

МИНИСТЕРСТВО НАУКИ И ВЫСШЕГО ОБРАЗОВАНИЯ
РОССИЙСКОЙ ФЕДЕРАЦИИ

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

МОРСКОЙ ИНСТИТУТ

Л.А. Краснодубец, С.А. Конева

ТЕОРИЯ УПРАВЛЕНИЯ СУДОВЫМИ СИСТЕМАМИ

Методические указания
к выполнению курсовой работы

Севастополь
СевГУ
2022

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-р техн. наук, профессор

Краснодубец Л.А.

К782 Теория управления судовыми системами: методические указания к выполнению курсовой работы / Л.А. Краснодубец, С.А. Конева ; Севастопольский государственный университет, Морской институт. – Севастополь: СевГУ, 2022. – 39 с. – Текст : электронный.

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 курсовую работу по дисциплине «Теория управления судовыми системами».

УДК 681.5.01 : 001.891–057.875(076)
ББК 39.965Я73

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 № 8 от 15 марта 2022 г.

ОГЛАВЛЕНИЕ

Введение	4
Техническое задание на курсовую работу.....	4
1. Математическое описание электропривода постоянного тока.....	5
2. Синтез регуляторов для электроприводов.....	20
3. Содержание этапов работ выполнения курсовой работы.....	27
4. Содержание и оформление пояснительной записки	31
Литература.....	33
Приложение А. Варианты заданий.....	34
Приложение Б. Программное обеспечение.....	35
Приложение В. Контрольные вопросы для защиты курсовой работы.....	39

ВВЕДЕНИЕ

Цель курсовой работы (КР), которая выполняется студентами ОФО и ЗФО при изучении дисциплины «Теория управления судовыми системами» в течение 5 семестра обучения, состоит в закреплении практических навыков владения технологией управления на примере компьютерного анализа и синтеза судового электропривода.

В ходе выполнения курсовой 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 системы автоматического управления их заданным значениям.

Для решения задач анализа и синтеза судового электропривода в приложении приводится оригинальное программное обеспечение.

В процессе выполнения КР, 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).

ТЕХНИЧЕСКОЕ ЗАДАНИЕ НА КУРСОВУЮ РАБОТУ

Назначение и область применения: автоматизация управления судовым механизмом (подъёмной лебёдкой или рулевой машиной).

Исходные данные приведены в Приложении А и выбираются в соответствии с вариантом задания. Вид исполнительного судового механизма задаётся преподавателем.

Технические требования к показателям качества переходного процесса в электрической части судового электропривода:

время регулирования – t_p , *время нарастания* – t_r , *перерегулирование* – σ , *статическая ошибка* – δ_{st} должны соответствовать условиям технического оптимума.

Этапы и срок выполнения работы: четыре этапа; окончание за неделю до начала экзаменационной сессии.

Ожидаемые результаты: пояснительная записка, отражающая основные этапы курсовой работы и содержащая математические модели, программы и схемы моделирования, а также результаты моделирования в виде графиков с указанием показателей качества, достигнутых путём введения в структуру электропривода регулятора и расчёта параметров его настройки.

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 автоматическим регулятором, включённым в прямую цепь замкнутого контура системы автоматического управления (САУ) электроприводом.

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.

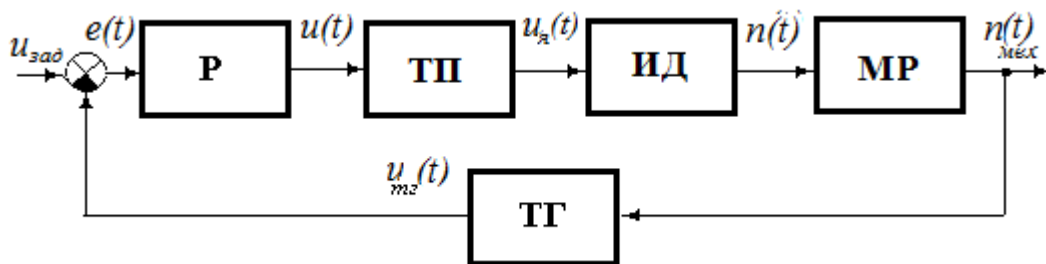


Рисунок 1.1 – Функциональная схема скоростного электропривода с тиристорным преобразователем и механическим редуктором

На рисунке 1.1 приняты следующие обозначения:

Р – регулятор; ТП – тиристорный преобразователь;

ИД – исполнительный двигатель; МР – механический редуктор;

ТГ – тахогенератор (датчик отрицательной обратной связи).

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

ТГ по цепи отрицательной обратной связи замкнутой САУ передаёт на её вход (сумматор) сигнал в виде напряжения о состоянии объекта управления (скорости вращения $n_{\text{мех}}(t)$ рабочего механизма). С другой стороны, на этот же сумматор подаётся задающий сигнал $u_{\text{зад}} = \text{const}$ в виде напряжения, но с положительным знаком. В результате на выходе сумматора формируется в виде напряжения сигнал ошибки управления $e(t)$ (рассогласования). Величина напряжения, соответствующего ошибке управления $e(t)$, определяется в соответствии с уравнением обратной связи

$$e(t) = u_{\text{зад}} - u_{\text{мг}}(t).$$

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 $u_{\text{я}}(t)$ на клеммах якорной цепи исполнительного электродвигателя ИД, необходимое для вращения его ротора, соединённого с входным валом механического редуктора МР, со скоростью $n(t)$. При этом выходной вал редуктора МР будет вращаться со скоростью $n_{\text{мех}}(t)$ вместе с ротором тахогенератора ТГ, выходное напряжение которого $u_{\text{мг}}(t)$ 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 морского судна. Такой электропривод, функциональная схема которого приведена на рисунке 1.2, называют следящим.

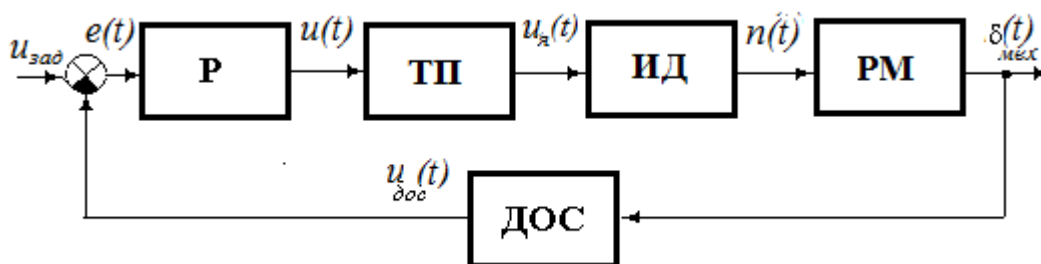


Рисунок 1.2 – Функциональная схема следящего электропривода с тиристорным преобразователем и рулевой машиной

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 вращения $n(t)$ [об/мин] или угловой скорости $\omega(t)$ [рад/с] вала рабочего механизма, соединённого с ротором электродвигателя. В следящем электроприводе сигнал обратной связи пропорционален угловому повороту $\delta(t)$ [рад] вала рабочего механизма или линейному перемещению $l(t)$ [м] при наличии преобразователя вращательного движения в поступательное.

Для скоростного привода задающий сигнал $u_{зад} = const$ и задачей САУ является поддержание режима, когда выходная величина (например, 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 угла или 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 – скорость вращения $n(t)$ вала ротора.

Эквивалентная схема замещения ДПТ НВ изображена на рисунке 1.3.

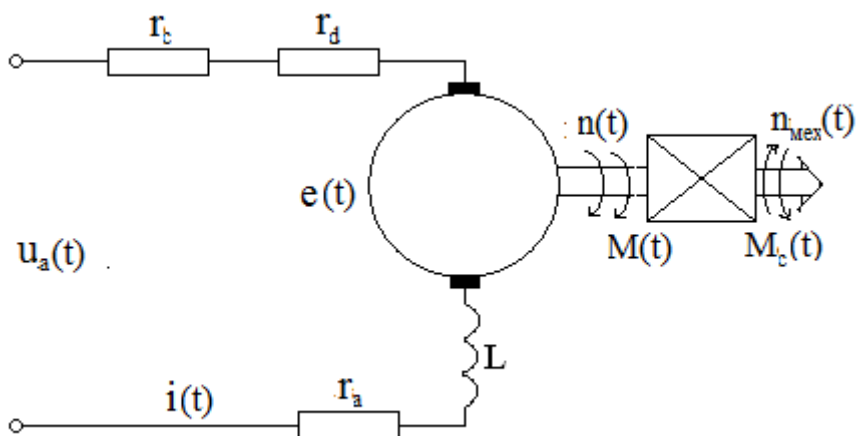


Рисунок 1.3 – Эквивалентная схема замещения ДПТ НВ

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 (электрической части).

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

Далее, учитывая соотношения для противоЭДС и электромеханического момента, вызывающего вращение ротора ДПТ, можно получить математическую модель ДПТ НВ как электромеханической системы в виде следующих уравнений:

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

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

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

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

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, [с⁻¹];

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

L – индуктивность якорной обмотки, [Гн];

$J = J_\partial + J_{mex}^{np}$ – суммарный момент инерции, приведенный к валу двигателя, [кг м²];

$J_{mex}^{np} = J_{mex} * k_{red}^2$ – момент инерции механической нагрузки, приведенный к валу электродвигателя, [кг м²];

J_{mex} – момент инерции рабочего механизма (барабана лебедки), [кг м²];

k_{red} – коэффициент передачи механического редуктора;

C_e – коэффициент пропорциональности для ЭДС двигателя, [Вс];

C_m – коэффициент пропорциональности для момента двигателя, [Нм/А].

При использовании управления по цепи якоря на обмотку возбуждения подается постоянное напряжение U_ϵ , равное напряжению питания $U_{ном}$. 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 в уравнениях (1.1) и (1.2), 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 $U_{ном}$ и тока якорной цепи $I_{ном}$, номинальным значениям мощности $P_{ном}$ и скорости вращения вала двигателя $n_{ном}$ [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 ДПТ НВ как объекта управления, получаются путём обнуления производных в (1.1) – (1.2) и 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

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

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

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 по-

лученным 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

$y_1(t) = i(t)$ – 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 НВ в пространстве состояний, имеют следующие значения:

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

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:

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

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

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.

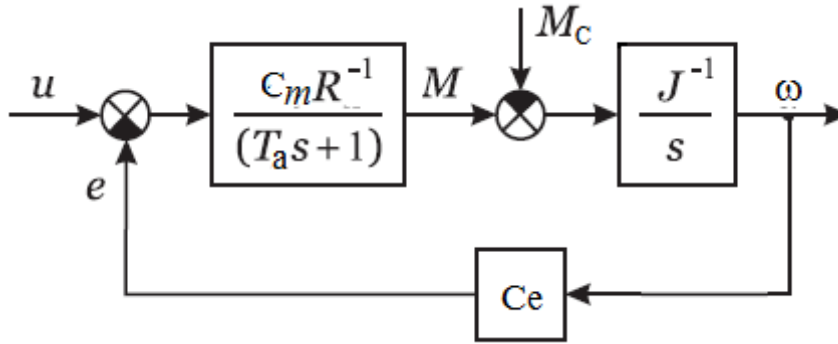


Рисунок 1.4 – Структурная схема как модель ДПТ с НВ с выходом по угловой скорости

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

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

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

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

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

Единое уравнение ДПТ можно переписать в изображениях по Лапласу:

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

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

$$T_{tp} = \frac{1}{2 f m},$$

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 $U_{ном}$ 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 (например, рулевой машиной или лебедкой) используется одноступенчатый механический редуктор с передаточным числом ρ , которое вычисляется по принятой в механике формуле

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

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

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

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

$$\omega_{ном} = n_{ном} / 9,55.$$

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

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

где ρ – передаточное число одноступенчатого механического редуктора.

Угол поворота руля $\delta(t)$ и угловая скорость вращения его баллера $\omega(t)$, как было показано выше, связаны соотношением

$$\delta(t) = \int_0^t \omega(\tau) d\tau$$

или в изображениях по Лапласу

$$\Delta(s) = \frac{1}{s} \Omega(s).$$

В таком случае передаточная функция рулевой машины с редуктором представляется в виде

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

T_{pm} – постоянная времени рулевой машины (определяется по справочным данным для конкретного типа рулевой машины);

k_{red} – коэффициент передачи редуктора.

В случае, если механической нагрузкой электропривода является барабан лебёдки, то пренебрегая моментом его инерции, передаточную функцию лебёдки можно записать в следующем виде:

$$W_l(s) = \Omega_{мех}(s) / \Omega_{ном}(s) = k_{red}.$$

Значение k_{red} механического редуктора лебёдки (или рулевой машины) приведено в таблице А1 Приложения А.

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 лебёдки соответствует линейному безынерционному звену и представляется в виде

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

Передаточная функция датчика углового положения в следящем приводе представляется в виде

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

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 при использовании ПИД регулятора.

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:

$$u(t) = k_i \int_0^t e(\tau) d\tau,$$

где T_i – интегральная постоянная времени И регулятора.

Соответствующая передаточная функция И регулятора имеет вид

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

где k_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

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

где k_p – пропорциональный коэффициент передачи ПИ регулятора;

k_i – интегральный коэффициент передачи 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.

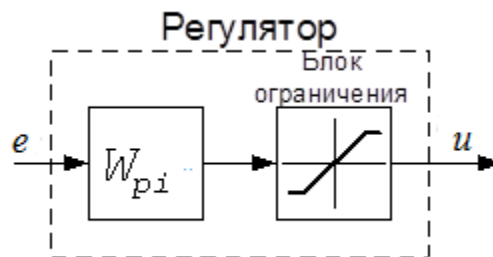


Рисунок 1.5 – Структурная модель ПИ регулятора с ограничением выходного сигнала

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 выбирать 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 выбирать 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 РЕГУЛЯТОРОВ ДЛЯ САУ ЭЛЕКТРОПРИВОДОМ

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 передаточной функцией апериодического звена первого порядка

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

что широко используется при проектировании многоконтурных САУ.

2.2. Общий порядок синтеза регуляторов для САУ электроприводом

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, включая передаточную функцию обратной связи.

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 САУ электроприводом со статическим объектом управления

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_Data_Te_Tm_kdpt_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.

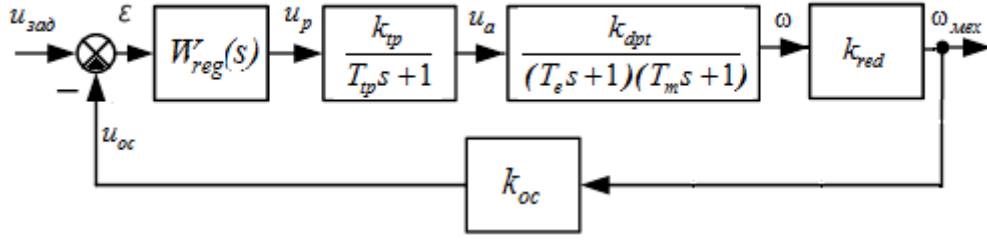


Рисунок 2.1 – Замкнутая САУ скоростным электроприводом со статическим объектом управления

Для синтеза параметров регулятора можно воспользоваться формулой (2.6). При этом в качестве желаемой передаточной функции $W(s)_{жел}^{mo}$ разомкнутой САУ электроприводом, обеспечивающей замкнутому контуру технический оптимум, следует выбрать передаточную функцию (2.1). При вычислении передаточной функции $W(s)_{раз}$ 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 (1.25). Действительно, представляя (2.10) в виде

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

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

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

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

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;

$k_{red} = \frac{\omega_{мех}}{\omega_{ном}}$ – 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_{oc} – 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 САУ электроприводом с астатическим объектом

Структурная схема САУ электроприводом с астатическим объектом (следящим электроприводом) 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 2.1, используется не датчик угловой скорости, а датчик угла поворота δ с коэффициентом передачи k_{doc}

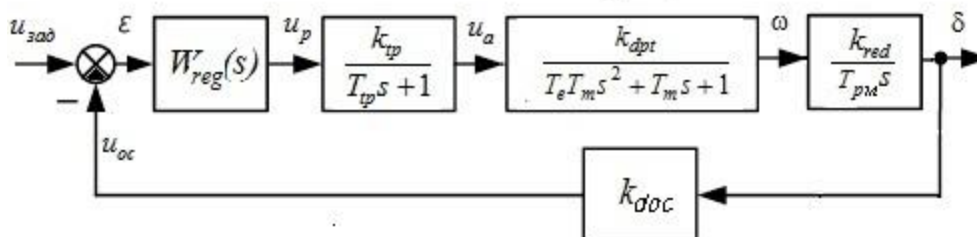


Рисунок 2.2 – Структурная схема следящего электропривода с астатическим объектом и датчиком угла поворота в обратной связи

Динамика такой системы характеризуется постоянными времени T_{tp}, T_e, T_m , а также интегральной постоянной времени $T_{pm}=1c$. 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 следящего электропривода на технический оптимум провести с использованием П регулятора при помощи упрощенной математической модели (структурной схемы).

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

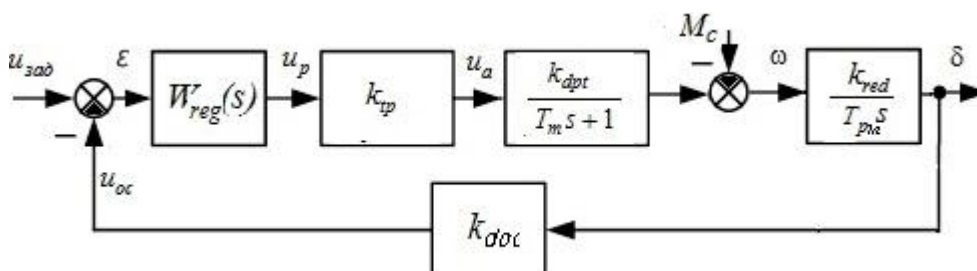


Рисунок 2.3 – Упрощенная схема следящего электропривода с астатическим объектом и датчиком угла поворота в обратной связи

В соответствии с преобразованной структурной схемой, передаточная функция САУ следящим электроприводом 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 (2.6) определяется из выражения:

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

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:

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

Как следует из последнего выражения, передаточная функция синтезированного регулятора соответствует П регулятору с коэффициентом пропорционального 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 (упрощенная) в разомкнутом состоянии в соответствии с рисунком 2.3 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 (2.5) и (2.6) 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:

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

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 следящим 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 КУРСОВОЙ РАБОТЫ

3.1 Разработка математической модели электропривода постоянного тока с ПИ регулятором в виде структурной схемы

Для решения этой задачи следует использовать функциональную схему, приведенную на рисунке 1.1, в соответствии с которой для каждого функционального элемента необходимо определить соответствующие передаточные функции. При этом для вычисления параметров T_e , T_m , k_{dpt} и k_{dpt_M} передаточной функции ДПТ с НВ, входящей в состав структурной схемы электропривода, следует использовать программу DCM_Data_Te_Tm_kdpt_kdpt_M, текст (скрипт) которой приведен в Приложении Б. Исходные данные для этой программы следует выбирать для конкретного типа электродвигателя в соответствии с вариантом задания из справочной Таблицы А1, приведенной в приложении А. Значения параметров k_{tp} , T_{tp} , k_{oc} , k_{red} , необходимых для определения передаточных функций тиристорного преобразователя, датчика обратной связи и редуктора, следует определить по данным, приведенным в п. 1.3 – 1.5, а значения параметров настройки ПИ регулятора k_p и k_i выбираются в зависимости от конкретной задачи анализа. Например, при первичном анализе исходной САУ (без регулятора) следует положить $k_p = 1$ и $k_i = 0$, что будет соответствовать исключению ПИ регулятора из структурной схемы электропривода. При анализе замкнутой САУ электроприводом с ПИ регулятором параметры его настройки k_p и k_i выбираются такими, какими они были получены в результате решения задачи синтеза, исходя из условия технического оптимума.

3.2. Первичный анализ замкнутой САУ электроприводом постоянного тока без ПИ регулятора

3.2.1. Анализ устойчивости замкнутой САУ электроприводом можно выполнить при помощи критерия устойчивости Найквиста. Для решения этой за-

дачи следует использовать математическую модель электропривода в виде структурной схемы, изображённой на рисунке 2.1. По этой схеме можно определить передаточную функцию $W_r(s)$ разомкнутого контура САУ в виде

$$W_r(s) = W_{reg}(s) \times W_{tp}(s) \times W_{dpt}^U(s) \times k_{red} \times k_{oc}. \quad (2.13)$$

С учётом выражений для передаточных функций отдельных звеньев, образующих контур САУ электроприводом, формула (2.13) примет вид

$$W_r(s) = W_{reg}(s) \times \frac{k_{tp}}{(T_{tp}s + 1)} \times \frac{k_{dpt}}{(T_e s + 1)(T_m s + 1)} \times k_{red} \times k_{oc}, \quad (2.14)$$

где $W_{reg}(s) = W_{pi}(s) = k_p + k_i \frac{1}{s}$.

Программный код (скрипт) для вычисления передаточной функции $W_r(s)$ разомкнутой САУ электроприводом в соответствии с (2.13) имеет вид

$$Wr = Wreg * Wtp * Wdtp_U * kred * koc$$

По формуле (2.14) можно построить годограф Найквиста при помощи функции `nyquist(Wr)` и по виду его графика определить устойчива система или нет. При этом для определения запасов устойчивости удобно построить графики ЛАЧХ и ФЧХ (диаграммы Боде) при помощи функции `bode(Wr)`.

3.2.2. Определение показателей качества замкнутой САУ электроприводом без ПИ регулятора выполняется по графику её переходной характеристики. Для построения графика переходной характеристики следует использовать модель САУ электроприводом в виде структурной схемы, построенной в п.3.1, и определить с помощью формул структурных преобразований передаточную функцию замкнутой системы управления $W_z(s)$. При этом соответствующий скрипт командной строки программы для вычисления $W_z(s)$ будет иметь вид

$$Wz = W / (1 + W * koc) \text{ или } Wz = W / (1 + Wr) \text{ или } Wz = \text{feedback}(W, koc),$$

где W соответствует передаточной функции $W(s)$ прямой цепи замкнутого контура САУ с обратной связью k_{oc} . При этом $Wr = W * koc$. По найденной передаточной функции $W_z(s)$ замкнутой САУ электроприводом можно исследовать устойчивость, найдя её полюсы при помощи следующей командной строки

$$s = \text{pole}(Wz) \text{ или } \text{pzmap}(Wz).$$

В последнем случае на экран монитора будет выведена карта размещения полюсов и нулей на комплексной плоскости, что позволит визуально определить устойчивость замкнутой САУ (расположение всех без исключения полюсов в левой полуплоскости).

С помощью передаточной функции замкнутой САУ можно построить график переходной характеристики, используя следующий программный код (скрипт): `step(Wz)`.

В результате выполнения компьютером приведенного кода на экран монитора выводится график переходной характеристики для электропривода без ПИ регулятора, так как передаточная функция $W_z(s)$ замкнутой САУ в ходе первичного анализа вычисляется в соответствии с п. 3.1 при $k_p=1$ и $k_i=0$.

По графику, построенному в п.3.2.2 можно определить следующие прямые показатели качества замкнутой САУ электроприводом с П регулятором:

- время первого установления (нарастания) – *First setting time*;
- время установления – *Setting time*;
- перерегулирование – *Overshoot*;
- установившееся состояние – *Steady state*;
- статическую ошибку – *Static error*.

Первичный анализ замкнутого электропривода можно выполнить с помощью программы `ED_Analysis`, приведенной в приложении Б2.

3.3. Синтез параметров настройки регулятора для САУ электроприводом

3.3.1. Синтез параметров настройки регулятора для САУ электроприводом со статическим объектом управления выполняется в соответствии с рекомендациями, приведенными в п. 2.3, в следующем порядке.

Выполнить синтез ПИ регулятора, определив оптимальные (технический оптимум) настройки его параметров k_p и k_i .

Построить переходную характеристику по управляющему воздействию для замкнутой САУ с найденными в результате синтеза параметрами ПИ регулятора, сначала положив постоянную времени тиристорного преобразователя $T_{\varphi} = 0$, а затем $T_{\varphi} \neq 0$. Определить прямые показатели качества САУ с оптимальными настройками ПИ регулятора. Проверить их соответствие стандарту технического оптимума. Для решения этой задачи рекомендуется использовать программу `PI_Controller_ED`, приведенную в Приложении Б3. Заключительный анализ САУ ЭП с ПИ регулятором и ТП можно выполнить при помощи программы `PI_Controller_Thiristor_ED_Analysis`, помещённой в приложении Б4.

3.3.2. Построение переходной характеристики для замкнутой САУ с оптимальными (технический оптимум) настройками ПИ регулятора и $T_{\varphi} \neq 0$ как реакцию на два воздействия – управляющее и возмущающее. При этом следует использовать среду визуального моделирования *Simulink*. Для этого нужно из-

менить структурную схему, изображенную на рисунке 2.1, путём замены звена, соответствующего ДПТ НВ, структурной схемой, изображённой на рисунке 1.4.

На основе изменённой структурной схемы разработать *S*-модель, при помощи которой в среде *Simulink* построить искомую 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 $M_c = 0,25\text{Нм}$.

Поместить в отчёт разработанную *S*-модель и полученные осциллограммы, при помощи которых определить показатели качества.

Сравнить полученные результаты с результатами п. 3.3.1.

3.3.3. Исследование нелинейной модели электропривода на устойчивость в малом и большом. Для этой цели 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:

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

Результаты проиллюстрировать графиками.

3.3.4. Синтез параметров настройки П регулятора для САУ электроприводом с астатическим объектом управления выполняется в соответствии с рекомендациями, приведенными в п. 2.4.

Выполнить синтез П (пропорционального) регулятора для следящего электропривода (Servo Drive), определив оптимальную (технический оптимум) настройку его параметра k_p .

Построить переходную характеристику по управляющему воздействию для замкнутой САУ следящим электроприводом с найденным в результате синтеза параметром k_p для П регулятора, положив постоянную времени тиристорного преобразователя $T_{\varphi} = 0$. Определить прямые показатели качества САУ следящим электроприводом с оптимальной настройкой П регулятора. Для решения этой задачи написать скрипт программы и поместить его в *m*-файл.

3.3.5. Синтез параметров настройки ПИ регулятора для САУ электроприводом с астатическим объектом управления.

В соответствии с рекомендациями, приведенными в п. 2.4, выполнить синтез ПИ регулятора для следящего электропривода, определив оптимальные (симметричный оптимум) настройки его параметров k_p и k_i . Построить переходную характеристику по управляющему воздействию для замкнутой САУ следящим электроприводом с найденными в результате синтеза параметрами ПИ регулятора, положив постоянную времени тиристорного преобразователя $T_{\varphi} = 0$. Определить прямые показатели качества САУ следящим электроприводом с оптимальными (симметричный оптимум) настройками ПИ регулятора. Проверить их соответствие стандарту симметричного оптимума.

Для решения этой задачи написать скрипт программы и поместить его в m-файл.

По результатам каждого этапа сделать выводы и сформулировать общее **заключение** как раздел пояснительной записки (на одном листе).

Примечание: п. 3.3.4 и п. 3.3.5 выполняются студентами, претендующими на оценку А (90 и выше баллов).

4. СОДЕРЖАНИЕ И ОФОРМЛЕНИЕ ПОЯСНИТЕЛЬНОЙ ЗАПИСКИ

4.1. Общие требования

При оформлении пояснительной записки к КР по дисциплине «Теория управления судовыми системами» необходимо соблюдать существующие требования ГОСТов на оформление текстовой документации, обращая особое внимание на правила рубрикации, оформление формул, рисунков, таблиц, ссылок на формулы 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, например, Math Type или 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 должна иметь следующую структуру.

Титульный лист (1-й лист).

Содержание (2-й лист).

Техническое задание, включая исходные данные, которые необходимы для расчета параметров настройки регулятора САУ электроприводом (на бланке установленной формы).

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 и применение её для первичного анализа замкнутой САУ без ПИ регулятора. При этом используется описание математических моделей функциональных элементов как звеньев системы управ-

ления в виде передаточных функций и на этой основе формируется структурная схема системы управления электроприводом лебёдки или электропривода рулевого устройства. Для первичного анализа исходной САУ (без ПИ регулятора) рекомендуется использовать программу ED_Analysis, приведенную в приложении Б2.

Раздел 3. Синтез регулятора для электропривода. Расчет оптимальной (технический оптимум) настройки параметров ПИ регулятора для электропривода со статическим объектом управления как системы стабилизации скорости – *Electric Drive (ED)*. Расчёт оптимальной (симметричный оптимум) настройки ПИ регулятора для электропривода с астатическим объектом управления как следящего электропривода – *Servo Drive (SD)*. Определение показателей качества замкнутых систем управления электроприводом. Анализ результатов моделирования, включая графики переходных характеристик по управляющему и возмущающему воздействиям. Анализ устойчивости в малом и большом нелинейной модели управляемого электропривода. Выбор и порядок применения программного обеспечения для анализа и синтеза судового электропривода.

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 написания и нумерации формулы в тексте пояснительной записки имеет следующий 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 в цепи якоря;

$\omega_{ном}$ – номинальная угловая скорость электродвигателя;

C_e – электромагнитная постоянная.

Пример оформления графика приведен на рисунке 4.1.

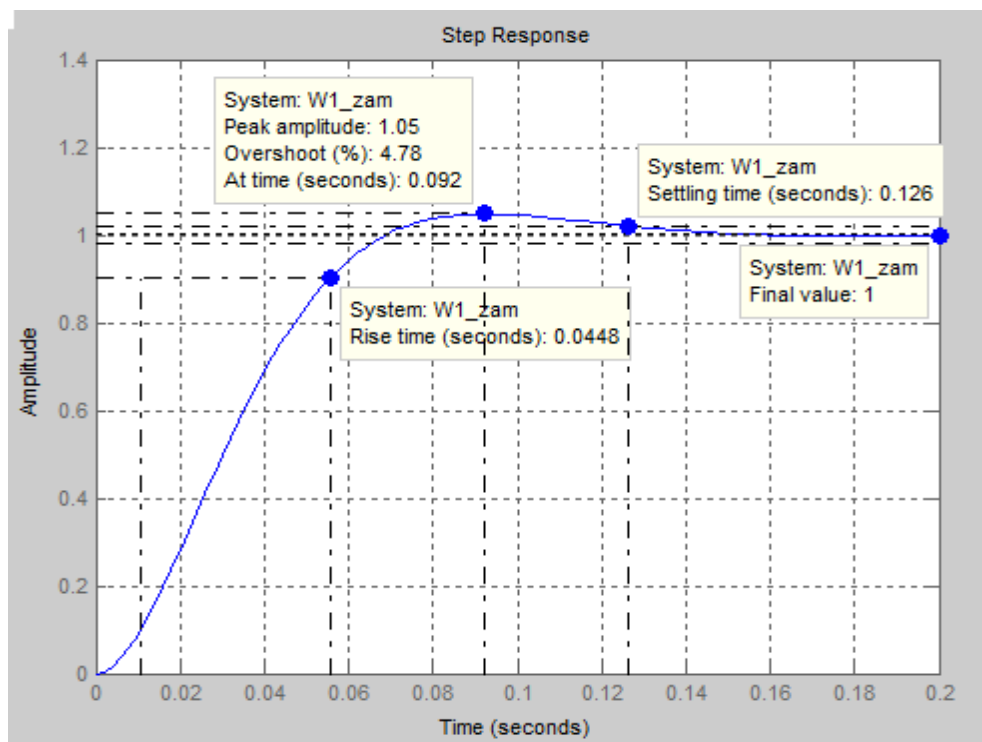


Рисунок 4.1 – Переходная характеристика скоростного электропривода

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.
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.

Приложение А

Технические данные двигателей постоянного тока серии П

$$n_{ном} = 1500 \text{ об/мин}$$

Таблица А1

№ варианта	Тип двигателя	$U_{ном}, В$	$P_{ном}, кВт$	$I_{ном}, А$	$2p$	$w_{я}$	$r_{я}+r_{дп}, Ом$	$r_{ст}, Ом$	$GD^2, кг*М^2$	$J_{мех}, НМ^2$	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

ПРОГРАММНОЕ ОБЕСПЕЧЕНИЕ

Б.1. Скрипт программы DCM_Mech_Data_Te_Tm_kdpt_kdpt_M, предназначенной для вычисления коэффициентов передаточных функций ДПТ НВ, соединённого с рабочим механизмом, и построения его переходной характеристики

```
% Program DCM_Mech_Data_Te_Tm_kdpt_kdpt_M_
% Вычисление Te,Tm,kdpt,kdpt_M для ДПТ с раб. механизмом
clear all; clc;% Очистка памяти и экрана;
% Исходные справочные данные по ДПТ НВ 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 ДПТ
R=1.52+0.63;% Суммарное сопротивление якорной цепи [Ом]
GD2=0.055 ; % Маховый момент ДПТ[кгм^2]

% Параметры механической части
J_mex =10;   % Момент инерции рабочего механизма[Нм^2]
kred=1/20;   % Коэффициент передачи редуктора

%Расчетные параметры моделей ДПТ с раб. механизмом
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 ДПТ [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 ДПТ[Нм]
Ce=(U_nom-R*I_nom)/omega_nom % Электромагнитная константа
Cm=M_nom/I_nom              % Электромеханическая константа

% Результаты работы программы
% Параметры передаточных функций ДПТ с рабочим механизмом
Te=L/R          % Электромагнитная постоянная времени [с]
Tm=R*J/(Ce*Cm)% Электромеханическая постоянная времени [с]
kdpt=1/Ce       % Коэффициент усиления ДПТ по управлению
kdpt_M=R/(Ce*Cm) % Коэффициент усиления ДПТ по возмущению
%Построение передаточных функций ДПТ с даб. механизмом
Wdpt_u=tf([kdpt],[Te*Tm Tm 1])% ПФ ДПТ по управлению
Wdpt_M=tf([kdpt_M*Te kdpt_M],[Te*Tm Tm 1])% ПФ ДПТ по возму-
щению
% Построение переходной характеристики ДПТ с раб. механизмом
figure (1)
step(Wdpt_u)
```

Б2. Листинг программы ED_Analysis для анализа замкнутой САУ ЭП без ПИ регулятора с тиристорным преобразователем, редуктором, статическим объектом управления (ДПТ НВ) и тахогенератором в цепи обратной связи по данным, полученным с помощью Программы Б1.

```
% Программа ED_Analysis
% Первичный анализ замкнутой САУ ЭП с тиристорным преобразователем
%Исходные данные:результаты программы Б1, справочные параметры ТП
clear all; clc;% Очистка памяти и экрана;
% Исходные данные
%Параметры передаточной функции ДПТ с рабочим механизмом
Te=0.011; Tm=0.2876; kdpt=1.7286; kdpt_M=7.4218;
kred=1/20; % Коэффициент передачи редуктора
koc=1; % Коэффициент обратной связи (тахогенератора) [Вс]
U_nom = 110%Номинальное напряжение на клеммах якорной цепи ДПТ [В]
% Параметры тиристорного преобразователя - ТП
U_in =10; % Напряжение на входе ТП [В]
f = 50; % частота напряжения промышленной сети [Гц]
m = 6; %коэффициент пульсаций схемы
ktp= U_nom/U_in % Коэффициент передачи ТП
Ttp=1/(2*f*m) % Постоянная времени тиристорного преобразователя
ТП [с]
wtp=tf([ktp],[Ttp 1]) %Передаточная функция ТП
wdpt=tf([kdpt],[Te*Tm Tm 1])% Передаточная функция ДПТ НВ

% Построение передаточной функции прямой цепи САУ ЭП
W=minreal(wtp*wdpt*kred)

%Построение передаточной функции разомкнутой САУ ЭП

Wr = W*koc %Передаточная функция разомкнутой САУ ЭП с ТП

%ПФ замкнутой САУ ЭП с ТП, редуктором, ТГ без ПИ регулятора
%Wz=feedback(W, koc)
Wz=minreal(W/(1+W*koc))

% Анализ САУ ЭП без ПИ регулятора с ТП, ДПТ, ред-ром, тахогенер.
%Исследование устойчивости замкнутой САУ ЭП без ПИ регулятора
figure (1)
nyquist(Wr)
figure (2)
bode(Wr) %Построение ЛАЧХ и ФЧХ для запасов устойчивости
figure(3)
pzmap(Wz) % Вывод карты распределения полюсов и нулей САУ ЭП
p=pole(Wz) % Вычисление полюсов замкнутой САУ ЭП с ТП без ПИ рег.

% Переходная характеристики САУ ЭП с ТП без ПИ регулятора
figure(4)
step(Wz); grid on;
```

Б.3. Скрипт программы PI_Controller_ED, предназначенной для расчёта параметров k_p и k_i настройки ПИ регулятора для статического объекта, соединённого с рабочим механизмом, и построения переходной характеристики САУ ЭП

Программа PI_Controller_ED

```
% Синтез ПИ регулятора для САУ ЭП по параметрам Te, Tm, kdpt, kred, koc
% Технический оптимум без учета постоянной Ttp ТП
clear all; clc;% Очистка памяти и экрана;
% Исходные данные
%Параметры передаточной функции ДПТ с рабочим механизмом
Te=0.011; Tm=0.2876; kdpt=1.7286; kdpt_M=7.4218;
% Ввод других системные параметров
koc=1;% Коэффициент обратной связи электропривода
U_nom =110; %Номинальное напряжение [в]
Utp = 10; %Напряжение на входе тиристорного пр-ля
ktp = U_nom/Utp% Коэффициент передачи тиристорного преобразователя
kred=1/20; % Коэффициент передачи редуктора
% Вычисление параметров ПИ регулятора
kp=Tm/(2*Te*ktp*kdpt*kred*koc)
ki=kp/Tm

% Построение передаточной функции ПИ регулятора W_PI
wp=zpk([],[],kp)
wi=zpk([],[],ki)
W_PI=minreal(wp+wi)
% Построение передаточной функции ДПТ по управлению Wdpt_u
wdpt_u=tf([kdpt],[Te*Tm Tm 1])
% Построение передаточной функции прямой цепи САУ ЭП
W=minreal(W_PI* ktp *wdpt_u*kred)
%Построение передаточной функции замкнутой САУ ЭП
W_zam=feedback(W,koc)
% W_zam=minreal(W/(1+W*koc))

% Построение переходной характеристики замкнутой САУ ЭП
figure (1)
step(W_zam, 15*Te)
display('Числовые значения параметров настройки ПИ регулятора')
kp
ki
display('Прогнозируемые показатели качества замкнутой САУ ЭП')
tp= 8.4*Te % Время регулирования (установления)[с]
tr= 4.71*Te*0.9 % Время нарастания [с]
Sigma = 4.3 % Перерегулирование [%]
delta_st = 0 % Статическая ошибка
```

Б4. Листинг программы `PI_Controller_Thiristor_ED_Analysis` для синтеза и анализа замкнутой САУ ЭП с ПИ регулятором, тиристорным преобразователем, редуктором, статическим объектом управления (ДПТ НВ) и тахогенератором в цепи обратной связи по данным, полученным с помощью Программы Б1.

```
% Программа    PI_Controller_Thiristor_ED_Analysis
% Синтез ПИ регулятора для САУ ЭП %Технический оптимум
% Анализ замкнутой САУ ЭП с учетом тиристорного преобразователя
%Исходные данные:результаты программы Б1, справочные параметры ТП
clear all; clc;% Очистка памяти и экрана;
% Исходные данные
%Параметры передаточной функции ДПТ с рабочим механизмом
Te=0.011; Tm=0.2876; kdpt=1.7286; kdpt_M=7.4218;
kred=1/20; % Коэффициент передачи редуктора
koc=1;      % Коэффициент обратной связи 'электропривода (тахогенератора) [Вс]
U_nom = 110;%Номинальное напряжение на клеммах якорной цепи ДПТ [В]
% Параметры тиристорного преобразователя - ТП
U_in =10;      % Напряжение на входе ТП [В]
f = 50;        % частота напряжения промышленной
сети [Гц]
m = 6;         %коэффициент пульсаций схемы
ktp= U_nom /U_in; % Коэффициент передачи тиристорного преоб-
разователя
Ttp=1/(2*f*m); % Постоянная времени тиристорного преоб-
разователя ТП [с]
wtp=tf([ktp], [Ttp 1]); %Передаточная функция тиристорного преоб-
разователя
wdpt=tf([kdpt],[Te*Tm Tm 1])% Передаточная функция ДПТ НВ
% Вычисление параметров настройки ПИ регулятора
kp=Tm/(2*Te*kdpt*ktp*kred*koc)
ki=kp/Tm
% Построение передаточной функции ПИ регулятора
wp=zpk([],[],kp)
wi=zpk([], [0],ki)
W_PI=minreal(Wp+Wi)
% Построение передаточной функции прямой цепи САУ ЭП
W=minreal(W_PI*wdpt*wtp*kred)
%Построение передаточной функции замкнутой САУ ЭП
W_zam=feedback(W, koc)
% Анализ замкнутой САУ ЭП с ПИ регулятором и ТП
% Построение переходной характеристики САУ ЭП с учётом ТП
figure (1)
step(W_zam, 15*Te); grid on;
%Построение диаграммы Боде для определения запасов устойчивости
W_raz=W*koc %Передаточная функция разомкнутой САУ ЭП с учётом ТП
figure(2)
bode(W_raz) % Вывод графиков ЛАЧХ и ФЧХ разомкнутой САУ ЭП
p=pole(W_zam) % Вычисление полюсов замкнутой САУ ЭП с ТП
figure(3)
pzmap(W_zam %Вывод карты полюсов и нулей замкнутой САУ ЭП с ТП
```

Контрольные вопросы для защиты курсовой работы

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. Необходимое и достаточное условие устойчивости линейной САУ.
7. Исследование переходных режимов. Переходная характеристика и методы ее построения.
8. Прямые показатели качества САУ и применение *MATLAB* для их определения.
9. Исследование стационарных (установившихся) режимов. Передаточная функция по ошибке. Вычисление статической ошибки.
10. *MATLAB*. Пример программы построения переходной характеристики.
11. *Simulink*. Пример *S*-модели для построения переходной характеристики.
12. *MATLAB*. Пример построения карты размещения на комплексной плоскости нулей и полюсов передаточной функции.
13. Законы управления. Пропорциональное управление. Пропорционально-интегральное управление, пропорционально-интегрально-дифференциальное управление.
14. ПИД регулятор и его место в структуре САУ.
15. Цель и задачи синтеза линейных стационарных САУ.
16. Общий порядок синтеза САУ.
17. Синтез ПИ регулятора из условия технического оптимума.
18. Применение пакета *MATLAB* для синтеза регулятора. Программа синтеза ПИ регулятора и построения переходной характеристики.
19. Применение *Simulink* для синтеза ПИ регулятора.
20. Векторно-матричная модель ДПТ как модель состояния. Пример.
21. Порядок согласования размерности матриц при выборе входов и выходов.
22. Моделирование в системе *Simulink* ДПТ с помощью модели состояния.
23. Исследование устойчивости нелинейной САУ с ограничением выходного сигнала регулятора. Устойчивость в малом и в большом.
24. В чём отличие статической системы от астатической? Как определяется порядок астатизма? Как влияет на показатели качества статической САУ введение в её структуру астатического звена?
25. Порядок синтеза регулятора для электропривода с астатическим объектом.

**Краснодубец Леонид Андреевич
Конева Светлана Андреевна**

ТЕОРИЯ УПРАВЛЕНИЯ СУДОВЫМИ СИСТЕМАМИ

*Методические указания
к выполнению курсовой работы*

В авторской редакции

Изд. № 94/2022. Объем 2,5 п.л. Усл. печ. л. 2,32. Уч.-изд. л. 2,45.
РИИЦМ ФГАОУ ВО «Севастопольский государственный университет»