}}$ и скорости вращения вала двигателя $n_{\text{ном}}$ $[\text{об/мин}]$, можно определить значения коэффициентов пропорциональности C_e и C_m , а по значениям конструктивных параметров (R и p – соответственно сопротивлению якорной цепи и числа пар полюсов) можно определить индуктивность L якорной обмотки и величину постоянной времени T_a якорной цепи ДПТ.

Расчет параметров математической модели ДПТ можно выполнить при помощи уравнений стационарного режима, которые следуют из уравнений (1.1) – (1.4), если производные положить равными нулю, а переменным присвоить номинальные значения, взятые из таблицы Б1 для конкретного типа электродвигателя.

Уравнения стационарного режима, соответствующего динамической системе (1.1) – (1.4), имеют следующий вид:

$$U_{ном} = RI_{ном} + C_e \omega_{ном}, \quad (1.5)$$

$$M_{ном} = C_m I_{ном}. \quad (1.6)$$

Из последнего результата следуют формулы для расчета искомых параметров математической модели электродвигателя

$$C_e = \frac{U_{ном} - RI_{ном}}{\omega_{ном}} [\text{Вс/рад}], \text{ где } \omega_{ном} [c^{-1}]; \quad (1.7)$$

$$C_m = \frac{M_{ном}}{I_{ном}}, [\text{Нм/А}], \text{ где } M_{ном} = 1000 \frac{P_{ном}}{\omega_{ном}} \frac{[\kappa Bm]}{[c^{-1}]}.$$

Приведенное математическое описание ДПТ с НВ как объекта управления используется для построения его математических моделей в различных формах.

Модель ДПТ с НВ в форме пространства состояний получается из дифференциальных уравнений (1.1) и (1.2) путем записи их в нормальной форме Коши с учетом (1.3) и (1.4). Если в качестве переменной состояния дополнительно ввести в рассмотрение еще и угол поворота $\theta(t)$ выходного вала ДПТ, то к полученным уравнениям следует добавить соотношение, связывающее производную угла поворота вала и его угловую скорость.

$$\frac{d\theta(t)}{dt} = \omega(t). \quad (1.8)$$

В таком случае модель ДПТ с НВ в форме пространства состояний будет описываться следующей системой дифференциальных уравнений:

$$\left. \begin{aligned} \frac{di(t)}{dt} &= -\frac{R}{L} \cdot i(t) - \frac{C_e}{L} \cdot \omega(t) + 0 \cdot \theta(t) + \frac{1}{L} \cdot u_a(t), \\ \frac{d\omega(t)}{dt} &= \frac{1}{J} \cdot C_m \cdot i(t) + 0 \cdot \omega(t) + 0 \cdot \theta(t) - \frac{1}{J} \cdot M_c(t), \\ \frac{d\theta(t)}{dt} &= 0 \cdot i(t) + 1 \cdot \omega(t) + 0 \cdot \theta(t), \end{aligned} \right\} \quad (1.9)$$

$$t = t_0; i(t_0) = i_0; \omega(t_0) = \omega_0; \theta(t_0) = \theta_0.$$

Векторно-матричная запись уравнений модели ДПТ (1.9) в пространстве состояний будет иметь следующий вид:

$$\left. \begin{aligned} \frac{dx(t)}{dt} &= Ax(t) + Bu(t) \\ y(t) &= Cx(t) + Du(t) \\ t &= t_0; x(t_0) = x_0 \end{aligned} \right\} \quad (1.10)$$

В соответствии с уравнениями состояния с начальными условиями (1.9) можно определить элементы модели состояния для ДПТ (1.10) с соответствующими начальными условиями следующим образом:

$$x(t) = \begin{bmatrix} x_1(t) \\ x_2(t) \\ x_3(t) \end{bmatrix} - \text{вектор состояния,}$$

где $x_1(t) = i(t)$; $x_2(t) = \omega(t)$; $x_3(t) = \theta(t)$ – переменные состояния;

$$A = \begin{bmatrix} a_{11} & a_{12} & a_{13} \\ a_{21} & a_{22} & a_{23} \\ a_{31} & a_{32} & a_{33} \end{bmatrix} - \text{матрица состояния,}$$

где

$$a_{11} = -\frac{R}{L}, \quad a_{12} = -\frac{C_e}{L}, \quad a_{13} = 0, \quad a_{21} = \frac{C_m}{J}, \quad a_{22} = 0, \quad a_{23} = 0, \\ a_{31} = 0, \quad a_{32} = 1, \quad a_{33} = 0.$$

$$u(t) = \begin{bmatrix} u_1(t) \\ u_2(t) \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} u_a(t) \\ M_c(t) \end{bmatrix} - \text{вектор входных воздействий. При этом матрица}$$

входов будет иметь вид

$$B = \begin{bmatrix} b_{11} & b_{12} \\ b_{21} & b_{22} \\ b_{31} & b_{32} \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} 1/L & 0 \\ 0 & -1/J \\ 0 & 0 \end{bmatrix}, \text{ где } b_{11} = \frac{1}{L}; \quad b_{22} = -\frac{1}{J}. \text{ Остальные элементы нуле-}$$

вые.

Пусть выходами будут все переменные состояния. В таком случае вектор выходов будет иметь вид

$$y(t) = \begin{bmatrix} y_1(t) \\ y_2(t) \\ y_3(t) \end{bmatrix},$$

где

$$y_1(t) = i(t) - \text{ток в цепи якоря;}$$

$y_2(t) = \omega(t)$ – угловая скорость вращения вала ДПТ;

$y_3(t) = \theta(t)$ – угол поворота выходного вала ДПТ.

$$C = \begin{bmatrix} 1 & 0 & 0 \\ 0 & 1 & 0 \\ 0 & 0 & 1 \end{bmatrix} \text{ – полная матрица выходов (обеспечивает на выходе наличие}$$

всех переменных состояния, то есть на выходе полный вектор состояния $y(t) = x(t)$.

Следует отметить, что в случае, если на выходе необходимо наблюдать только одну переменную состояния, например, угловую скорость $\omega(t)$, то матрица выходов будет иметь следующий вид:

$$C = [0 \quad 1 \quad 0].$$

Матрица D в уравнениях (1.10) называется матрицей прямых связей. Ее размерность и значения элементов определяются при наличии в системе прямых связей входа и выхода. В противном случае все ее элементы равны нулю, а размерность определяется в зависимости от размерностей остальных матриц модели (1.10). В рассматриваемом случае размерности матриц, как элементов модели ДПТ в пространстве состояний, имеют следующие значения:

$$A - (3 \times 3); B - (3 \times 2); C - (3 \times 3); D - (3 \times 2),$$

а матрица D имеет вид

$$D = \begin{bmatrix} 0 & 0 \\ 0 & 0 \\ 0 & 0 \end{bmatrix}$$

Для случая модели с одним выходом и одним входом матрицы C и D будут иметь следующий вид:

$$C = [0 \quad 1 \quad 0]; \quad D = [0].$$

Для построения математических моделей ДПТ с НВ в виде передаточных функций и структурной схемы следует применить к уравнениям (1.1) – (1.4) преобразование Лапласа при нулевых начальных условиях. В таком случае система (1.1) – (1.4) преобразуется к следующему виду:

$$U_a(s) = R \cdot I(s) + E(s) + L \cdot s \cdot I(s), \quad (1.11)$$

$$M(s) = M_c(s) + J \cdot s \cdot \Omega(s), \quad (1.12)$$

$$E(s) = C_e \cdot \Omega(s), \quad (1.13)$$

$$M(s) = C_m I(s). \quad (1.14)$$

Ток якоря из (1.11) может быть выражен следующим образом:

$$I(s) = \frac{U_a(s) - E(s)}{Ls + R} = \frac{U_a(s) - E(s)}{T_a s + 1} R^{-1}, \quad (1.15)$$

где $T_a = \frac{L}{R}$ – постоянная времени цепи якоря. (1.16)

Скорость вращения вала двигателя $\Omega(s)$ может быть выражена из уравнения (1.12) и представлена следующим образом:

$$\Omega(s) = \frac{M(s) - M_c(s)}{Js}. \quad (1.17)$$

Индуктивность обмотки якоря L , которая необходима для вычисления постоянной времени T_a , можно вычислить по формуле

$$L = 0,6 \frac{U_{ном}}{\omega_{ном} \cdot I_{ном} \cdot p}, \quad (1.18)$$

где p – число пар полюсов в конструкции статора ДПТ с НВ.

По уравнениям (1.11) – (1.14) с учетом выражений (1.16) и (1.17) строится структурная схема – модель ДПТ с НВ, изображенная на рисунке 1.4.

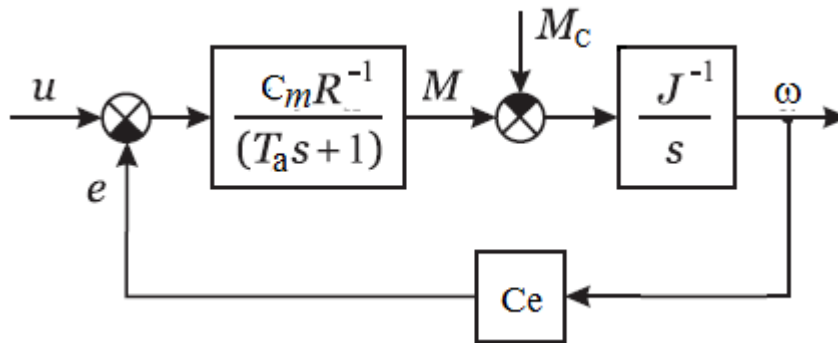


Рисунок 1.4. – Структурная схема как модель ДПТ с НВ с выходом по угловой скорости

Для получения передаточных функций по управлению и возмущению следует преобразовать уравнения (1.11) – (1.14) к виду

$$sI(s) = -\frac{R}{L} I(s) - \frac{C_e}{L} \Omega(s) + \frac{1}{L} U_a(s), \quad (1.19)$$

$$s\Omega(s) = \frac{1}{J} C_m I(s) - \frac{1}{J} M_c(s), \quad (1.20)$$

а затем из уравнения (1.20) выразить ток $I(s)$ и полученное выражение подставить в (1.19). Далее при $M_c(s)=0$ можно найти передаточную функцию по управлению $W_U(s)$, а при $U_a(s)=0$ – передаточную функцию $W_M(s)$ по возмущению.

Вводя обозначения

$$T_e = \frac{L}{R} = T_a - \text{электромагнитная постоянная времени двигателя [с];}$$

$$T_m = \frac{RJ}{C_e C_m} - \text{электромеханическая постоянная времени двигателя [с];}$$

$$k_{dpt} = \frac{1}{C_e} - \text{коэффициент передачи двигателя по управлению } \left[\frac{\text{с}^{-1}}{B} \right];$$

$$k_{dpt_M} = \frac{R}{C_e C_m} - \text{коэффициент передачи двигателя по возмущению } \left[\frac{\text{с}^{-1}}{H_M} \right]$$

единое уравнение ДПТ можно переписать в изображениях по Лапласу виде

$$(T_e T_m s^2 + T_m s + 1)\Omega(s) = k_{dpt}U(s) - k_{dpt_M}(T_e s + 1)M_c(s). \quad (1.21)$$

Окончательно уравнение (1.21) можно переписать в следующем виде:

$$\Omega(s) = \frac{k_{dpt}}{T_e T_m s^2 + T_m s + 1}U(s) + \frac{k_{dpt_M}(T_e s + 1)}{T_e T_m s^2 + T_m s + 1}M_c(s), \quad (1.22)$$

где

$$W_{dpt}^U(s) = \frac{k_{dpt}}{T_e T_m s^2 + T_m s + 1} - \text{передаточная функция ДПТ по управлению;}$$

$$W_{dpt}^M(s) = \frac{k_{dpt_M}(T_e s + 1)}{T_e T_m s^2 + T_m s + 1} - \text{передаточная функция ДПТ по возмущению.}$$

Следует отметить, что для современных двигателей постоянного тока с независимым возбуждением при управлении со стороны якорной цепи постоянные времени удовлетворяют неравенству $T_m > 4T_e$, что гарантирует наличие у передаточных функций ДПТ вещественных полюсов. При $T_m \gg T_e$ передаточные функции ДПТ могут быть представлены инерционными звеньями первого порядка с постоянной времени T_m следующим образом:

$$W_{dpt}^U(s) = \frac{k_{dpt}}{T_m s + 1}; \quad W_{dpt}^M(s) = \frac{k_{dpt-M}}{T_m s + 1}.$$

Справочные данные по электродвигателям постоянного тока с независимым возбуждением приведены в таблице Б1 приложения Б.

Структурную схему, изображенную на рис. 1.4 удобно использовать в качестве модели ДПТ с НВ при исследовании электропривода в среде визуального моделирования *Simulink*.

1.3. Математическое описание тиристорного преобразователя

Передаточная функция силового тиристорного преобразователя имеет вид:

$$W_{tp}(s) = \frac{k_{tp}}{T_{tp}s + 1},$$

где, постоянная времени тиристорного преобразователя T_{tp} вычисляется по формуле

$$T_{tp} = \frac{1}{2fm},$$

где, в свою очередь, приняты следующие обозначения:

f – частота напряжения промышленной сети, [Гц];

m – коэффициент пульсаций схемы.

Коэффициент передачи силового тиристорного преобразователя определяется соотношением номинального напряжения питания к максимальному напряжению U_{tp} на входе

$$k_{tp} = \frac{U_{ном}}{U_{tp}}.$$

Для вычисления параметров k_{tp} и T_{tp} передаточной функции $W_{tp}(s)$ силового тиристорного преобразователя следует использовать следующие данные:

$$U_{tp} = 10\text{В}; U_{ном} = 220\text{В (или 110 В)}; f = 50\text{Гц}; m = 6.$$

1.4. Математическое описание редуктора и рулевой машины

Для связи с рабочим механизмом (лебедкой) используется одноступенчатый механический редуктор с передаточным числом ρ , которое вычисляется по принятой в механике формуле

$$\rho = \omega_{ном} / \omega_{мех},$$

где $\omega_{\text{мех}}$ – угловая скорость [рад/с] барабана лебедки, соединенного через редуктор с валом исполнительного электродвигателя;

$\omega_{\text{ном}}$ – номинальная угловая скорость [рад/с] вала (ротора) ДПТ, которая определяется по справочным данным, где указывается скорость вращения вала (ротора) $n_{\text{ном}}$ [об/мин].

Вычисление угловой скорости $\omega_{\text{ном}}$ по справочным значениям скорости вращения вала $n_{\text{ном}}$ ДПТ выполняется по формуле

$$\omega_{\text{ном}} = n_{\text{ном}} / 9,55 .$$

Коэффициент передачи механического редуктора как звена системы управления определяется следующим соотношением:

$$k_{\text{ред}} = \omega_{\text{мех}} / \omega_{\text{ном}} = 1 / \rho ,$$

где ρ – передаточное число одноступенчатого механического редуктора.

Передаточная функция рулевой машины с редуктором представляется в виде

$$W_{\text{рм}}(s) = \frac{\Delta(s)}{\Omega(s)} = \frac{k_{\text{ред}}}{T_{\text{рм}}} \frac{1}{s} ,$$

где $T_{\text{рм}}$ – постоянная времени рулевой машины;

$k_{\text{ред}}$ – коэффициент передачи редуктора.

Значение $k_{\text{ред}}$ механического редуктора лебёдки (или рулевой машины) приведено в таблице Б1 Приложения Б.

1.5. Математическое описание датчика обратной связи

В качестве датчиков угловой скорости в системах управления электроприводом получили широкое распространение тахогенераторы – электрические машины постоянного тока с легким якорем и магнитной системой с малым гистерезисом. Передаточная функция датчика угловой скорости вала барабана лебедки соответствует линейному безынерционному звену и представляется в виде

$$W_{\text{ос}}(s) = k_{\text{ос}}, \text{ где } k_{\text{ос}} = 1 \text{ Вс/рад.}$$

Передаточная функция датчика углового положения в следящем приводе представляется в виде

$$W_{\text{доc}}(s) = k_{\text{доc}}, \text{ где } k_{\text{доc}} = 1 \text{ В/рад.}$$

1.6. Математическое описание регулятора

Регулятор – это устройство, вырабатывающее на основании сигнала ошибки регулирования (рассогласования) сигнал управления такой величины и знака, чтобы при помощи исполнительного двигателя уменьшить сигнал этой ошибки. Регулятор реализует закон управления, который может быть представлен в виде уравнения или передаточной функции.

К регуляторам, применяемым в системах управления электроприводами, относятся: пропорциональный – П регулятор, интегральный – И регулятор, пропорционально-интегральный – ПИ регулятор и пропорционально-интегрально-дифференциальный – ПИД регулятор. Для управления электроприводом наиболее широкое распространение получил ПИ регулятор. Это объясняется его более простой технической реализацией и меньшей чувствительностью к влиянию высокочастотных помех, возникающих в результате операции дифференцирования.

Закон пропорционального управления записывается в виде следующего уравнения:

$$u(t) = k_p e(t),$$

где $u(t)$ – управляющий сигнал (напряжение) на выходе П регулятора;

$e(t)$ – сигнал ошибки управления (напряжение) на входе П регулятора;

k_p – пропорциональный коэффициент (параметр настройки П регулятора).

Соответствующая закону пропорционального управления передаточная функция П регулятора имеет вид:

$$W_p(s) = k_p. \quad (1.23)$$

Закон интегрального управления записывается в виде уравнения:

$$u(t) = \frac{1}{T_i} \int_0^t e(\tau) d\tau,$$

где T_i – интегральная постоянная времени И регулятора.

Соответствующая передаточная функция И регулятора имеет вид

$$W_i(s) = \frac{1}{T_i s} = \frac{k_i}{s}, \quad (1.24)$$

где $k_i = \frac{1}{T_i}$ – интегральный коэффициент передачи И регулятора.

Передаточная функция ПИ регулятора определяется как параллельное соединение пропорционального и интегрального регуляторов следующим образом:

$$W_{pi}(s) = W_p(s) + W_i(s),$$

откуда с учетом (1.23) и (1.24) следует

$$W_{pi}(s) = k_p + \frac{k_i}{s} = \frac{k_p s + k_i}{s} = \frac{k_p k_i (s/k_i + 1)}{s} = \frac{k_p (T_i s + 1)}{T_i s} = k_p + \frac{k_p}{T_i s} = k_{II} + k_{II} \frac{1}{s}, \quad (1.25)$$

где k_{II} – пропорциональный коэффициент передачи ПИ регулятора;

$k_{II} = \frac{k_p}{T_i}$ – интегральный коэффициент передачи ПИ регулятора;

T_i – интегральная постоянная времени И регулятора;

$T_{pi} = \frac{T_i}{k_p}$ – интегральная постоянная времени ПИ регулятора.

Передаточные функции (1.23) – (1.25) представляют собой математические описания (модели) регуляторов без ограничения на их выходе управляющего сигнала. На практике выходной сигнал реального регулятора всегда ограничен уровнем питающего напряжения, разрядностью микроконтроллера или допустимым уровнем выходного сигнала. Этот факт учитывают при моделировании регулятора путём введения в его структурную модель блока ограничения, как показано на рисунке 1.5.

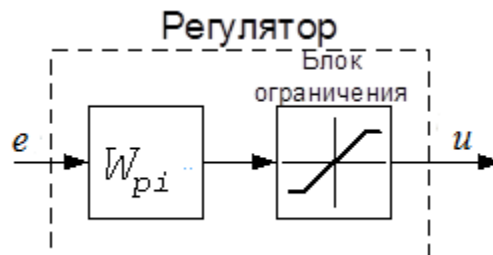


Рисунок 1.5. – Структурная модель ПИ регулятора с ограничением выходного сигнала

Введение в структуру линейной модели САУ блока ограничения, который представляет собой существенно нелинейный элемент, преобразует её в нелинейную. Это приводит к необходимости исследования устойчивости нелинейной модели в малом и большом.

При исследовании устойчивости в малом нужно выбрать величину сигнала задающего воздействия $u_{зад}$ таким образом, чтобы сигнал управления u на выходе регулятора, изображённого на рисунке 1.5, не ограничивался блоком ограничения.

При исследовании устойчивости в большом нужно выбрать величину сигнала задающего воздействия $u_{зад}$ таким образом, чтобы сигнал управления u на выходе регулятора, изображённого на рисунке 1.5, ограничивался блоком ограничения.

2. СИНТЕЗ РЕГУЛЯТОРА ДЛЯ ЭЛЕКТРОПРИВОДА

2.1. Технический оптимум

В качестве стандарта на технические требования к проектируемой САУ при синтезе регулятора методом компенсации наибольшей постоянной времени объекта управления часто используются модульный (технический) оптимум. Технический оптимум означает следующее: замкнутый контур САУ динамически оптимален, если он одинаково передает на выход сигналы с различными частотами на возможно большем интервале частот, то есть на этом интервале модуль АЧХ замкнутого контура $|W_{зам}(s)| = const$.

Оптимизация на максимум полосы пропускания является также и оптимизацией по быстродействию. Чем шире полоса пропускания, тем меньше время переходного процесса в замкнутом контуре САУ.

Передаточная функция разомкнутого контура в системе второго порядка, соответствующая модульному (техническому) оптимуму имеет вид:

$$W(s)_{раз} = \frac{1}{2T_{\mu}s(T_{\mu}s + 1)}, \quad (2.1)$$

где $T_{\mu} < 1$ – некомпенсированная (меньшая) постоянная времени объекта управления. Передаточная функция замкнутой системы, соответствующая техническому оптимуму, имеет вид

$$W_{зам}(s) = \frac{1}{2T_{\mu}^2 s^2 + 2T_{\mu}s + 1} \quad (2.2)$$

При этом в замкнутой системе второго порядка, удовлетворяющей стандарту технического оптимума, параметры переходной характеристики имеют следующие значения:

- время нарастания $t_r = 4,71T_{\mu}$;
- время установления $t_p = 8,4T_{\mu}$;
- перерегулирование $\sigma = 4,3\%$.

Передаточная функция замкнутой системы, удовлетворяющей стандарту технического оптимума, достаточно точно аппроксимируется звеном первого порядка

$$W_{зам}(s) = \frac{1}{2T_{\mu}s + 1}, \quad (2.3)$$

что широко используется при проектировании многоконтурных САУ.

2.2. Порядок синтеза регуляторов для электропривода

Выбор типа регулятора и его настройка (синтез) осуществляется на основании анализа динамических свойств объекта управления.

Применение П регулятора в замкнутой САУ со статическим объектом управления позволяет получить статическую по задающему воздействию систему, а в случае с астатическим ОУ астатическую по задающему воздействию систему.

Применение И или ПИ регулятора в системе со статическим объектом управления позволяет получить астатическую по задающему и возмущающему воздействию (если возмущение одно и неизменно во времени) замкнутую САУ.

В системе с астатическим объектом управления и применении И или ПИ регулятора замкнутая САУ будет астатической по заданию и по возмущению, если учитывается только главное (момент сопротивления на валу двигателя) возмущающее воздействие. Однако САУ с ПИ регулятором будет обладать большим быстродействием.

При использовании принципа последовательной коррекции для синтеза регулятора широко применяются типовые настройки контуров управления и, в частности, настройка на технический оптимум.

Расчет передаточной функции регулятора с применением типовых настроек контуров регулирования выполняется в следующем порядке.

На первом шаге необходимо задаться желаемой (типовой) передаточной функцией САУ в разомкнутом состоянии. Для систем электропривода применяют настройку контура регулирования на технический оптимум или симметричный оптимум (с двукратным интегрированием).

Желаемая передаточная функция разомкнутого контура при настройке на технический оптимум имеет вид:

$$W(s)_{жел}^{то} = \frac{1}{2T_{\mu}s(T_{\mu}s+1)}, \quad (2.4)$$

а при настройке на симметричный оптимум имеет следующий вид:

$$W(s)_{жел}^{со} = \frac{4T_{\mu}s+1}{8T_{\mu}^2s^2(T_{\mu}s+1)},$$

где T_{μ} – малая некомпенсированная постоянная времени объекта управления.

На втором шаге следует определить передаточную функцию системы в разомкнутом состоянии:

$$W(s)_{раз} = \prod_{i=1}^n W(s)_i, \quad (2.5)$$

где $W(s)_i$ – передаточные функции звеньев, входящих в замкнутый контур управления.

На третьем шаге вычисляется передаточная функция регулятора по формуле:

$$W(s)_{reg} = \frac{W(s)_{жел}}{W(s)_{раз}}. \quad (2.6)$$

Передаточную функцию регулятора, рассчитанную по формуле (2.6) используют для настройки контура управления объектом с передаточной функцией в разомкнутом состоянии $W(s)_{раз}$.

2.3. Синтез регулятора для электропривода со статическим объектом

Передаточная функция ДПТ с НВ по управлению $W_{dpt}^U(s)$, полученная из уравнения (1.22), имеет вид

$$W_{dpt}^U(s) = \frac{k_{dpt}}{T_e T_m s^2 + T_m s + 1}. \quad (2.7)$$

Передаточная функция (2.7) соответствует объекту управления статического типа, так как в ее составе отсутствуют интегрирующие звенья. Числовые значения параметров этой передаточной функции можно рассчитать по исходным справочным данным электродвигателя серии П, приведенным в Приложении А, при помощи программы *DCM_Te_Tm_kdpt.m*, текст (скрипт) которой находится в приложении Б.

В случае, если $T_e \ll T_m$, то выражение (2.7) можно переписать следующим образом

$$W_{dpt}^U(s) = \frac{k_{dpt}}{T_e T_m s^2 + (T_e + T_m)s + 1} = \frac{k_{dpt}}{(T_e s + 1)(T_m s + 1)}, \quad (2.8)$$

Замкнутая САУ электроприводом со статическим объектом управления представлена на рисунке 2.1.

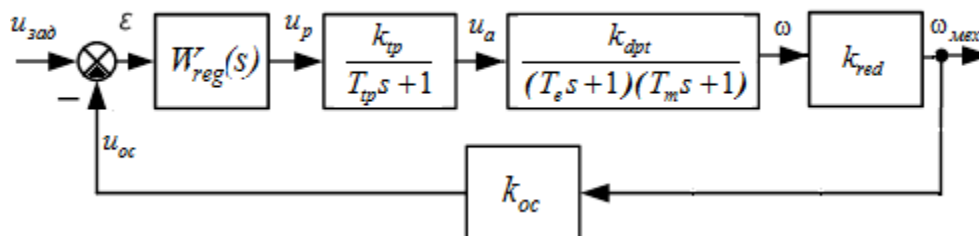


Рисунок 2.1. Замкнутая САУ скоростным электроприводом со статическим объектом управления

Для синтеза параметров регулятора можно воспользоваться формулой (2.6). При этом в качестве желаемой передаточной функции $W(s)_{жел}^{mo}$ разомкну-

той САУ электроприводом, обеспечивающей замкнутому контуру технический оптимум, следует выбрать передаточную функцию (2.1). При вычислении передаточной функции $W_{зам}(s)$ разомкнутой САУ (без регулятора) следует пренебречь постоянной времени тиристорного преобразователя ($T_{tp} = 0$) в силу ее малости по сравнению с другими постоянными T_e и T_m , а также воспользоваться выражением (2.8) для передаточной функции $W_{dpt}^U(s)$ объекта управления. При этом коэффициент усиления тиристорного преобразователя k_{tp} должен быть учтён. В результате передаточная функция разомкнутой САУ примет вид

$$W(s)_{раз} = \frac{k_{tp} k_{dpt} k_{red} k_{oc}}{(T_e s + 1)(T_m s + 1)}. \quad (2.9)$$

Далее по формуле (2.6) вычисляется искомая передаточная функция регулятора в виде

$$W(s)_{reg} = \frac{(T_e s + 1)(T_m s + 1)}{2T_e s (T_e s + 1) k_{tp} k_{dpt} k_{red} k_{oc}} = \frac{(T_m s + 1)}{s} k_{reg}, \quad (2.10)$$

где

$$k_{reg} = \frac{1}{2T_e k_{tp} k_{dpt} k_{red} k_{oc}} - \text{коэффициент усиления регулятора.}$$

Найденная передаточная функция (2.10) соответствует ПИ регулятору. Действительно, представляя (2.10) в виде

$$\frac{(T_m s + 1)}{s} k_{reg} = \frac{T_m s}{s} k_{reg} + \frac{k_{reg}}{s} = T_m k_{reg} + k_{reg} \frac{1}{s} = k_{II} + k_{II} \frac{1}{s},$$

можно получить формулы для расчёта параметров оптимальной настройки ПИ регулятора САУ электроприводом, модель которой изображена на рисунке 2.1

$$k_{II} = \frac{T_m}{2T_e k_{tp} k_{dpt} k_{red} k_{oc}} - \text{пропорциональный коэффициент передачи;} \quad (2.11)$$

$$k_{II} = \frac{1}{2T_e k_{tp} k_{dpt} k_{red} k_{oc}} - \text{интегральный коэффициент передачи,} \quad (2.12)$$

где T_m – электромеханическая постоянная времени;

T_e – электромагнитная постоянная времени ($T_e < T_m$);

k_{tp} – коэффициент передачи тиристорного преобразователя;

k_{dpt} – коэффициент передачи ДПТ;

$k_{red} = \frac{\omega_{ном}}{\omega_{мех}}$ – коэффициент передачи механического редуктора,

$\omega_{мех}$ – угловая скорость механизма лебёдки (барабана), соединенного через редуктор с валом исполнительного двигателя;

$\omega_{ном}$ – номинальная угловая скорость вала ДПТ;

$k_{ос}$ – коэффициент передачи обратной связи (датчика).

Таким образом, для САУ электроприводом с моделью в виде структурной схемы, изображённой на рисунке 2.1, параметры оптимальной настройки ПИ регулятора можно определить по формулам (2.11) и (2.12).

Следует отметить, что на этапе синтеза значение постоянной времени тиристорного преобразователя принималось равным $T_{tp} = 0$. Это означает, что инерционность преобразователя при расчете параметров ПИ регулятора не учитывалась. На этапе заключительного моделирования САУ электроприводом постоянную времени тиристорного преобразователя T_{tp} следует учесть, то есть $T_{tp} \neq 0$. Поэтому необходимо сравнить обе переходные характеристики, полученные в ходе моделирования, и сделать вывод о допустимости пренебрежения постоянной времени T_{tp} на этапе синтеза параметров регулятора.

2.4. Синтез регулятора для электропривода с астатическим объектом управления

Структурная схема САУ электроприводом с астатическим объектом изображена на рисунке 2.2. Эта система обладает астатизмом первого порядка (в прямой цепи имеется одно интегрирующее звено) и по этой причине является астатической по отношению к задающему воздействию, то есть статическая ошибка от задающего воздействия равна нулю. При этом следует отметить, что в рассматриваемом случае, в отличие от схемы, изображенной на рисунке 3.1, используется не датчик угловой скорости, а датчик угла поворота δ с коэффициентом передачи k_{doc}

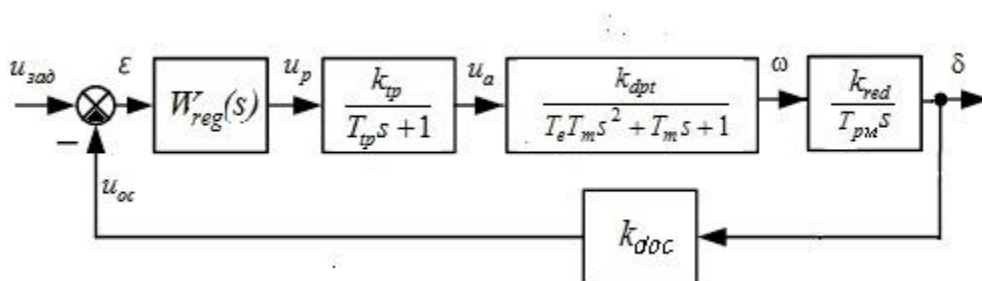


Рисунок 2.2. – Структурная схема замкнутой САУ электроприводом с астатическим объектом и датчиком угла поворота в обратной связи

Динамика такой системы характеризуется постоянными времени T_{tp}, T_e, T_m , а также интегральной постоянной времени $T_{pm} = 1\text{с}$. При этом, если постоянные времени удовлетворяют неравенствам $T_{tp} < T_e < T_m < T_{pm}$, то постоянными времени T_{tp} и T_e можно пренебречь и настройку САУ на технический оптимум провести с использованием П регулятора при помощи упрощенной математической модели (структурной схемы).

На рисунке 2.3 изображена упрощенная структурная схема САУ электроприводом с учетом малости постоянных времени $T_{tp} \approx 0$ и $T_e \approx 0$.

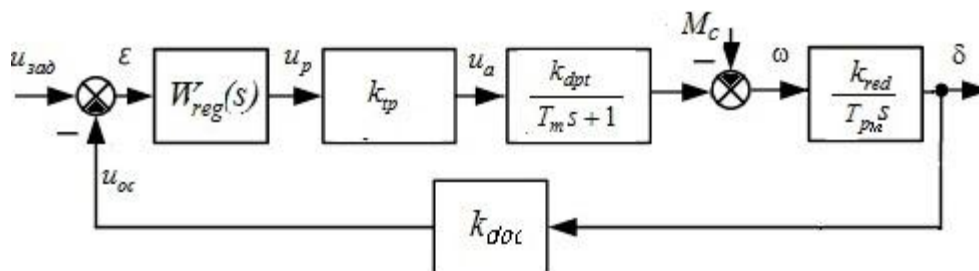


Рисунок 2.3. – Упрощенная схема замкнутой САУ электроприводом с астатическим объектом и датчиком угла поворота в обратной связи

В соответствии с преобразованной структурной схемой, передаточная функция САУ без регулятора в разомкнутом состоянии будет иметь вид:

$$W(s)_{раз} = \frac{k_1 k_{doc}}{T_{pm} s (T_m s + 1)}, \text{ где } k_1 = k_{tp} k_{dpt} k_{red}.$$

В таком случае передаточная функция регулятора, обеспечивающего технический оптимум в замкнутом контуре электропривода с астатическим объектом, в соответствии с (3.6) определяется из выражения:

$$W(s)_{reg} = \frac{W(s)_{жел}}{W(s)_{раз}} = \frac{T_{pm} s (T_m s + 1)}{2 T_\mu s (T_\mu s + 1) k_{doc} k_1}.$$

Поскольку $T_\mu = \min(T_m, T_{pm})$ и $T_m < T_{pm}$, то принимая $T_\mu = T_m$, а также учитывая, что $k_1 = k_{tp} k_{dpt} k_{red}$ можно получить передаточную функцию регулятора в следующем виде:

$$W(s)_{reg} = \frac{T_{pm}}{2 T_m k_{tp} k_{dpt} k_{red} k_{doc}} = k_{reg}.$$

Как следует из последнего выражения, передаточная функция синтезированного регулятора соответствует П регулятору с коэффициентом пропорцио-

нального усиления $k_p = k_{reg}$. Настроенная таким образом система является астатической по отношению к задающему воздействию, так как в прямой цепи стоит интегрирующее звено. Поэтому статическая ошибка по управляющему воздействию будет равна нулю. Однако, при подаче возмущающего воздействия $M_c(s)$ (момента) возникает статическая ошибка регулирования, которая отлична от нуля:

$$\Delta_M = (-1) \cdot M_c(s) \cdot \frac{2T_m}{T_{pm}}.$$

Если необходимо обеспечить астатизм и, следовательно, нулевую ошибку $\Delta_M = 0$ так же и по отношению к возмущающему воздействию, то проводится настройка системы на симметричный оптимум с применением ПИ регулятора.

Передаточная функция САУ (упрощённая) в разомкнутом состоянии в соответствии с рис. 3.3 имеет вид:

$$W(s)_{раз} = \frac{k_{tp} k_{dpt} k_{red} k_{doc}}{T_{pm} s (T_m s + 1)}.$$

Передаточная функция регулятора, обеспечивающего симметричный оптимум в замкнутом контуре электропривода с астатическим объектом, в соответствии с (3.5) и (3.6) определится следующим выражением:

$$W(s)_{reg} = \frac{W(s)_{жел}}{W(s)_{раз}} = \frac{T_{pm} s (T_m s + 1) (4T_\mu s + 1)}{8T_\mu^2 s^2 (T_\mu s + 1) k_{tp} k_{dpt} k_{red} k_{doc}}.$$

Принимая $T_\mu = T_m$, можно получить передаточную функцию регулятора, обеспечивающего симметричный оптимум в замкнутой САУ электроприводом, в следующем виде:

$$W(s)_{reg} = \frac{T_{pm} (4T_m s + 1)}{k_{tp} k_{dpt} k_{red} k_{doc} 2T_m 4T_m s} = \frac{k_{reg} (4T_m s + 1)}{4T_m s} = k_{reg} + \frac{k_{reg}}{4T_m} \frac{1}{s},$$

а параметры настройки ПИ регулятора $k_p = k_{reg}$ и $k_i = k_{reg} / 4T_m$ обеспечивают симметричный оптимум в контуре электропривода.

Настроенная таким образом на симметричный оптимум САУ электроприводом будет астатической по отношению к задающему и возмущающему воздействиям. Это означает, что статические ошибки по управляющему и возмущающему воздействиям будут равны нулю. Однако при этом переходная характеристика такой САУ будет обладать большим перерегулированием $\sigma = 43\%$ при длительности времени установления $t_p = 16,5T_m$.

3. СОДЕРЖАНИЕ ЭТАПОВ ВЫПОЛНЕНИЯ РАСЧЕТНО-ГРАФИЧЕСКОЙ РАБОТЫ

3.1. На основе функциональной схемы, приведенной на рис. 1.1, разработать математическую модель электропривода постоянного тока с ПИ регулятором в виде структурной схемы. При этом для вычисления параметров T_e , T_m , k_{dpt} и k_{dpt_M} передаточной функции ДПТ с НВ следует использовать программу DCM_Data_Matrix_Te_Tm, текст которой приведен в Приложении Г. Исходные данные для этой программы следует выбирать для конкретного типа электродвигателя в соответствии с вариантом задания из справочной Таблицы Г1, приведенной в приложении Г.

3.2. Используя модель САУ, построенную в п. 3.1, определить передаточную функцию $W(s)_{раз}$ разомкнутого контура и по ней построить графики ЛАЧХ и ФЧХ (диаграмму Боде) при помощи функции $bode(W_{раз})$. Значения параметров k_p , T_p , k_{oc} , k_{red} , необходимых для расчетов, определить по данным, приведенным в п. 1.3 – 1.5, а значения параметров настройки ПИ регулятора принять следующими $k_{II} = 1$ и $k_{III} = 0$, что будет соответствовать переводу ПИ регулятора в режим пропорционального П регулятора. Для решения этой задачи написать скрипт программы и поместить его в m-файл.

3.3. Используя модель САУ, построенную в п.3.1, определить передаточную функцию $W(s)_{зам}$ замкнутой системы управления и с её помощью построить график переходной характеристики для электропривода с П регулятором (при $k_{II} = 1$ и $k_{III} = 0$). По графикам, построенным в п.3.2 и 3.3 определить прямые показатели качества САУ с П регулятором. Для решения этой задачи написать скрипт программы и поместить его в m-файл.

3.4. В соответствии с рекомендациями, приведенными в п. 2.2, выполнить синтез ПИ регулятора, определив оптимальные настройки его параметров k_{II} и k_{III} . Построить переходную характеристику по управляющему воздействию для замкнутой САУ с найденными в результате синтеза параметрами ПИ регулятора, положив постоянную времени тиристорного преобразователя $T_p = 0$. Определить прямые показатели качества САУ с оптимальными настройками ПИ регулятора. Проверить их соответствие стандарту технического оптимума. Для решения этой задачи написать скрипт программы и поместить его в m-файл.

3.5. Построить переходную характеристику для САУ с оптимальными настройками ПИ регулятора при $T_p \neq 0$. Определить прямые показатели качества и сравнить их с результатами, полученными в п. 3.4 и п. 3.3.

3.6. Построить переходную характеристику для замкнутой САУ с оптимальными настройками ПИ регулятора и $T_p \neq 0$ как реакцию на два воздействия – управляющее и возмущающее. Для этого нужно изменить структурную схему, изображенную на рисунке 2.1, путём замены звена, соответствующего ДПТ, структурной схемой, изображённой на рисунке 1.4. На этой основе разработать S-модель, при помощи которой в среде *Simulink* построить искомую пе-

переходную характеристику при $u_{zad} = 1\text{В}$ и $M_c = 0,25\text{Нм}$, а также для случая $u_{zad} = 0\text{В}$ и $M_c = 0,25\text{Нм}$. Зафиксировать полученные осциллограммы и определить показатели качества.

3.7. Повторить задание п.3.6, используя векторно-матричную модель ДПТ НВ и написав соответствующий скрипт.

3.8. Дополнить S-модель нелинейным блоком, изображённым на рисунке 1.5, и исследовать устойчивость полученной нелинейной системы в малом и большом, наблюдая за переходной характеристикой при постепенном увеличении значения u_{zad} от 1 до значений, при которых выходной (управляющий) сигнал регулятора выйдет на ограничение, установленное в нелинейном блоке:

$$u = \pm 5\text{В} \text{ или } u = \pm 10\text{В}.$$

4. СОДЕРЖАНИЕ И ОФОРМЛЕНИЕ ПОЯСНИТЕЛЬНОЙ ЗАПИСКИ

4.1. Общие требования

При оформлении пояснительной записки к РГР по дисциплине «Теория автоматического управления» необходимо соблюдать существующие требования ГОСТов на оформление текстовой документации, обращая особое внимание на правила рубрикации, оформление формул, рисунков, таблиц, ссылок и оформление библиографического списка под заголовком – Литература.

При наборе текста пояснительной записки рекомендуется использовать следующие настройки текстового редактора: размер – А4; разметка страницы – поля обычные (верхнее, нижнее – 2 см, левое – 3 см, правое – 1,5 см) шрифт – Times New Roman, 14 пт; междустрочный интервал – 1,5 строки; отступ на первой строке – 1,25 см; выравнивание – по ширине. При наборе формул рекомендуется использовать редактор формул Equation EQNEDT32 со следующими надстройками.

Размеры: обычный – 14 пт, крупный индекс – 9 пт; мелкий индекс – 8 пт; крупный символ – 18 пт; мелкий символ – 10 пт.

Стиль: математический.

4.2. Структура пояснительной записки

Пояснительная записка к расчетно-графической работе должна иметь следующую структуру.

Титульный лист (1-й лист).

Содержание (2-й лист).

Задание, включая исходные данные, которые необходимы для расчета параметров регулятора САУ электроприводом, на бланке установленной формы (3-й лист).

Раздел 1. Введение в предметную область. Электропривод и его применение на судах российского морского флота. Элементный состав электропривода как электромеханической системы. Отличительная особенность современного электропривода – наличие системы управления.

Раздел 2. Построение математической модели электропривода как объекта автоматического управления. Описание математических моделей функциональных элементов как звеньев системы управления и на этой основе формирование структурной схемы системы управления электроприводом лебёдки или электропривода рулевого устройства. Выбор и разработка подходящего программного обеспечения для решения поставленной задачи.

Раздел 3. Синтез регулятора для электропривода. Формулировка требований к свойствам проектируемой системы управления электроприводом. Обоснование выбора метода и критериев синтеза структуры и параметров регулятора. Расчет оптимальной настройки (синтез) параметров регулятора. Определение показателей качества рассчитанной системы управления электроприводом. Анализ результатов моделирования, включая графики для частотных и временных переходных характеристик по управляющему и возмущающему воздействиям. Анализ устойчивости в малом и большом нелинейной модели управляемого электропривода. Разработка и выбор программного обеспечения.

Заключение. Формулировка результатов выполненных расчётов и исследований с приведением конкретных числовых значений показателей качества исследуемой системы.

Литература. Приводится список литературы по ГОСТ Р 7.0.5 — 2008.

4.3. Дополнительные требования

Все рисунки, графики с результатами моделирования нумеруются и подписываются в соответствии с представленными ниже образцами. Формулы нумеруются не все, а только те, на которые в тексте имеются ссылки. Переменные, входящие в формулы, должны снабжаться пояснениями по тексту или сразу после формулы. Пример оформления графика приведен на рисунке 4.1.

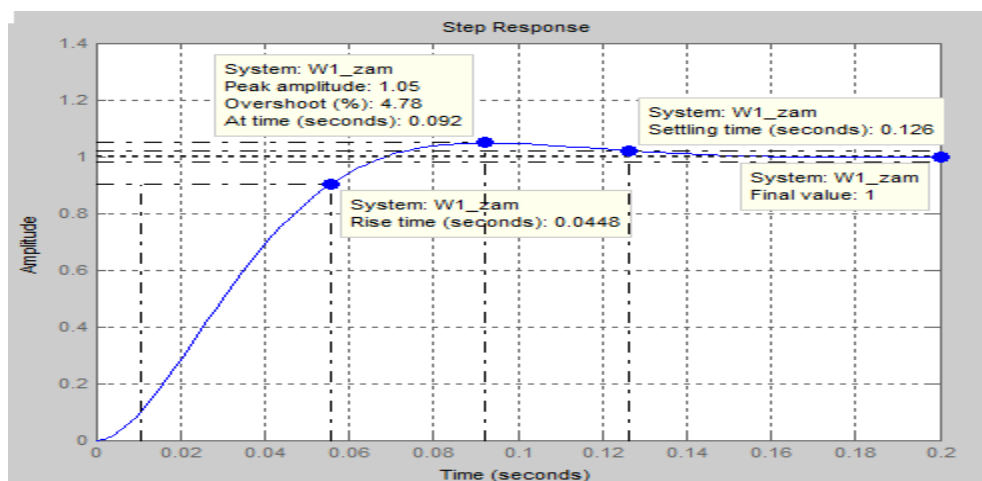


Рисунок 4.1. Переходная характеристика при $T_p = 0$

Пример нумерации формулы в тексте пояснительной записки имеет вид

$$U_{ном} = RI_{ном} + C_e \omega_{ном}, \quad (4.1)$$

где $U_{ном}$ – номинальное напряжение;
 R – сопротивление цепи якоря;
 $I_{ном}$ – номинальный ток;
 $\omega_{ном}$ – номинальная угловая скорость вращения электродвигателя;
 C_e – электромагнитная постоянная.

Литература

1. Анучин А.С. Системы управления электроприводов/ А.С. Анучин: учебник для вузов. – М.: издательский дом МЭИ, 2015. –373 с..
2. Бесекерский В.А. Теория систем автоматического регулирования / В.А. Бесекерский, Е.П. Попов. – СПб.: Профессия, 2003. – 752 с.
3. Белов М.П. Моделирование в электротехнике / М.П. Белов СПб.: Изд-во СПб ГЭТУ «ЛЭТИ», 2014. – 164 с.
4. Дьяконов В.П. MATLAB. Полный самоучитель / В.П. Дьяконов. – М.: ДМК Пресс, 2012. – 768 с.
5. Проектирование мехатронных систем на ПК / С.Г. Герман-Галкин. – СПб.: Корона. Век, 2011. – 368 с.

Варианты заданий к работе № 1

Приложение А
Таблица А1

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

Приложение Б

Технические данные двигателей постоянного тока серии П

$$n_{ном} = 1500 \text{ об/мин}$$

Таблица Б1

№ варианта	Тип двигателя	$U_{ном}, В$	$P_{ном}, кВт$	$I_{ном}, А$	$2p$	$w_{я}$	$r_{я} + r_{дл}, Ом$	$r_{ст}, Ом$	$GD^2, кг \cdot м^2$	$J_{мех}, Нм^2$	k_{red}
1	П-11	110	0,3	4,3	2	826	5,14	0,236	0,001	10	1/50
2		220	0,3	2,06	2	1652	22,6	0,88	0,001		
3	П-12	110	0,45	5,2	2	574	2,97	0,125	0,015	15	1/15
4		220	0,45	2,88	2	1176	11,75	0,25	0,015		
5	П-21	110	0,7	8,9	2	558	1,52	0,063	0,045	20	1/15
6		220	0,7	4,4	2	1188	6,59	0,24	0,045		
7	П-22	110	1,0	11,7	2	414	0,96	0,062	0,055	30	1/15
8		220	1,0	5,9	2	864	4,17	0,25	0,055		
9	П-31	110	1,5	17,4	2	342	0,594	0,026	0,085	35	1/15
10		220	1,5	8,6	2	756	2,455	0,212	0,085		
11	П-32	110	2,2	24,5	2	234	0,285	0,02	0,105	40	1/15
12		220	2,2	12,2	2	468	1,35	0,092	0,105		
13	П-41	110	3,2	36,1	4	243	0,283	0,007	0,15	40	1/15
14		220	3,2	18,0	4	540	1,41	0,033	0,15		
15	П-42	110	4,5	50,6	4	162	0,153	0,0048	0,18	55	1/10
16		220	4,5	25,3	4	351	0,65	0,0392	0,18		
17	П-51	110	6,0	66	4	155	0,1026	0,0044	0,35	60	1/10
18		220	6,0	33	4	372	0,565	0,0073	0,35		
19	П-52	110	8,0	86	4	124	0,0656	0,0022	0,40	65	1/10
20		220	8,0	42,6	4	248	0,298	0,0068	0,40		
21	П-61	220	11	57,3	4	248	0,199	0,006	0,56	80	1/20
22	П-62	220	14	73	4	186	0,1183	0,004	0,65	100	1/20

Параметры модели ДПТ НВ рассчитываются по следующим соотношениям:

$$J_d = GD^2 / 4 - \text{момент инерции якоря, (кгм}^2\text{)}, \text{ где } GD^2 - \text{маховый момент [кгм}^2\text{)];}$$

$$\omega_{ном} = \frac{\pi n_{ном}}{30} = \frac{n_{ном}}{9,55} - \text{номинальное значение угловой скорости вала [рад/с]},$$

где $n_{ном}$ – номинальное значение угловой скорости вращения вала [об/мин];

$$L = 0,6 \frac{U_{ном}}{\omega_{ном} \cdot I_{ном} \cdot p} - \text{индуктивность обмотки якоря [Гн], где } p - \text{число пар по-}$$

люсов;

$$C_e = \frac{U_{ном} - RI_{ном}}{\omega_{ном}} - \text{электромагнитная постоянная [Вс/рад];}$$

$$C_m = \frac{M_{ном}}{I_{ном}} - \text{электрохимическая постоянная [Нм/А]},$$

$$\text{где } M_{ном} = 1000 \frac{P_{ном}}{\omega_{ном}} \frac{[кВт]}{[с^{-1}]}$$

Фрагмент программы анализа САУ

```
% Расчётно-графическое задание №1 фрагмент
% Параметры модели
T1=0.6; T2=1.6; T3=0.9; k1=2; k2=1; k3=3.9;
W1=tf([k1],[T1 1])
W2=tf([k2],[T2 1])
W3=tf([k3],[T3 1])
W=W1*W2*W3
[num,den]=tfdata(W,'v')
a3=den(1)
a2=den(2)
a1=den(3)
a0=den(4)
a0=1+a0
K2=(a1*a2-a3)/(a3*k1*k3)
W2=tf([K2],[T2 1])
Wp=W1*W2*W3
Wz=minreal(Wp/(1+Wp))
[numz,denz]=tfdata(Wz,'v')
figure (1)
step(Wz)
W2=tf([K2/2],[T2 1]) % при k2=K2/2
Wp=W1*W2*W3
Wz=minreal(Wp/(1+Wp))
figure (2)
step(Wz)
```

Программа для расчёта параметров моделей

Скрипт программы DCM_Data_Matrix_Te_Tm

```
% Вычисление матрицы ДПТ и параметров: Te, Tm, kdpt, kdpt_M, T1, T2
clear all; clc; % Очистка памяти и экрана;
global Te Tm kdpt kdpt_M U_nom kred % Объявление глобальных переменных
% Вычисление матрицы ДПТ с независимым возбуждением
% Исходные справочные данные по ДПТ серии П (П22)
n_nom=1500; % Номинальная скорость [об/мин]
U_nom=110; % Номинальное напряжение [в]
P_nom=0.7; % Номинальная мощность {кВт}
I_nom=8.9; % Номинальный ток [А]
p2=2; % Число пар полюсов
R=1.52+0.63; % Суммарное сопротивление якорной цепи [Ом]
GD2=0.055; % Маховый момент [кгм^2]

% Параметры механической части
J_mex =10; % Момент инерции механической нагрузки [Нм^2]
kred=20; % Коэффициент передачи редуктора
kc=0; % Коэффициент трения

%Расчетные параметры матрицы ДПТ
omega_nom=n_nom/9.55; % Номин. скорость [рад/с]
L=0.6*U_nom/(omega_nom*I_nom*p2); % Индуктивность якоря [Гн]
J_d=GD2/4; % Момент инерции якоря двигателя [Нм^2]
J=J_d+ J_mex /kred^2; % Момент инерции, приведенный к валу ДПТ [Нм^2]
M_nom=1000*P_nom/omega_nom; % Номинальный момент [Нм]
Ce=(U_nom-R*I_nom)/omega_nom % Электромагнитная константа
Cm=M_nom/I_nom; % Электромеханическая константа
Mc=kc*omega_nom; % [Нм]
% Выходные параметры (результаты работы программы)
% Параметры передаточных функций ДПТ
Te=L/R % Электромагнитная пост. времени [с]
Tm=R*I/(Ce*Cm) % Электромеханическая пост. времени [с]
kdpt=1/Ce % Коэффициент усиления ДПТ по управлению
kdpt_M=R/(Ce*Cm) % Коэффициент усиления ДПТ по возмущению

%Построение матрицы ДПТ
A=[-R/L -Ce/L 0; Cm/J -kc 0; 0 1 0];
B=[1/L 0; 0 1/J; 0 0];
C=[1 0 0; 0 1 0; 0 0 1];
D=[0 0; 0 0; 0 0];
sys_ss=ss(A,B,C,D); % Модель ДПТ в пространстве состояний
MW=tf(sys_ss)
p=eig(A) % Определение собственных чисел матрицы A
figure(1)
step(sys_ss) % Построение переходной характеристики ДПТ
T1=abs(1/p(3)) % Определение постоянных времени [с]
T2=abs(1/p(2)) % как величин, обратных значениям собственным частот ДПТ Om0 [1/с]

figure(2)
step(MW(2,1))% Первый индекс выход, второй индекс - вход
figure(3)
step(MW(2,2))
disp('Передаточная функция по управлению')
Wu=MW(2,1)
disp('Передаточная функция по возмущению')
Wm=MW(2,2)
```

Контрольные вопросы

1. Сформулируйте основные критерии качества линейных САУ.
2. Виды математических моделей стационарных линейных САУ.
3. Как по дифференциальному уравнению получить передаточную функцию?
4. Функциональные и структурные схемы САУ. Основные правила преобразования структурных схем.
5. Цель и задачи анализа ЛДС.
6. Частотные характеристики и частотные критерии устойчивости. Построение диаграммы Бode для разомкнутой САУ и определение запасов устойчивости для замкнутой.
7. Понятие устойчивости САУ. Необходимое и достаточное условие устойчивости САУ. Анализ устойчивости замкнутой САУ методом определения полюсов ее передаточной функции.
8. Необходимое и достаточное условие устойчивости линейной САУ.
9. Исследование переходных режимов. Переходная характеристика и методы ее построения.
10. Прямые показатели качества САУ и применение *MATLAB* для их определения.
11. Исследование стационарных (установившихся) режимов. Передаточная функция по ошибке. Вычисление статической ошибки.
12. *MATLAB*. Пример программы построения переходной характеристики.
13. *Simulink*. Пример S-модели для построения переходной характеристики.
14. *MATLAB*. Пример построения карты размещения на комплексной плоскости нулей и полюсов передаточной функции.
15. Законы управления. Пропорциональное управление, пропорционально-интегральное управление, пропорционально-интегрально-дифференциальное управление.
16. ПИД регулятор и его место в структуре САУ.
17. Цель и задачи синтеза линейных стационарных САУ.
18. Общий порядок синтеза САУ.
19. Синтез ПИ регулятора из условия технического оптимума.
20. Применение пакета *MATLAB* для синтеза регулятора. Программа синтеза ПИ регулятора и построения переходной характеристики.
21. Применение *Simulink* для синтеза ПИ регулятора.
22. Векторно-матричная модель ДПТ как модель состояния. Пример.
23. Порядок согласования размерности матриц при выборе входов и выходов.
24. Моделирование в системе *Simulink* ДПТ с помощью модели состояния.
25. Исследование устойчивости нелинейной САУ с ограничением выходного сигнала регулятора.