

**МИНИСТЕРСТВО НАУКИ И ВЫСШЕГО ОБРАЗОВАНИЯ
РОССИЙСКОЙ ФЕДЕРАЦИИ**

**Федеральное государственное бюджетное
образовательное учреждение высшего образования
«КАЗАНСКИЙ ГОСУДАРСТВЕННЫЙ ЭНЕРГЕТИЧЕСКИЙ УНИВЕРСИТЕТ»**

**ИССЛЕДОВАНИЕ И МОДЕЛИРОВАНИЕ КОНТУРА СКОРОСТИ
ЭЛЕКТРОПРИВОДА С ДВИГАТЕЛЕМ ПОСТОЯННОГО ТОКА**

Учебно-методические пособие

Казань

2024

УДК 681.51

ББК 32.965.8

С40

Исследование и моделирование контура скорости электропривода с двигателем постоянного тока: учебно-методическое пособие / составители: О.В. Козелков, Н.А.Малев, А.И. Мухаметшин – Казань : КГЭУ, 2024. – 46 с.

Изложены методические указания по выполнению курсового проекта по дисциплине «Цифровые системы управления в мехатронике», которые определяют общие требования, предъявляемые к курсовому проекту, последовательность его подготовки и выполнения, а также требования к структуре, содержанию и оформлению пояснительной записки. Курсовой проект посвящен исследованию и моделированию контура скорости электропривода с двигателем постоянного тока, синтезу регулятора скорости. Предназначено для обучающихся по образовательной программе направления подготовки 15.03.06 Мехатроника и робототехника, направленность (профиль) «Мехатроника».

УДК 681.51

ББК 32.965.8

*Рекомендовано к изданию учебно-методическим советом
Института цифровых технологий и экономики*

© Козелков О.В., Малев Н.А., Мухаметшин А.И., составление, 2024

© КГЭУ, 2024

ВВЕДЕНИЕ

Процесс обучения по дисциплине «Цифровые системы управления в мехатронике» в соответствии с государственным образовательным стандартом предполагает формирование у студентов способности к пониманию и оформлению элементов технической документации узлов мехатронных систем.

Изучение дисциплины направлено на формирование следующих компетенций:

ОПК-11 Способен разрабатывать и применять алгоритмы и современные цифровые программные методы расчетов и проектирования отдельных устройств и подсистем мехатронных и робототехнических систем с использованием стандартных исполнительных и управляющих устройств, средств автоматики, измерительной и вычислительной техники в соответствии с техническим заданием, разрабатывать цифровые алгоритмы и программы управления робототехнических систем.

Курсовая проект ориентирована на формирование у выпускников следующих индикаторов компетенций:

ОПК-11.1 Разрабатывает алгоритмы и программы для цифровых методов расчетов стандартных исполнительных и управляющих устройств мехатронных и робототехнических систем;

ОПК-11.2 Разрабатывает алгоритмы и программы для цифровых методов расчетов средств автоматики и средств измерительной и вычислительной техники мехатронных и робототехнических систем;

ОПК-11.3 Разрабатывает цифровые алгоритмы и программы управления робототехнических систем.

1. ЗАДАНИЕ НА КУРСОВОЙ ПРОЕКТ

Курсовой проект посвящен исследованию и моделированию контура скорости электропривода с двигателем постоянного тока, синтезу регулятора скорости. Задание на курсовой проект включает в себя: систему исходных данных, согласно которой производятся расчеты и моделирование.

Таблица 1.

Вариант	U_3^0	$K_{тп}$	$K_{ос}$	c	R	i	η	$K_{дв}$	M_c^0
1	10	11	0,127	1,22	0,9	69	0,9 2	0,8 18	195
2	10	14	0,128	1,33	0,8	70	0,8 8	0,8 8	196
3	10	25	0,156	1,5	0,8	10 5	0,9	0,8 81	200
4	20	10	0,176	1,6	0,7	84	0,8 9	0,9 01	205
5	20	15	0,156	1,7	0,6	45	0,8 7	0,9 25	210

Полная таблица с вариантами исходных данные приведена в приложении.

В данном пособии содержится теоретическое описание процесса расчетов и моделирования, а также конкретные примеры расчета. Студент должен предварительно изучив теоретическую часть, выполнить расчеты по приведенным примерам. Система исходных данных выбирается по варианту, номер варианта определяется либо по номеру студента в списке группы, либо преподавателем.

Отчет по курсовому проекту должен содержать следующие разделы:

- Систему исходных данных;
- Моделирование нескорректированного контура скорости. Расчет установившихся ошибок;
- Синтез регулятора скорости для настройки контура скорости на

оптимум по модулю;

- Моделирование скорректированного контура скорости. Расчет ошибок;
- Сравнение показателей без регулятора и с регулятором;
- Вывод по полученным результатам.

2. ОРГАНИЗАЦИЯ РАБОТЫ НАД КУРСОВЫМ ПРОЕКТОМ

При выдаче задания на курсовой проект консультант формулирует тему проекта, исходные данные, рекомендует необходимую литературу. При необходимости консультант проводит вводную консультацию, во время которой детализирует содержание пояснительной записки и устанавливает график выполнения проекта с указанием времени на выполнение основных этапов проекта. Консультации по курсовому проекту проводятся еженедельно.

3. ИССЛЕДОВАНИЕ НЕСКОРРЕКТИРОВАННОГО КОНТУРА СКОРОСТИ. РАСЧЕТ УСТАНОВИВШИХСЯ ОШИБОК.

На рис. 2.1 показана ССДМ нескорректированного контура скорости, содержащего: тиристорный преобразователь, двигатель, тахогенератор с фильтром нижних частот и редуктором q_2 , суммирующий усилитель.

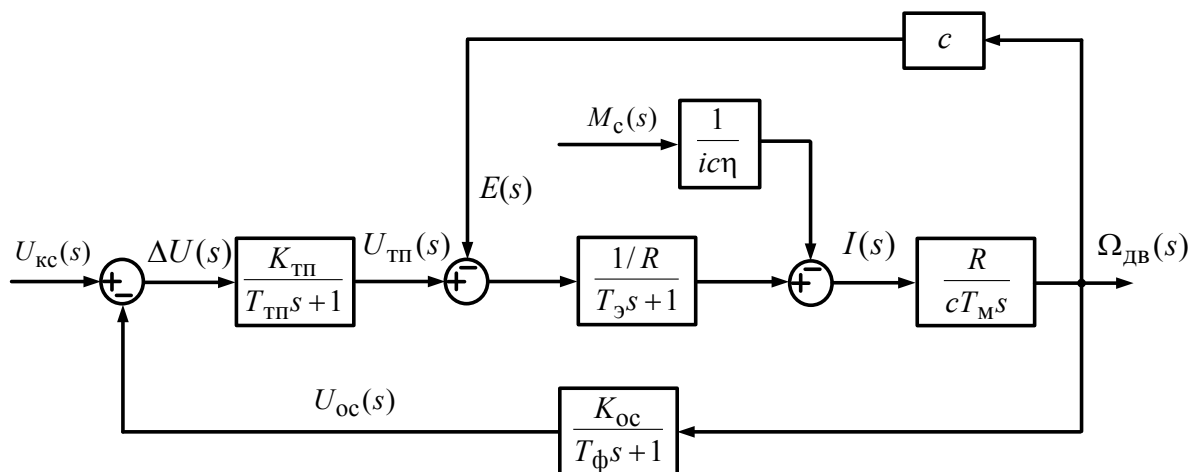


Рис. 2.1. Структурная схема динамической модели нескорректированного контура скорости

Из теории электропривода известно, что нескорректированный контур скорости обладает худшими качественными характеристиками в отличие от системы с регулятором.

Кроме показателей качества переходного процесса самым главным, в конечном итоге, является точность работы системы, которая оценивается на основании теоремы о конечном значении [7, 9].

Для рассматриваемого контура скорости (см. рис. 2.1) установившаяся ошибка определяется с помощью выражения:

$$\Delta u_{уст}(t) = \lim_{t \rightarrow \infty} \Delta u(t) = \lim_{s \rightarrow 0} s \Delta U(s).$$

Для линейных систем применяется принцип суперпозиции, на основании которого суммируются составляющие изображений ошибок:

$$\Delta U(s) = \Delta U_u(s) + \Delta U_{M_c}(s),$$

где $\Delta U_u(s)$ – изображение ошибки относительно задающего воздействия;
 $\Delta U_{M_c}(s)$ – изображение ошибки относительно возмущающего воздействия
(моментная составляющая ошибки).

Тогда на основании теоремы о конечном значении:

$$\Delta u_{уст} = \lim_{s \rightarrow 0} s \Delta U_u(s) + \lim_{s \rightarrow 0} s \Delta U_{M_c}(s).$$

Так как

$$\Delta U_u(s) = \Phi_{\Delta}^u(s) U_3(s)$$

и

$$\Delta U_{M_c}(s) = \Phi_{\Delta}^{M_c}(s) M_c(s),$$

то

$$\Delta u_{уст} = \lim_{s \rightarrow 0} s \Phi_{\Delta}^u(s) U_3(s) + \lim_{s \rightarrow 0} s \Phi_{\Delta}^{M_c}(s) M_c(s),$$

где $\Phi_{\Delta}^u(s)$ – передаточная функция замкнутой системы относительно ошибки по задающему воздействию; $\Phi_{\Delta}^{M_c}(s)$ – передаточная функция замкнутой системы относительно ошибки по возмущающему воздействию.

Изображение по Лапласу для ступенчатых входных воздействий:

$$U_3(s) = \frac{U_3^0}{s} \text{ и } M_c(s) = \frac{M_c^0}{s},$$

где U_3^0 и M_c^0 – постоянные величины.

С учетом приведенных выражений получим расчетную формулу для установившейся ошибки:

$$\Delta u_{уст} = \lim_{s \rightarrow 0} s \frac{1}{1+W(s)} \frac{U_3^0}{s} + \lim_{s \rightarrow 0} s \frac{W_{M_c}(s) W_{дв}(s) W_{ос}(s)}{1+W(s)} \frac{M_c^0}{s},$$

где

$$\Phi_{\Delta}^u(s) = \frac{1}{1+W(s)}; \Phi_{\Delta}^{M_c}(s) = \frac{W_{M_c}(s)W_{дв}(s)W_{oc}(s)}{1+W(s)}.$$

Здесь $W(s) = W_{дв}(s)W_{тп}(s)W_{дс}(s)$ – передаточная функция разомкнутой системы; $W_{M_c}(s) = \frac{R(T_{\text{э}}s + 1)}{ic\eta}$ – передаточная функция по цепи воздействия момента сопротивления; $W_{дв}(s)$ – передаточная функция двигателя.

Поскольку

$$W(s) = \frac{1/c}{T_{\text{э}}T_{\text{м}}s^2 + T_{\text{м}}s + 1} \frac{K_{\text{тп}}}{T_{\text{тп}}s + 1} \frac{K_{\text{oc}}}{T_{\text{ф}}s + 1},$$

То

$$\begin{aligned} \Phi_{\Delta}^u(s) &= \frac{1}{1 + \frac{K_{\text{тп}}K_{\text{oc}}/c}{(T_{\text{э}}T_{\text{м}}s^2 + T_{\text{м}}s + 1)(T_{\text{тп}}s + 1)(T_{\text{oc}}s + 1)}} = \\ &= \frac{(T_{\text{э}}T_{\text{м}}s^2 + T_{\text{м}}s + 1)(T_{\text{тп}}s + 1)(T_{\text{oc}}s + 1)}{(T_{\text{э}}T_{\text{м}}s^2 + T_{\text{м}}s + 1)(T_{\text{тп}}s + 1)(T_{\text{oc}}s + 1) + K_{\text{тп}}K_{\text{oc}}/c}. \end{aligned}$$

Установившаяся ошибка относительно задающего воздействия:

$$\Delta u_{\text{уст}}^u = \lim_{s \rightarrow 0} s \Phi_{\Delta}^u(s) \frac{U_3^0}{s} = \frac{U_3^0}{1 + \frac{K_{\text{тп}}K_{\text{oc}}}{c}}. \quad (2.1)$$

Передаточная функция:

$$\begin{aligned} \Phi_{\Delta}^{M_c}(s) &= \frac{W_{M_c}(s)W_{дв}(s)W_{oc}(s)}{1+W(s)} = \\ &= \frac{\frac{R(T_{\text{э}}s + 1)}{ic\eta} \frac{K_{дв}}{T_{\text{э}}T_{\text{м}}s^2 + T_{\text{м}}s + 1} \frac{K_{\text{oc}}}{T_{\text{ф}}s + 1}}{1 + \frac{K_{дв}K_{\text{тп}}K_{\text{oc}}}{(T_{\text{э}}T_{\text{м}}s^2 + T_{\text{м}}s + 1)(T_{\text{тп}}s + 1)(T_{\text{ф}}s + 1)}} = \\ &= \frac{R(T_{\text{э}}s + 1)(T_{\text{тп}}s + 1)K_{дв}K_{\text{oc}}/ci\eta}{(T_{\text{э}}T_{\text{м}}s^2 + T_{\text{м}}s + 1)(T_{\text{тп}}s + 1)(T_{\text{ф}}s + 1) + K_{дв}K_{\text{тп}}K_{\text{oc}}}, \end{aligned}$$

где $K_{дв} = 1/c$ – коэффициент передачи двигателя.

Установившаяся ошибка относительно момента сопротивления:

$$\Delta u_{уст}^{M_c} = \lim_{s \rightarrow 0} s \Phi_{\Delta}^{M_c}(s) \frac{M_c^0}{s} = \frac{RK_{дв}K_{ос}M_c^0}{ci\eta(K_{дв}K_{тп}K_{ос} + 1)}. \quad (2.2)$$

ПРИМЕР 1 ($T_M > 4T_3$). Определить суммарную установившуюся ошибку электропривода с двигателем типа 2ПБ132МУХЛ4. Значения параметров принимаем по примерам 1.1а, 1.2а, 1.3а: $U_3^0 = 10$ В; $K_{тп} = 11$; $K_{ос} = 0,127$ В·с/рад; $c = 1,222$ В·с/рад; $R = 0,9$ Ом; $i = 69$; $\eta = 0,92$; $K_{дв} = 0,818$ рад/В·с; $M_c^0 = 195$ Н·м.

Решение. 1. Определяем установившуюся ошибку относительно задающего воздействия по формуле (2.1):

$$\Delta u_{уст}^u = \frac{U_3^0}{1 + \frac{K_{тп}K_{ос}}{c}} = \frac{10}{1 + \frac{11 \cdot 0,127}{1,222}} = 4,67 \text{ В.}$$

2. Определяем установившуюся ошибку относительно момента сопротивления по формуле (2.2):

$$\begin{aligned} \Delta u_{уст}^{M_c} &= \frac{RK_{дв}K_{ос}M_c^0}{ci\eta(K_{дв}K_{тп}K_{ос} + 1)} = \\ &= \frac{0,9 \cdot 0,818 \cdot 0,127 \cdot 195}{1,222 \cdot 69 \cdot 0,92(0,818 \cdot 11 \cdot 0,127 + 1)} = 0,11 \text{ В.} \end{aligned}$$

3. Определяем суммарную установившуюся ошибку электропривода с двигателем типа 2ПБ132МУХЛ4:

$$\Delta u_{уст} = \Delta u_{уст}^u + \Delta u_{уст}^{M_c} = 4,67 + 0,11 = 4,78 \text{ В.}$$

3.1. МОДЕЛИРОВАНИЕ НЕСКОРРЕКТИРОВАННОГО КОНТУРА СКОРОСТИ

Применение программы MatLab для моделирования

Система Simulink запускается из системы Matlab путем выбора указателем мыши пиктограммы Simulink (8-я слева) на панели инструментов системы Matlab (рис. 2.2).

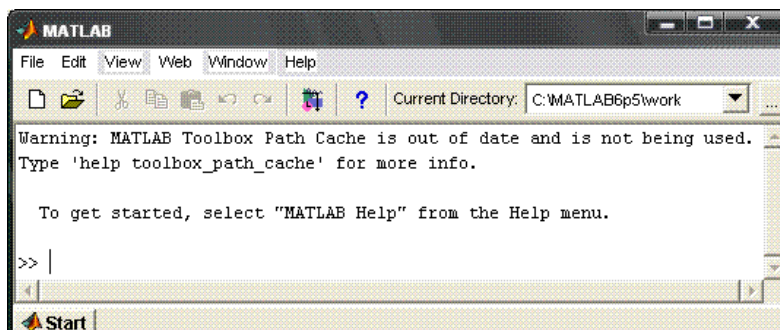


Рис. 2.2. Панель инструментов системы Matlab

В результате открывается окно Simulink Library Browser (рис. 2.3). Открытие нового окна для построения ССДМ (рис. 2.1) осуществляется нажатием левой кнопки мыши на пиктограмме Create a new model (1-я слева) панели инструментов данного окна.

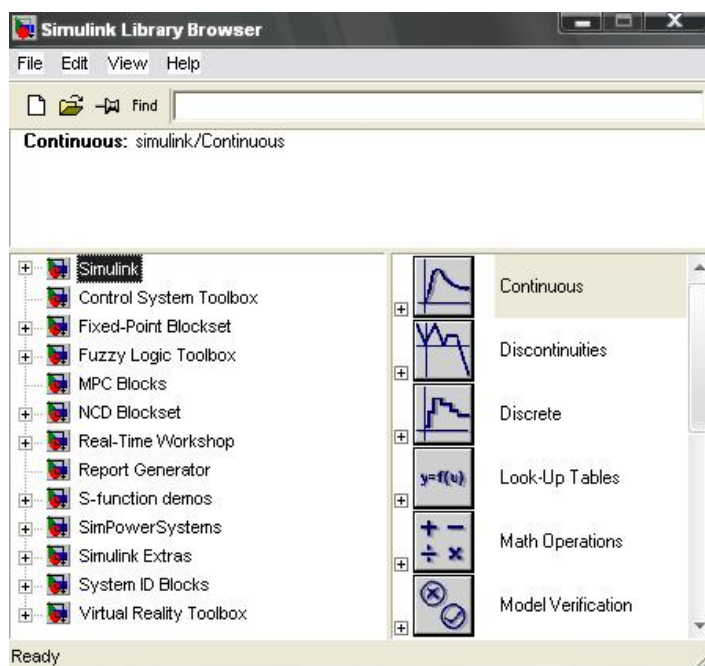


Рис. 2.3. Окно Simulink Library Browser

Имя окна для построения ССДМ задается по умолчанию – untitled (рис. 2.4).

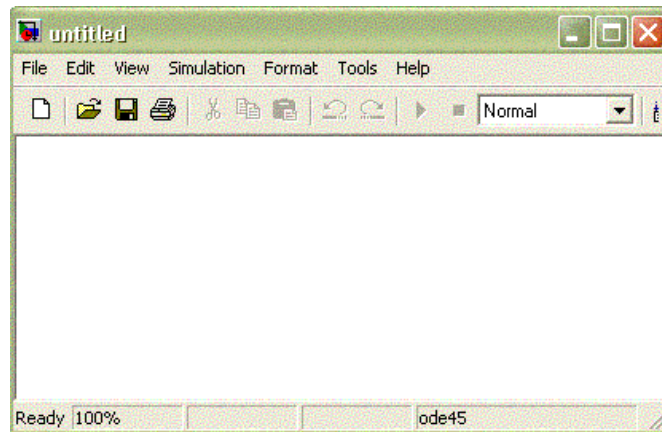


Рис. 2.4. Окно для построения ССДМ

Соответствующие блоки перемещаются в окно untitled из библиотек блоков. Затем блоки соединяются линиями связи. Для этого указатель мыши помещается на выходной порт блока. Далее, при нажатой левой кнопке мыши, указатель перемещается к входному порту следующего блока, линии связи заканчиваются стрелкой.

Построение ССДМ ЭП в системе Simulink осуществляется следующим образом. Звено с передаточной функцией $\frac{1/R}{T_3 s + 1}$ находится в библиотеке блоков Continuous (элементы непрерывных систем) (рис. 2.3) и обозначается Transfer Fcn (рис. 2.5). В поле диалогового окна блока вводятся данные числителя Numerator: $[1/R]$ и знаменателя Denominator: $[T_3 \ 1]$ (рис. 2.6). Аналогично формируется звено $\frac{1/R}{T_3 s + 1}$ Numerator: $[R/cT_M]$, Denominator: $[1 \ 0]$.

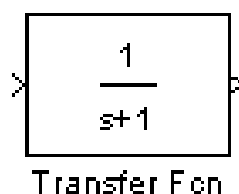


Рис. 2.5. Блок Transfer Fcn

Звенья $1/s$ и c находятся в библиотеке блоков Math Operations и обозначаются Gain (рис. 2.7). В поле диалогового окна блока вводятся соответствующие значения коэффициентов (рис. 2.8) для c .

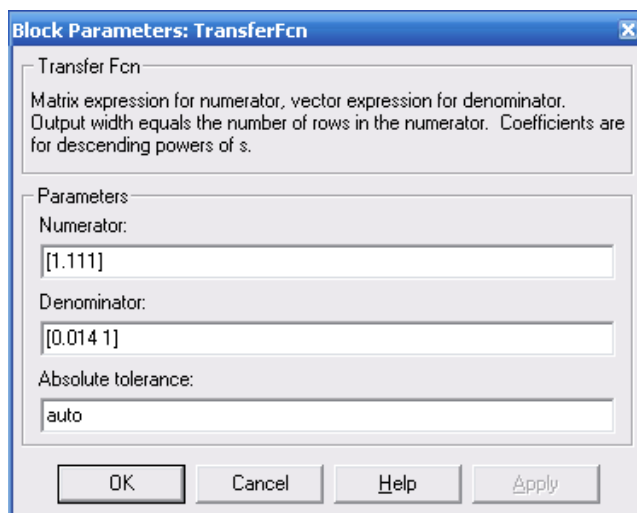


Рис. 2.6. Диалоговое окно блока Transfer Fcn

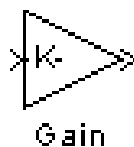


Рис. 2.7. Блок Gain

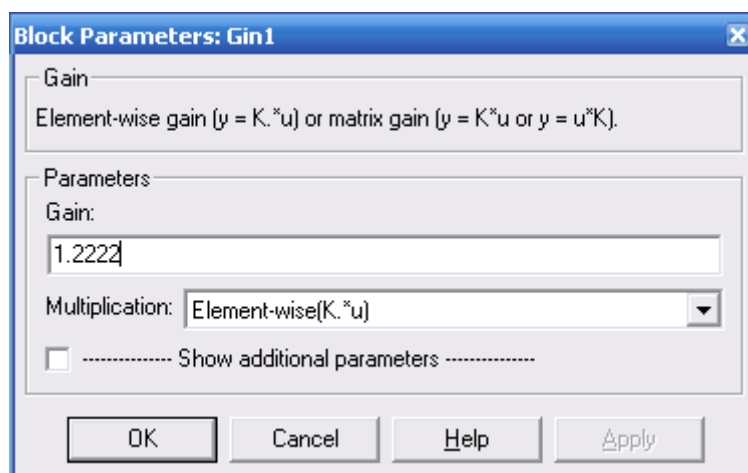


Рис. 2.8. Диалоговое окно блока Gain

Сумматоры также находятся в библиотеке блоков Math Operations и обозначаются Sum (рис. 2.9). Для реализации отрицательной связи необходимо в диалоговом окне блока записать «+ -» (рис. 2.10).



Рис. 2.9. Блок Sum

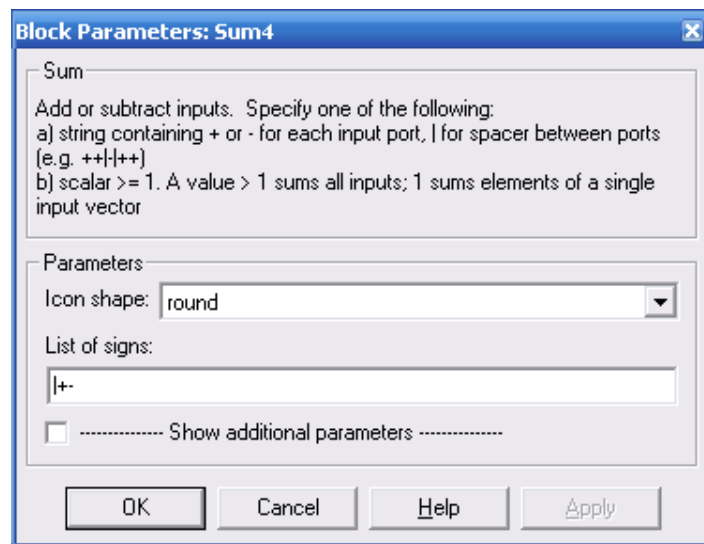
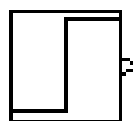


Рис. 2.10. Диалоговое окно блока Sum

Сигнал $U_{\text{ТП}} = U_{\text{НОМ}}$ формируется с помощью блока Step (рис. 2.11), находящегося в библиотеке блоков Sources. В диалоговом окне блоков вводится соответствующее значение $U_{\text{НОМ}}$ (рис. 2.12). Аналогично формируется сигнал M_c .



Step

Рис. 2.11. Блок Step

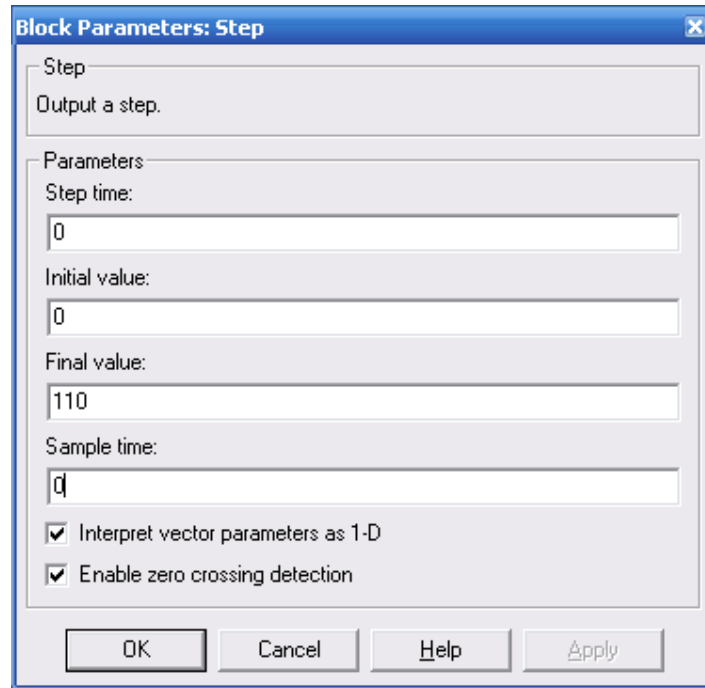


Рис. 2.12. Диалоговое окно блока Step

Установившееся значение выходной координаты отображается с помощью блока Display, рисунок 2.13. расположенной в библиотеке блоков Sinks.

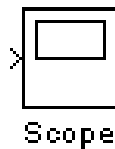


Рис. 2.13. Блок Display

По умолчанию в системе Simulink конечное время моделирования устанавливается равным 10,0. После выбора команды Simulation Parameters меню Simulation окна модели выводится диалоговое окно Simulation Parameters, где во вкладке Solver в текстовом поле Stop time вводится установленное для задачи значение (рис. 2.14). Затем нажимается кнопка ОК.

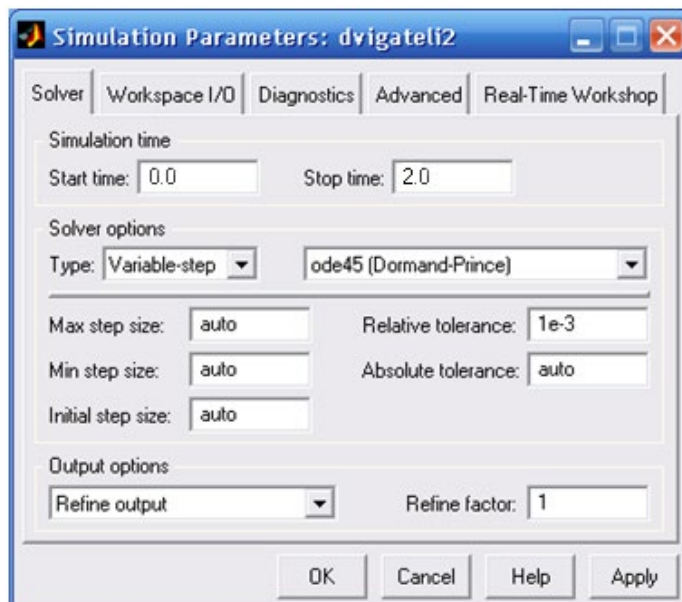


Рис. 2.14. Диалоговое окно Simulation Parameters

Окно блока Scope выводится при двойном нажатии кнопки мыши на изображении блока. Выбор команды Start меню Simulation производит запуск процесса моделирования, при этом в окне блока Scope строится график, отображающий значения выходной координаты в функции времени моделирования. Для автоматической установки границ на осях выбирается пиктограмма Autoscale (в виде бинокля) на панели инструментов данного окна.

Для сохранения созданной модели выбирается команда Save меню File или пиктограмма Save (в виде дискеты) на панели инструментов и в диалоговом окне Save As вводится имя файла.

3.2. МОДЕЛИРОВАНИЕ СИСТЕМЫ И АНАЛИЗ ПОЛУЧЕННЫХ РЕЗУЛЬТАТОВ

ПРИМЕР 2.2а ($T_M > 4T_D$). Провести моделирование нескорректированного замкнутого контура скорости с двигателем типа 2ПБ132МУХЛ4. Оценить качество переходных процессов. Определить установившиеся ошибки относительно задающего воздействия и момента сопротивления. Значения

параметров принимаем по примерам 1.1а, 1.2а, 1.3а: $U_3^0 = 10$ В; $K_{ТП} = 11$; $K_{OC} = 0,127$ В·с/рад; $R = 0,9$ Ом; $i = 69$; $c = 1,222$ В·с/рад $\eta = 0,92$; $T_э = 0,014$ с; $T_M = 0,081$ с; $T_{ТП} = 0,004$ с; $T_\phi = 0,012$ с; $M_c^0 = 195$ Н·м.

Решение. Проведем моделирование замкнутого по скорости электропривода в соответствии со схемой, показанной на рисунке 2.1. ССДМ ЭП в среде MatLab представлена на рис. 2.15. В блоке Step вводится значение $U_3 = 10$ В.

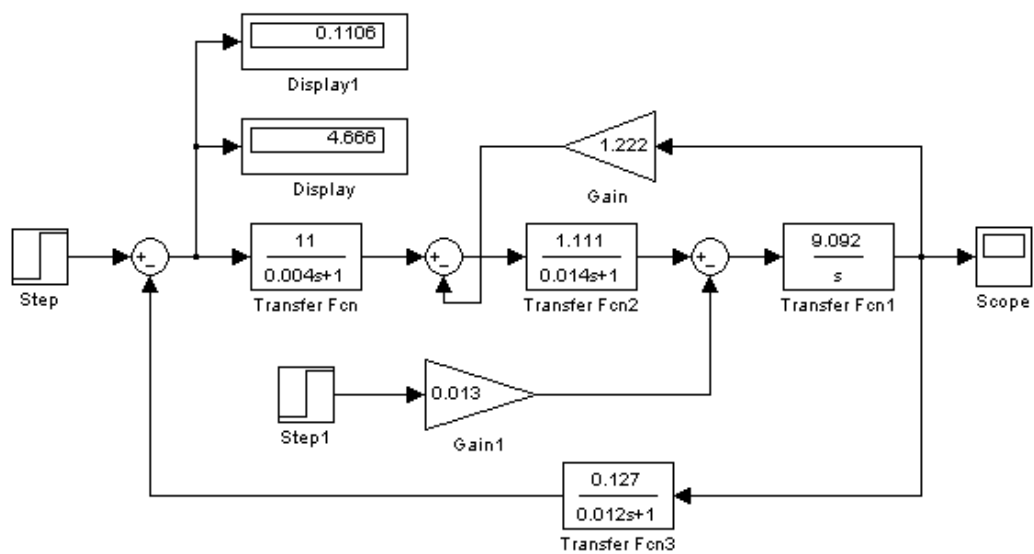


Рис. 2.15. ССДМ нескорректированного контура скорости

На рис. 2.16 представлена зависимость угловой скорости от времени нескорректированного контура скорости. Наброс момента M_c производился через 1 с после пуска системы «преобразователь – двигатель».

Из графика видно, что установившееся значение скорости двигателя без нагрузки составляет $\Omega_{уст} = 42$ рад/с. За счет влияния M_c угловая скорость уменьшилась примерно на 1 рад/с.

Результаты моделирования подтверждают правильность расчетов, проведенных в примере 2.1б.

Очевидно, что процессы в замкнутом контуре скорости необходимо оптимизировать за счет применения ПИД-регулятора, обеспечивающего увеличение точности благодаря интегральной составляющей и уменьшение колебаний благодаря дифференциальной составляющей.

$\Omega_{дв}$, рад/с

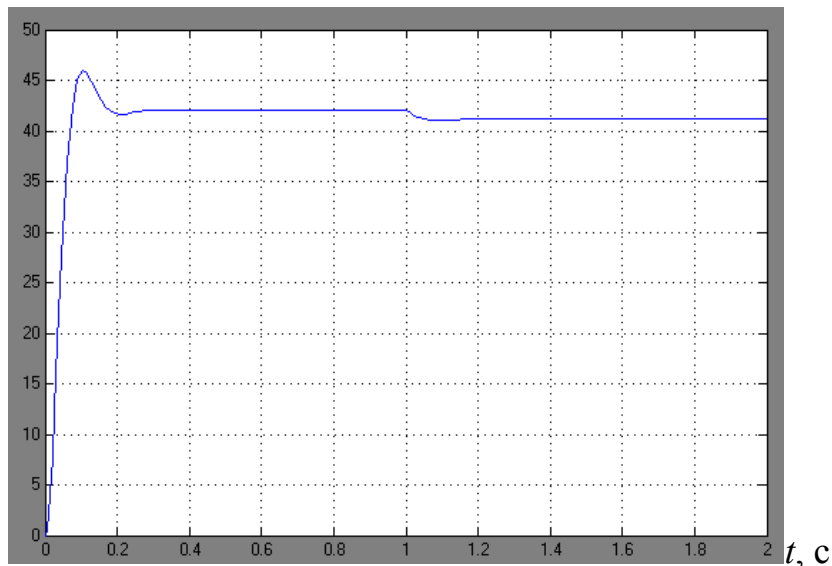


Рис. 2.16. Зависимость угловой скорости от времени нескорректированного контура скорости

График характеризует колебательную систему с перерегулированием около 9 % и числом колебаний $N = 1$ и. Время протекания переходного процесса составляет 0,3 с. Наличие колебаний обусловлено комплексно-сопряженными корнями характеристического уравнения замкнутой системы.

На рисунке 2.15 в блоках Display показаны установившиеся ошибки по задающему воздействию (Display) и по моменту сопротивления (Display 1), которые составили соответственно:

$$\Delta u_{уст}^u \approx 4,67 \text{ В}; \quad \Delta u_{уст}^{M_c} \approx 0,11 \text{ В}.$$

Таким образом, суммарная установившаяся ошибка электропривода с

двигателем типа 2ПБ132МУХЛ4:

$$\Delta u_{\text{уст}} = \Delta u_{\text{уст}}^i + \Delta u_{\text{уст}}^{M_c} = 4,67 + 0,11 = 4,78 \text{ В.}$$

Результаты моделирования подтверждают правильность расчетов, проведенных в примере 2.1а.

4. ОПТИМИЗАЦИЯ КОНТУРА СКОРОСТИ .СТАНДАРТНЫЕ НАСТРОЙКИ И ИХ ПРИМЕНЕНИЕ

В теории проектирования ЭП широкое применение получили методы последовательной коррекции под названием «стандартные настройки» (СН) [1, 10, 14]. Различают два вида СН: *настройка на оптимум по модулю* (ОМ) и *настройка на симметричный оптимум* (СО). При такой коррекции решается задача оптимального выбора параметров регулятора с целью получения заранее известного стандартного набора показателей качества процесса управления: времени нарастания t_H (первого времени достижения установившегося значения), перерегулирования σ , запаса устойчивости по фазе θ_3 и амплитуде L_3 , числа колебаний N .

4.1. Настройка на оптимум по модулю

Настройкой контура на ОМ называется синтез регулятора с целью получения динамических характеристик замкнутого контура, близких к характеристикам колебательного звена с относительным коэффициентом затухания $\xi = \frac{\sqrt{2}}{2} = 0,707$, перерегулированием $\sigma = 4,3 \%$, запасом устойчивости по фазе $\theta_3 = 63^\circ$, временем нарастания $t_H = 4,7T_\Sigma$.

При настройке контура на ОМ осуществляется компенсация больших постоянных времени силового канала ЭП и динамические процессы будут

определяться суммарными малыми постоянными времени $\sum_{j=1}^m \tau_j$ контура.

Любой контур считается настроенным на ОМ, если его передаточная функция в разомкнутом состоянии имеет вид:

$$W(s) = \frac{1}{2T_{\Sigma}s(T_{\Sigma}s + 1)}, \quad (3.1)$$

где $T_{\Sigma} = \sum_{j=1}^m \tau_j$.

Рассмотрим синтез регулятора применительно к неизменяемой части ЭП, которая описывается передаточной функцией:

$$W_H(s) = \frac{K}{\prod_{i=1}^n (T_i s + 1) \prod_{j=1}^m (\tau_j s + 1)}, \quad (3.2)$$

где T_i – компенсируемые большие постоянные времени контура.

При выполнении условия:

$$T_i \gg \sum_{j=1}^m \tau_j, \quad (3.3)$$

второй сомножитель (3.2) можно записать как:

$$\prod_{j=1}^m (\tau_j s + 1) \cong T_{\Sigma} s + 1, \quad (3.4)$$

тогда передаточная функция неизменяемой части ЭП:

$$W_H(s) = \frac{K}{(T_{\Sigma} s + 1) \prod_{i=1}^n (T_i s + 1)}. \quad (3.5)$$

При последовательной коррекции передаточная функция регулятора:

$$W_P(s) = \frac{W(s)}{W_H(s)}. \quad (3.6)$$

После подстановки в (3.6) выражений (3.1) и (3.5) получим:

$$W_P(s) = \frac{(T_{\Sigma} s + 1) \prod_{i=1}^n (T_i s + 1)}{K 2 T_{\Sigma} s (T_{\Sigma} s + 1)},$$

или

$$W_p(s) = \frac{K_p \prod_{i=1}^n (\tau_{pi}s + 1)}{T_p s}, \quad (3.7)$$

где $K_p = \frac{T_p}{K2T_\Sigma}$; $\tau_{pi} = T_i$; T_p – параметры регулятора.

В качестве примера настройки на ОМ рассмотрим настройку контура скорости (КС). ССДМ КС изображена на рис. 3.1.

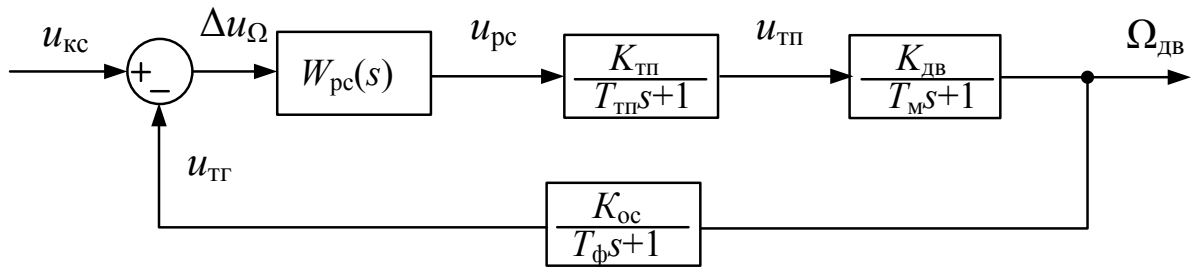


Рис. 3.1. Структурная схема динамической модели контура скорости

Передаточная функция неизменяемой части КС запишется в виде произведения передаточных функций блока питания, двигателя и тахогенератора:

$$W_H(s) = \frac{K_\Pi K_{дв} K_{ос}}{(T_{тп} s + 1)(T_м s + 1)(T_ф s + 1)}.$$

Электромеханическая постоянная времени двигателя $T_м$ является постоянной времени, подлежащей компенсации.

Постоянные времени ТП и ТГ являются малыми постоянными времени, и их влияние сказывается на высоких частотах. Поэтому произведение инерционных звеньев с малыми постоянными времени можно заменить одним инерционным звеном

$$\frac{1}{(T_{тп} s + 1)(T_ф s + 1)} \cong \frac{1}{(T_\Sigma s + 1)}, \quad (3.8)$$

где $T_\Sigma = T_{тп} + T_ф$ – суммарная малая постоянная времени КС.

С учетом приближения выражение (3.8) примет вид:

$$W_H(s) = \frac{K_{ТП} K_{ДВ} K_{Ос}}{(T_M s + 1)(T_\Sigma s + 1)}. \quad (3.9)$$

С применением формулы (3.6) определяем передаточную функцию регулятора скорости (РС):

$$W_{РС}(s) = \frac{W(s)}{W_H(s)},$$

где передаточная функция настроенного на ОМ разомкнутого КС

$$W(s) = W_{КС}^{ОМ}(s) = \frac{\Omega_{ДВ}(s)}{\Delta U_{КС}(s)} = \frac{1}{2T_\Sigma s(T_\Sigma s + 1)}. \quad (3.10)$$

Тогда

$$W_{РС}(s) = \frac{(T_M s + 1)(T_\Sigma s + 1)}{K_{ТП} K_{ДВ} K_{Ос} 2T_\Sigma s(T_\Sigma s + 1)}.$$

Переписывая передаточную функцию РС в стандартном виде, получим:

$$W_{РС}(s) = \frac{K_{РС}(T_{РС} s + 1)}{T_{РС} s}, \quad (3.11)$$

где $T_{РС} = T_M$, $K_{РС} = \frac{T_{РС}}{K_{ТП} K_{ДВ} K_{Ос} 2T_\Sigma}$.

Полученная передаточная функция РС описывает динамические свойства ПИ-регулятора.

Согласно (3.10), передаточная функция замкнутого КС:

$$\Phi_{КС}^{ОМ}(s) = \frac{\Omega_{ДВ}(s)}{U_3(s)} = \frac{1/K_{Ос}}{2T_\Sigma s(T_\Sigma s + 1) + 1}. \quad (3.12)$$

Перепишем (3.12) как:

$$\Phi_{КС}^{ОМ}(s) = \frac{1/K_{Ос}}{T_{КС}^2 s^2 + 2\xi T_{КС} s + 1},$$

где $T_{КС} = \sqrt{2}T_{\Sigma}$ – постоянная времени КС; $\xi = \frac{\sqrt{2}}{2} = 0,707$.

На рис. 3.2, 3.3 показаны стандартные графики ЛЧХ и переходной характеристики при настройке на ОМ, полученные по выражениям (3.10) и (3.12).

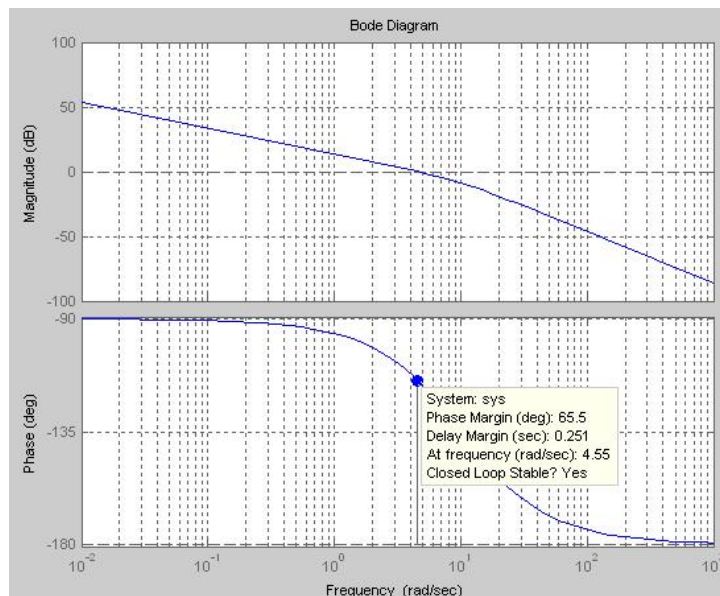


Рис. 3.2. Стандартный график ЛЧХ при настройке на оптимум по модулю

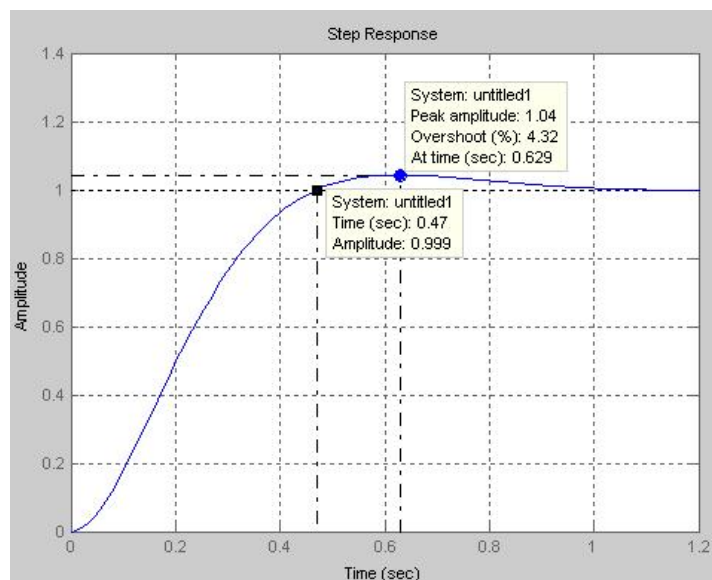


Рис. 3.3. Переходная характеристика $\Omega(t)$ при настройке на оптимум по модулю

По графикам определяем показатели качества КС, настроенного на ОМ: запас устойчивости по фазе $\theta_3 = 65,5^\circ$, перерегулирование $\sigma = 4,32\%$ и время нарастания переходного процесса $t_H \cong 4,7T_\Sigma = 0,47$ с.

Настройка на ОМ позволяет получить достаточное быстродействие при небольшом перерегулировании. В ряде случаев, когда требуется получить повышенное быстродействие и точность системы, применяют настройку на СО.

4.2. Настройка на симметричный оптимум

Настройкой контура на СО называется синтез регулятора с целью получения динамических характеристик контура, близких к типовым характеристикам контура с астатизмом второго порядка ($\nu = 2$), перерегулированием 43 %, запасом устойчивости по фазе $\theta_3 = 37^\circ$ и временем нарастания переходного процесса $t_H \cong 3,1T_\Sigma$.

В основе процедуры настройки на СО лежит допущение о том, что в рабочем диапазоне частот выражение (3.5), с учетом

$$\frac{T_i}{T_\Sigma} \gg 1, \quad (3.13)$$

можно представить в виде:

$$W_H(s) = \frac{K}{(T_\Sigma s + 1) \prod_{i=1}^n T_i s}. \quad (3.14)$$

Применительно к ССДМ КС (рис. 3.1) передаточная функция неизменяемой части:

$$W_H(s) = \frac{K_{ТП} K_{ДВ} K_{ОС}}{T_M s (T_\Sigma s + 1)}. \quad (3.15)$$

Для получения желаемых результатов нужно выбрать ПИ-регулятор (3.10)

с параметрами:

$$K_{pc} = \frac{T_M}{K_{ТП} K_{ДВ} K_{ОС} 2T_{\Sigma}} \text{ и } T_{pc} = 4T_{\Sigma}.$$

Тогда передаточная функция КС, настроенного на СО:

$$W_{КС}^{CO}(s) = \frac{(4T_{\Sigma}s + 1)}{8T_{\Sigma}^2 s^2 (T_{\Sigma}s + 1)}. \quad (3.16)$$

Из выражения (3.16) видно, что свойства КС соответствуют свойствам контура с астатизмом 2-го порядка. Динамические свойства КС иллюстрируются графиками (рис. 3.4, 3.5). Показатели качества КС, настроенного на СО, имеют следующие значения: $\theta_3 \approx 37^\circ$, перерегулирование $\sigma = 43\%$ и время нарастания переходного процесса $t_H = 3,1T_{\Sigma} = 0,31$ с.

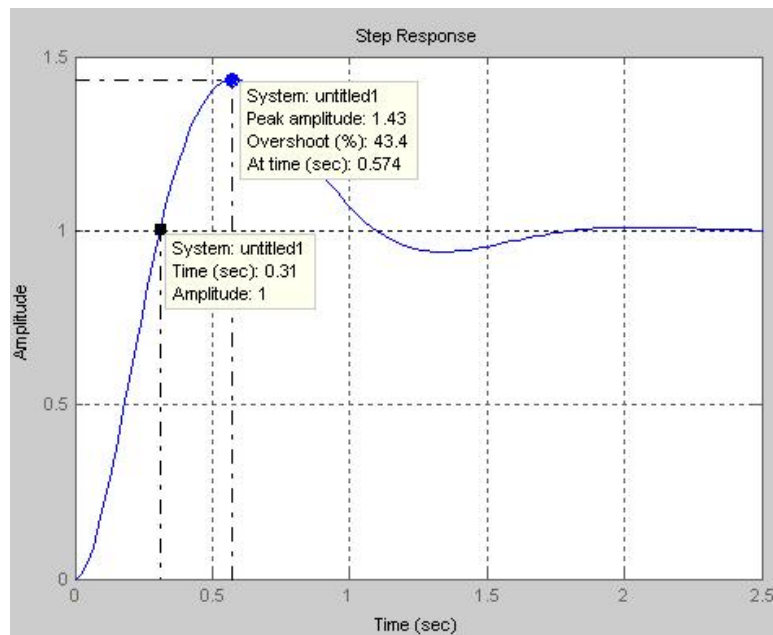


Рис. 3.4. Переходная характеристика $\Omega(t)$ при настройке на симметричный оптимум

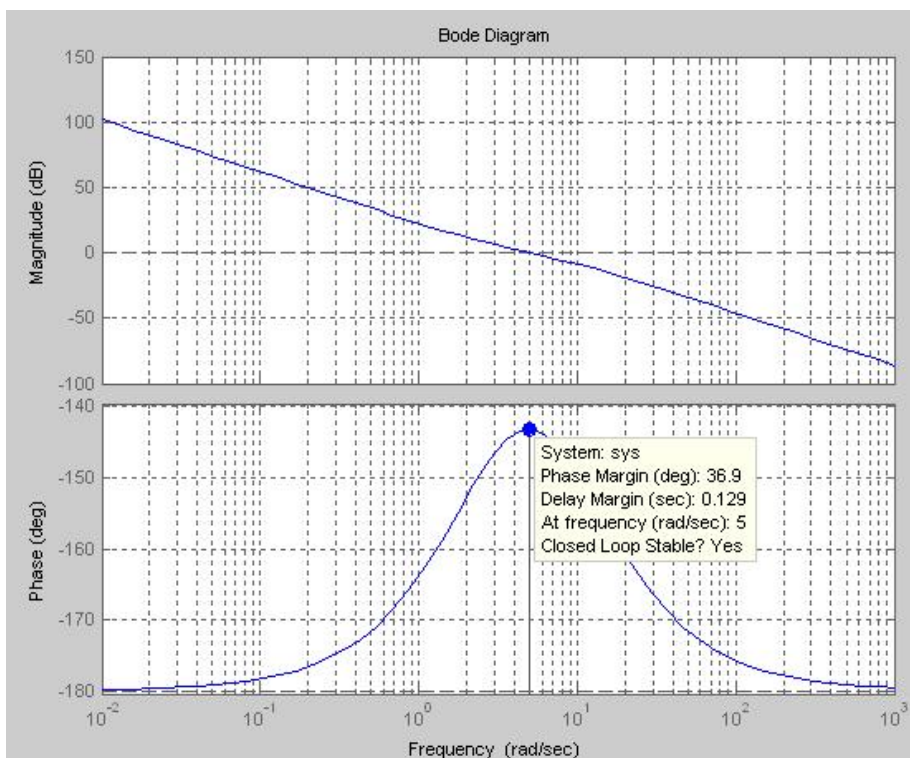


Рис. 3.5. Стандартный график ЛЧХ при настройке на симметричный оптимум

Если условие (3.13) трудновыполнимо, то производят настройку КС с передаточной функцией (3.9). Параметры ПИ-регулятора при этом рассчитываются по выражениям:

$$K_{pc} = \frac{T_M}{K_{ТП} K_{ДВ} K_{ОС} 2T_{\Sigma}} \text{ и } T_{pc} = 4T_{\Sigma}.$$

Тогда передаточная функция скорректированного КС:

$$W_{КС}(s) = \frac{T_M (4T_{\Sigma} s + 1)}{8T_{\Sigma}^2 s (T_{\Sigma} s + 1) (T_M s + 1)}. \quad (3.17)$$

Следует отметить, что в полученном выражении необходимым является выполнение условия $T_M > 4T_{\Sigma}$, в противном случае настройка на СО невозможна.

Выбирая для примера КС, структурная схема которого представлена на рис. 3.1, $T_M = 0,1$ с, получаем ЛЧХ и переходную характеристику КС (рис. 3.6, 3.7), с астатизмом первого порядка ($\nu=1$).

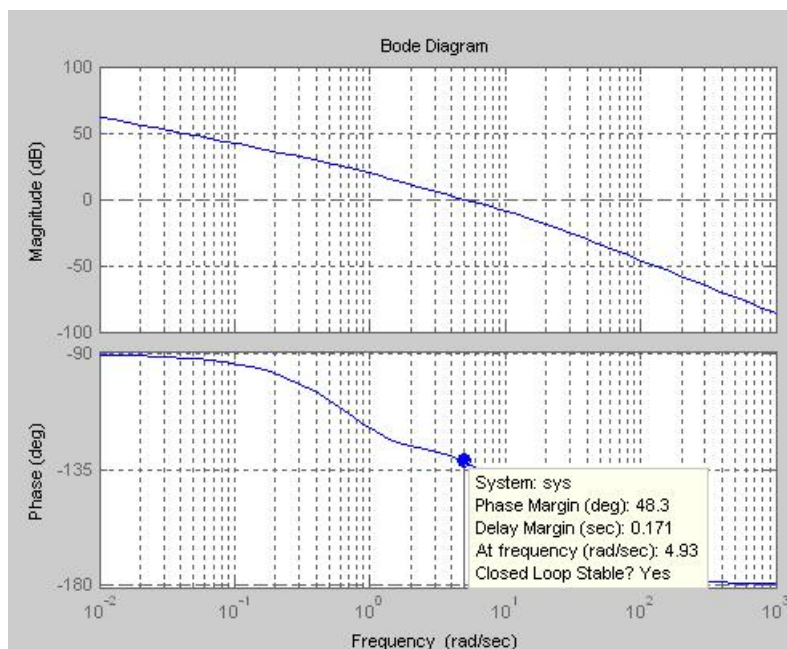


Рис. 3.6. ЛЧХ контура скорости с астатизмом первого порядка

Также заметим, что при увеличении электромеханической постоянной времени T_M и неизменном значении суммарной малой постоянной времени T_Σ увеличивается запас по фазе $\theta_3 = 48,3^\circ$ и уменьшается перерегулирование $\sigma = 24,4 \%$.

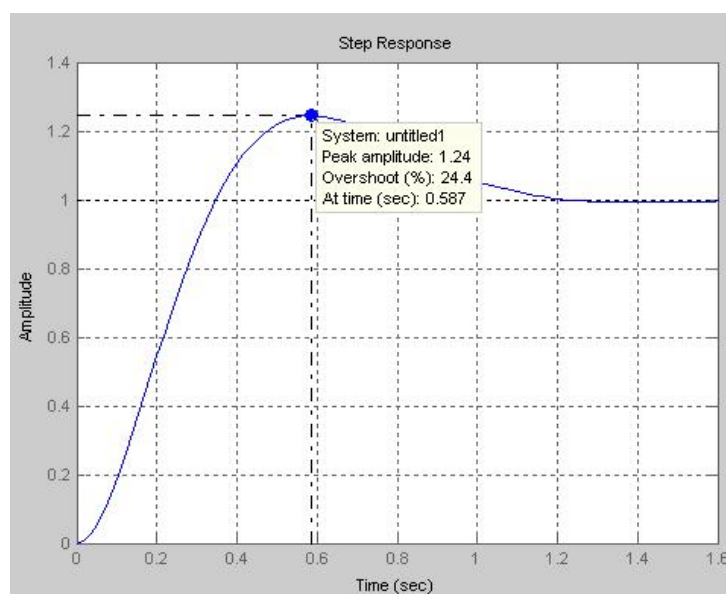


Рис. 3.7. Переходная характеристика контура скорости с астатизмом первого порядка

5. СИНТЕЗ РЕГУЛЯТОРА СКОРОСТИ ДЛЯ НАСТРОЙКИ КОНТУРА СКОРОСТИ НА ОПТИМУМ ПО МОДУЛЮ

При выполнении данного проекта необходимо уяснить состав и динамические свойства элементов контура скорости. Контур скорости состоит из регулятора скорости, тиристорного преобразователя, электродвигателя и датчика скорости.

Параметры динамической модели нескорректированного контура скорости рассчитаны, поэтому синтез РС сводится к определению его структуры и расчёту параметров, обеспечивающих настройку КС на ОМ.

На схеме, представленной на рис. 3.8, передаточная функция двигателя показана динамическим звеном второго порядка, полученным в результате преобразования ССДМ (рис. 1.3). По схеме определяем передаточную функцию разомкнутого КС:

$$W_{\text{КС}}(s) = W_{\text{РС}}(s) \cdot \frac{K_{\text{ТП}}}{T_{\text{ТП}}s + 1} \cdot \frac{K_{\text{ДВ}}}{T_{\text{М}}T_{\text{Э}}s^2 + T_{\text{М}}s + 1} \cdot \frac{K_{\text{ОС}}}{T_{\text{Ф}}s + 1}. \quad (3.18)$$

Передаточная функция КС, настроенного на ОМ, имеет вид:

$$W_{\text{КС}}^{\text{ОМ}}(s) = \frac{1}{2T_{\Sigma}s(T_{\Sigma}s + 1)}, \quad (3.19)$$

где T_{Σ} – суммарная постоянная времени КС.

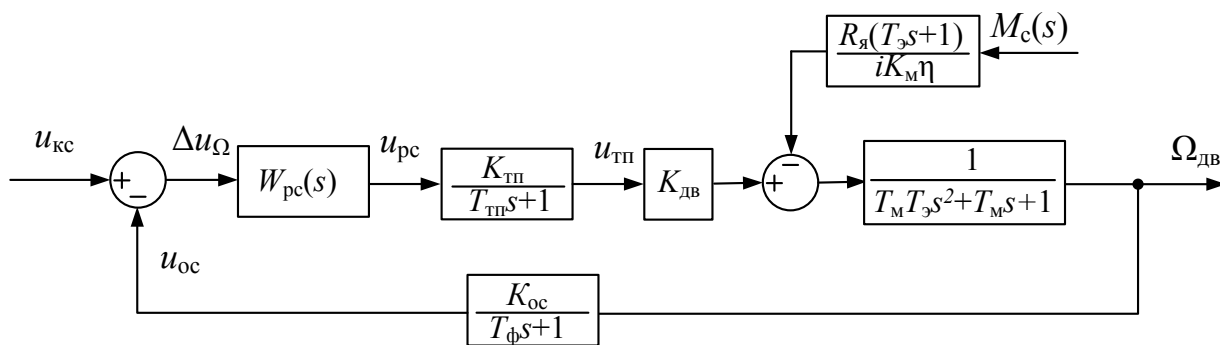


Рис. 3.8. Структурная схема динамической модели контура скорости

Приравнивая правые части выражений (3.18) и (3.19), получим уравнение:

$$W_{pc}(s) \cdot \frac{K_{тп}}{T_{тп}s + 1} \cdot \frac{K_{дв}}{T_M T_{\vartheta} s^2 + T_M s + 1} \cdot \frac{K_{ос}}{T_{\phi} s + 1} = \frac{1}{2T_{\Sigma} s (T_{\Sigma} s + 1)},$$

из которого находим передаточную функцию РС:

$$W_{pc}(s) = \frac{T_M T_{\vartheta} s^2 + T_M s + 1}{2K_{тп} K_{дв} K_{ос} T_{\Sigma} s}. \quad (3.20)$$

Выражение (3.20) представляет собой передаточную функцию свойства которой соответствуют динамическим свойствам ПИД-регулятора.

Для реализации данной структуры необходимо в передаточную функцию (3.20) добавить инерционное звено с малой постоянной времени T_{pc3} . Тогда передаточная функция РС запишется как:

$$W_{pc}(s) = \frac{T_{pc1} T_{pc2} s^2 + T_{pc1} s + 1}{2K_{тп} K_{дв} K_{ос} T_{\Sigma} s (T_{pc3} s + 1)}.$$

Поскольку постоянная времени $T_{pc2} < T_{pc1}$, то малую постоянную времени РС T_{pc3} принимаем из соображений, что

$$T_{pc3} \leq \frac{T_{pc2}}{N} \quad (N = 10).$$

Постоянную времени T_{pc3} следует отнести к суммарной малой постоянной времени КС и считать ее по формуле:

$$T_{\Sigma} = T_{тп} + T_{\phi} + T_{pc3}.$$

Для подтверждения правильности проведенных расчётов необходимо получить график ЛЧХ, график переходной функции КС по задающему воздействию и график переходной функции КС по моменту сопротивления нагрузки M_C^0 . По результатам моделирования проводится анализ и сравнительная оценка полученных показателей качества.

Пример 3.1 ($T_M > 4T_{\vartheta}$). Рассчитать параметры и электрическую схему

аналогового ПИД-регулятора. Для расчёта использовать данные, рассчитанные в примере 2.2а. Выбрать RC -элементы и операционный усилитель.

Решение. Поскольку, $4T_{\text{э}}$ меньше чем $T_{\text{м}}$, то передаточную функцию регулятора скорости представим в виде:

$$W_{\text{pc}}(s) = \frac{K_{\text{pc}}(T_{\text{pc1}}s + 1)(T_{\text{pc2}}s + 1)}{T_{\text{pc1}}s(T_{\text{pc3}}s + 1)},$$

где постоянные времени $T_{\text{pc1}} = \frac{2T_{\text{э}}}{1 - \sqrt{1 - \frac{4T_{\text{э}}}{T_{\text{м}}}}}$, $T_{\text{pc2}} = \frac{2T_{\text{э}}}{1 + \sqrt{1 - \frac{4T_{\text{э}}}{T_{\text{м}}}}}$, $T_{\text{pc3}} = \frac{T_{\text{pc2}}}{N}$,

коэффициент передачи $K_{\text{pc}} = \frac{T_{\text{pc1}}}{2K_{\text{тп}}K_{\text{дв}}K_{\text{ос}}(T_{\text{pc3}} + T_{\text{тп}} + T_{\text{ф}})}$.

На основании схемы, представленной на рис. 3.9, постоянные времени и коэффициент передачи ПИД-регулятора скорости определяются по формулам:

$$T_{\text{pc1}} = R_3C_2; T_{\text{pc2}} = R_2C_1; T_{\text{pc3}} = \frac{R_1R_2C_1}{R_1 + R_2}; K_{\text{pc}} = \frac{R_3}{R_1 + R_2}. \quad (3.21)$$

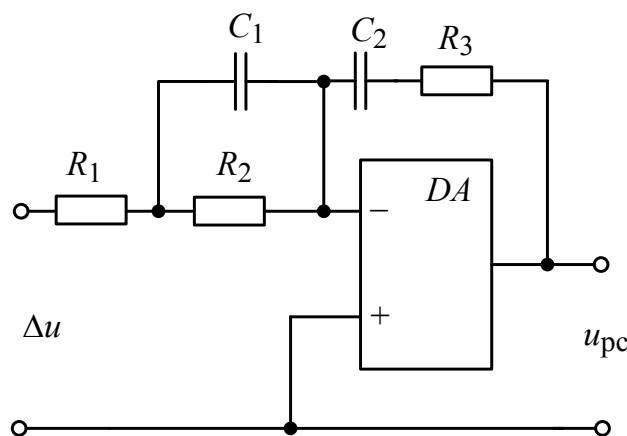


Рис. 3.9. Электрическая схема ПИД-регулятора скорости

Заметим, что в формулах (3.21) число неизвестных R_1, R_2, R_3, C_1, C_2 превышает число уравнений. Поэтому в инженерной практике прибегают к

способу, когда значения емкостей назначаются из стандартного ряда 1; 10; 22; 33; 47; 100 мкФ. Тогда порядок расчета сводится к следующему.

1. Задаемся емкостью C_2 и рассчитываем $R_3 = T_{pc1} / C_2$.
2. Задаемся емкостью C_1 и рассчитываем $R_2 = T_{pc2} / C_1$.
3. Согласно формуле $K_{pc} = \frac{R_3}{R_1 + R_2}$ сопротивление $R_1 = \frac{R_3 - R_2 K_{pc}}{K_{pc}}$.

Приводим сопротивления R_1, R_2, R_3 к номинальным значениям по ряду E192 (табл. П5). Необходимо отметить, что при этом коэффициент передачи регулятора может измениться. В этой связи сопротивление R_3 выбирается переменным, чтобы соответствующей его подстройкой выставить расчетное значение K_{pc} .

Переходим к расчету номинальных значений RC-элементов.

Постоянные времени РС:

$$T_{pc1} = \frac{2T_{\text{э}}}{1 - \sqrt{1 - \frac{4T_{\text{э}}}{T_{\text{м}}}}} = \frac{2 \cdot 0,014}{1 - \sqrt{1 - \frac{4 \cdot 0,014}{0,081}}} = 0,063 \text{ с};$$

$$T_{pc2} = \frac{2T_{\text{э}}}{1 + \sqrt{1 - \frac{4T_{\text{э}}}{T_{\text{м}}}}} = \frac{2 \cdot 0,014}{1 + \sqrt{1 - \frac{4 \cdot 0,014}{0,081}}} = 0,018 \text{ с};$$

$$T_{pc3} = \frac{T_{pc2}}{N} = \frac{0,018}{10} = 0,0018 \text{ с}.$$

Коэффициент передачи регулятора скорости:

$$K_{pc} = \frac{T_{pc1}}{2K_{\text{тп}}K_{\text{дв}}K_{\text{ос}}(T_{pc3} + T_{\text{тп}} + T_{\text{ф}})} = \frac{0,063}{2 \cdot 11 \cdot 0,818 \cdot 0,127(0,0018 + 0,004 + 0,012)} = 1,55. \quad (3.22)$$

Задаем $C_2 = 100$ мкФ и по табл. П6 выбираем конденсатор Panasonic серии NHG. Тогда

$$R_3 = \frac{T_{pc1}}{C_2} = \frac{0,063}{47 \cdot 10^{-6}} = 1,34 \text{ кОм.}$$

Приводим сопротивление к номинальному значению по ряду E192 (см. табл. П5) и принимаем $R_3 = 1,33 \text{ кОм.}$

Задаем $C_1 = 33 \text{ мкФ}$ и по табл. П6 выбираем конденсатор Panasonic серии NHG. Тогда

$$R_2 = \frac{T_{pc2}}{C_2} = \frac{0,018}{33 \cdot 10^{-6}} = 0,545 \text{ кОм.}$$

Приводим сопротивление к номинальному значению по ряду E192 (см. табл. П5) и принимаем $R_2 = 0,542 \text{ кОм.}$

Рассчитываем сопротивление:

$$R_1 = \frac{R_3 - R_2 K_{pc}}{K_{pc}} = \frac{(1,33 - 0,542 \cdot 1,55)}{1,55} = 0,316 \text{ кОм.}$$

Приводим сопротивление к номинальному значению по ряду E192 (см. табл. П5) и принимаем $R_1 = 0,316 \text{ кОм.}$

По полученным номинальным значениям сопротивлений РС пересчитываем коэффициент передачи

$$K_{pc} = \frac{R_3}{R_1 + R_2} = \frac{1,33}{0,316 + 0,542} = 1,55.$$

Полученное значение не отличается от величины коэффициента передачи $K_{pc} = 1,55$, рассчитанного по формуле (3.22), поэтому подстройки резистора R_3 не требуется.

Пример 3. Провести моделирование КС с аналоговым ПИД-регулятором скорости по примеру 2.2а. Получить графики переходных функций по задающему воздействию и по моменту сопротивления нагрузки M_c^0 . Построить график ЛЧХ разомкнутого КС. Провести анализ результатов моделирования.

Решение. Для моделирования построим ССДМ КС в системе Simulink, представленную на рис. 3.10.

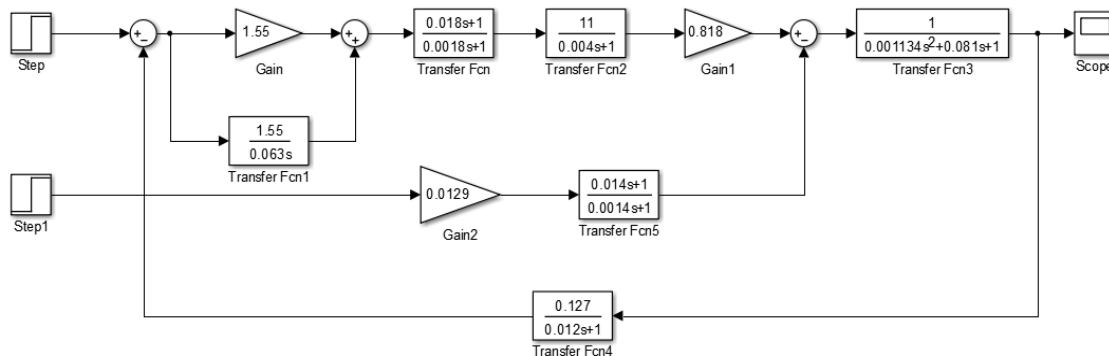


Рис. 3.10. Структурная схема динамической модели контура скорости в системе Simulink

В блоке Step задаём воздействие, равное входному напряжению суммирующего усилителя КС $u_{\text{cy}}^{\text{КС}} = 10\text{В}$, а в блоке Step 1 значение момента сопротивления нагрузки $M_{\text{c}}^0 = 0$. На рис. 3.11 изображен график переходной характеристики контура скорости по управляющему воздействию.

Для построения переходной характеристики по моменту сопротивления нагрузки M_{c} устанавливаем соответственно в блоке Step входное воздействие $u_{\text{cy}}^{\text{КС}} = 0$, а в блоке Step 1 – момент сопротивления $M_{\text{c}}^0 = -195\text{Н} \cdot \text{м}$. Полученная зависимость представлена на рис. 3.12.

$\Omega(t)$, рад/с

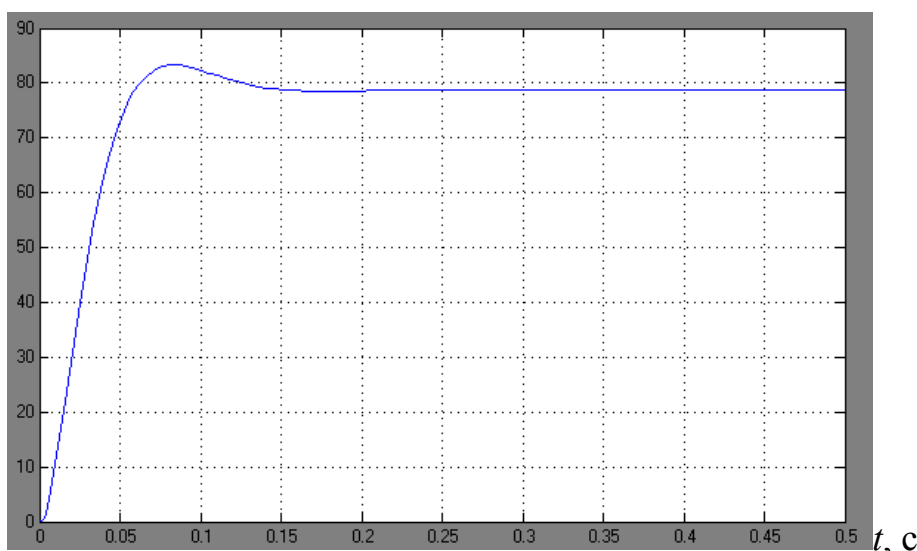


Рис. 3.11. График зависимости угловой скорости от времени

скорректированного контура скорости по сигналу задания

$\Omega(t)$, рад/с

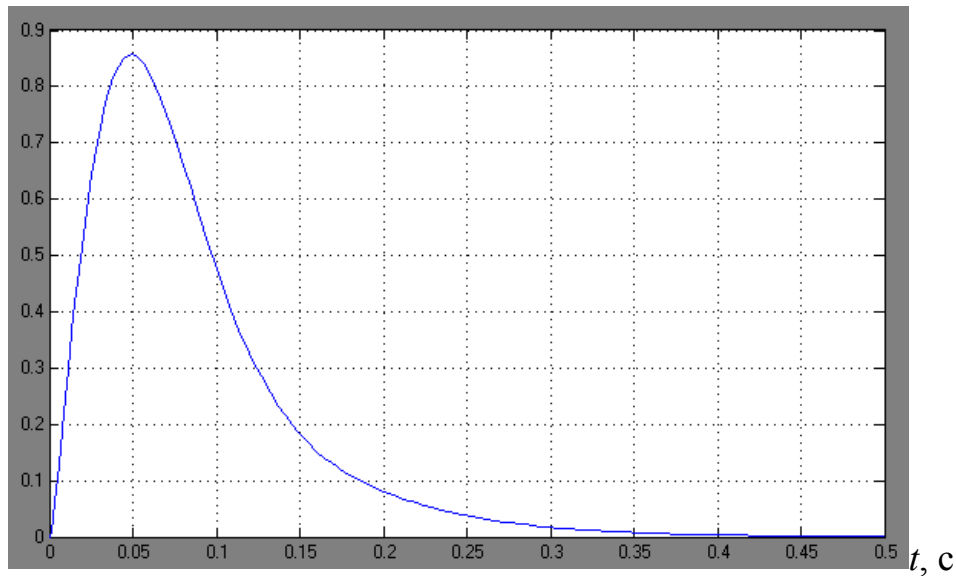


Рис. 3.12. График зависимости угловой скорости от времени скорректированного контура скорости по моменту сопротивления

Переходим к анализу полученных графиков. По графику на рис. 3.11 определяем максимальное значение угловой скорости вращения двигателя $\Omega_{\max} = 83$ рад/с и установившееся значение скорости $\Omega_{\text{уст}} = 78,74$ рад/с. По этим данным рассчитываем перерегулирование:

$$\sigma = \frac{\Omega_{\max} - \Omega_{\text{уст}}}{\Omega_{\text{уст}}} \cdot 100 \% = \frac{83 - 78,74}{78,74} \cdot 100 \% = 5,41\%.$$

Перерегулирование, полученное в результате моделирования, отличается от требуемого значения 4,3 %. Такое изменение обусловлено влиянием малой постоянной времени $T_{\text{ф}}$. Если принять $T_{\text{ф}} = 0$, то перерегулирование будет равно 4,3 %, а передаточная функция ТГ представится безынерционным звеном:

$$W_{\text{ос}}(s) = K_{\text{ос}}.$$

При этом суммарную малую постоянную времени КС следует

рассчитывать по формуле:

$$T_{\Sigma} = T_{\text{ТП}} + T_{\text{рс3}}.$$

Время нарастания $t_{\text{Н}}^{\text{КС}}$ определяется в первой точке пересечения графика переходной функции и установившегося значения угловой скорости $\Omega_{\text{уст}}$ и составляет:

$$t_{\text{Н}}^{\text{КС}} = 0,06 \text{ с.}$$

Проверяем соответствие полученного значения требованиям настройки на ОМ:

$$t_{\text{Н}}^{\text{КС}} \cong 4,7T_{\Sigma} = 4,7 \cdot 0,0178 = 0,083 \text{ с.}$$

Из анализа графика на рис. 3.12 следует, что при воздействии неизменного по величине момента сопротивления $M_{\text{с}}$ моментная составляющая ошибки $\Delta\Omega_{\text{М}}$ примерно через 0,45 с становится равной нулю. Это говорит о том, что искусственная механическая характеристика стала абсолютно жёсткой. Увеличение точности обусловлено наличием в структуре регулятора скорости интегральной составляющей.

Для построения ЛЧХ необходимо написать программу в Command Window среды MatLab. Поскольку ЛЧХ строятся на основе передаточной функции разомкнутого контура скорости, то все передаточные функции соответствующих элементов, входящих в него, необходимо перемножить и получить:

$$W_{\text{КС}}(s) = W_{\text{рс}}(s) \cdot W_{\text{ТП}}(s) \cdot W_{\text{ДВ}} \cdot W_{\text{Ос}}(s).$$

Обозначая $W_{\text{рс}}(s) = \text{sys1}$, $W_{\text{ТП}}(s) = \text{sys2}$, $W_{\text{ДВ}}(s) = \text{sys3}$, $W_{\text{Ос}}(s) = \text{sys4}$, составляем программу в соответствии со следующим алгоритмом:

$$\text{num1} = [K_{\text{рс}}T_{\text{рс1}}T_{\text{рс2}} (T_{\text{рс1}}+T_{\text{рс2}})K_{\text{рс}} \quad K_{\text{рс}}];$$

$$\text{den1} = [T_{\text{рс1}}T_{\text{рс3}} \quad T_{\text{рс1}} \quad 0];$$

$$\text{sys1} = \text{tf}(\text{num1}, \text{den1})$$

$$\text{num2} = [K_{\text{ТП}}];$$

```

den2 = [TТП 1];
sys2 = tf(num2, den2)
num3 = [Kдв];
den3 = [TэTМ TМ 1];
sys3 = tf(num3, den3)
num4 = [Kос];
den4 = [Tф 1];
sys4 = tf(num4, den4)
sys5 = sys1*sys2*sys3*sys4

```

В результате решения будет получена искомая передаточная функция разомкнутого КС $W_{\text{КС}}(s)$ с численными значениями коэффициентов полиномов числителя и знаменателя $b_2, b_1, b_0, d_6, d_5, d_4, d_3, d_2, d_1, d_0 = 0$:

$$W_{\text{КС}}(s) = \frac{b_2 s^2 + b_1 s + b_0}{d_6 s^6 + d_5 s^5 + d_4 s^4 + d_3 s^3 + d_2 s^2 + d_1 s}$$

Далее переходим к построению ЛЧХ:

```

num = [b2 b1 b0];
den = [d6 d5 d4 d3 d2 d1 0];
bode(num, den)

```

Перед тем как применить программу построения ЛЧХ, находим соответствующие коэффициенты из блоков Transfer Fcn, Transfer Fcn1, Gain, Transfer Fcn2, Transfer Fcn3 схемы, изображённой на рис. 3.10:

```

num1=[0.0017577 0.12555 1.55];
den1=[0.0001134 0.063 0];
sys1=tf(num1, den1);
num2=[11];

```

```

den2=[0.004 1];
sys2=tf(num2, den2);
num3=[0.818];
den3=[0.001134 0.081 1];
sys3=tf(num3, den3);
num4=[0.127];
den4=[0.012 1];
sys4=tf(num4, den4);
sys5=sys1*sys2*sys3*sys4

```

```
sys5 =
```

$$0.002009 s^2 + 0.1435 s + 1.771$$

$$\frac{6.173e-12 s^6 + 5.928e-09 s^5 + 1.669e-06 s^4 + 0.0001671 s^3 + 0.006224 s^2 + 0.063 s}{s^2 + 0.063 s}$$

```

num=[0.002009 0.1435 1.771];
den=[6.173e-12 5.928e-09 1.669e-06 0.0001671 0.006224 0.063 0];
bode(num, den)

```

Результаты моделирования представлены на рис. 3.12.

Из анализа графиков видно, что запасы устойчивости по фазе и амплитуде составляют $L_3 = 17,8$ дБ (Gain Margin) и $\theta_3 = 63,5^\circ$ (Phase Margin) соответственно.

Напомним, что запас устойчивости по амплитуде L_3 определяется как разность между линией 0 дБ и значением логарифмической амплитудно-частотной характеристики (ЛАЧХ) на частоте, соответствующей точке пересечения графика фазовой частотной характеристики со значением -180° .

Запас устойчивости по фазе θ_3 вычисляется по формуле:

$$\theta_3 = 180^\circ - |\theta(\omega_c)|.$$

Значение фазы $\theta(\omega_c)$ соответствует частоте среза ω_c , т. е. точке пересечения графика ЛАЧХ с линией 0 дБ.

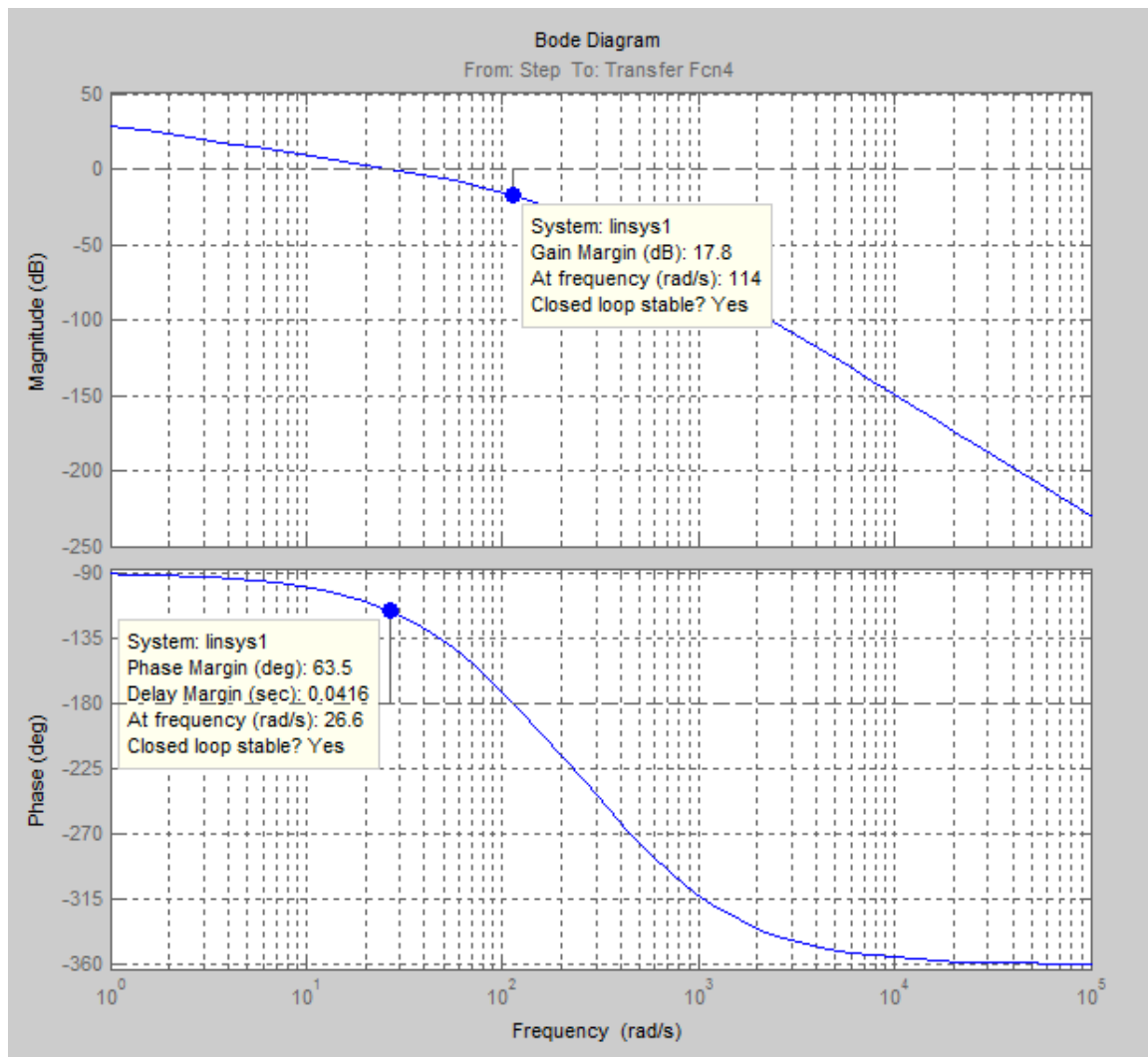


Рис. 3.12. Логарифмические частотные характеристики контура скорости

Результаты моделирования подтверждают правильность расчёта параметров РС и позволяют сделать вывод о том, что КС настроен на ОМ.

6. ТРЕБОВАНИЯ К ОФОРМЛЕНИЮ ОТЧЕТА ПО КУРСОВОМУ ПРОЕКТУ

В состав отчетных документов по курсовому проекту входит пояснительная записка (ПЗ) объемом 20..30 страниц формата А4 (210x297мм).

Расчетно-пояснительная записка должна содержать следующие разделы:

- титульный лист;
- задание на курсовой проект;
- оглавление;
- основная часть, которая содержит следующие пункты:
 - Систему исходных данных;
 - Моделирование нескорректированного контура скорости. Расчет установившихся ошибок;
 - Синтез регулятора скорости для настройки контура скорости на оптимум по модулю;
 - Моделирование скорректированного контура скорости. Расчет ошибок;
 - Сравнение показателей без регулятора и с регулятором;
 - заключение;

Пояснительная записка должна показать умение студента логично и аргументировано излагать материал, а ее оформление должно соответствовать требованиям ЕСКД.

Текст ПЗ должен быть набран на компьютере в текстовом редакторе Microsoft Word и распечатан на одной стороне листа белой бумаги формата А4 с соблюдением следующих размеров полей: левое – 30 мм, правое – 15 мм, верхнее и нижнее – 20 мм. Для набора текста ПЗ

следует использовать: гарнитуру шрифта – Times New Roman; размер шрифта (кегля) основного текста – 14 пт, подрисуночных подписей – 12 пт, в таблицах – 10–12 пт; цвет шрифта – черный. Абзацный отступ выполняется одинаковым по всему тексту и равен 1,25 см, межстрочный интервал – полуторный, выравнивание текста – по ширине. Каждый структурный элемент и раздел следует начинать с новой страницы.

Все математические расчет следует выделять из текста в отдельную строку. Формулы должны быть набраны в Microsoft Equation 3.0 или MathType шрифтом тех же гарнитуры и кегля, что и основной текст, к которому они относятся. Пояснительная записка должна содержать иллюстрации (графики исследуемых процессов и характеристик, схемы моделируемых систем). Иллюстрации должны соответствовать регламентам ЕСКД. Все иллюстрации именуется рисунками.

Иллюстрации следует размещать так, чтобы их можно было рассматривать без поворота документа или с поворотом на 90 по часовой стрелке. Иллюстрации следует располагать непосредственно по тексту сразу после первой ссылки, или, в случае отсутствия достаточного места на следующей странице. Если размер иллюстрации превышает максимально допустимый (165 257 мм), ее следует вынести в приложение.

Иллюстрации должны иметь подписи. Состав подрисуночной подписи следующий:

- а) слово «Рисунок», написанное полностью без сокращения;
- б) порядковый номер иллюстрации арабскими цифрами;
- в) собственно подпись;

7. ЗАЩИТА КУРСОВОГО ПРОЕКТА

Курсовой проект, подписанный студентом, сдается на проверку консультанту. Если курсовой проект удовлетворяет, предъявляемым к нему требованиям, студент допускается в защите курсового проекта.

Для приема защиты курсового проекта кафедра формирует комиссию, в состав которой должно входить не менее трех преподавателей кафедры. Курсовые проекты защищают публично в присутствии студентов, желающих послушать защиту.

На доклад по курсовому проекту студенту отводится 5-7 минут. Для защиты студенту необходимо подготовить презентацию, в которой будут продемонстрированы проведенные расчеты и моделирование регулятора. По окончании доклада студенту могут быть заданы вопросы по выполненному курсовому проекту. Общее время на вопросы и ответы не должно превышать – 5 мин.

Курсовой проект оценивается по системе принятой в вузе (по 100 балльной шкале) с записью положительной оценки в зачетную книжку. При оценке учитывается правильность и качество пояснительной записки, качество сделанного доклада, правильность и краткость ответов на вопросы. В случае неудовлетворительной оценки по одному из критериев, курсовой проект может быть оценена неудовлетворительно. Студенты, не защитившие ее, считаются имеющими академическую задолженность.

В случае неудовлетворительной оценки курсового проекта комиссия может:

— указать на необходимость доработки проекта без конкретизации допущенных ошибок и установить срок представления проекта к защите после доработки;

— предложить проведение дополнительной проработки отдельных вопросов и установить срок представления проекта к защите после доработки.

В случае повторной неудовлетворительной оценки проекта комиссия вправе сменить тематику проекта и назначить срок ее представления к защите. Повторная защита на повышенную оценку допускается только в том случае, если автор провел ее доработку.

ПРИЛОЖЕНИЕ

Таблица П.1

Система исходных данных

Вариант	U_3^0	$K_{тп}$	$K_{ос}$	c	R	i	η	$K_{дв}$	M_c^0
1	10	11	0,127	1,22	0,9	69	0,92	0,818	195
2	10	14	0,128	1,33	0,8	70	0,88	0,88	196
3	10	25	0,156	1,5	0,8	105	0,9	0,881	200
4	20	10	0,176	1,6	0,7	84	0,89	0,901	205
5	20	15	0,156	1,7	0,6	45	0,87	0,925	210
6	20	17	0,158	1,8	0,5	98	0,93	0,855	198
7	20	28	0,254	1,34	0,9	87	0,95	0,9	205
8	30	25	0,198	1,5	1	56	0,9	0,912	210
9	30	18	0,178	1,23	1,5	47	0,85	0,92	209
10	30	19	0,165	1,75	1	105	0,87	0,888	187
11	30	17	0,153	1,5	1,2	89	0,88	0,881	179
12	40	14	0,201	1,33	1,3	71	0,91	0,871	186
13	40	12	0,221	1,25	1,2	150	0,92	0,799	201
14	40	13	0,223	1,24	0,9	120	0,94	0,82	203
15	40	14	0,145	1,48	0,7	96	0,87	0,875	197
16	50	16	0,13	1,35	0,8	87	0,86	0,825	179
17	50	18	0,126	1,39	1	75	0,89	0,902	175
18	50	21	0,157	1,4	1,2	64	0,9	0,915	189
19	50	13	0,149	1,51	1,1	83	0,86	0,927	198
20	50	15	0,168	1,7	0,8	92	0,92	0,891	191

СОДЕРЖАНИЕ

Введение	3
1. Задание на курсовой проект.....	4
2. Организация работы над курсовым проектом.....	6
3. Исследование нескорректированного контура скорости. Расчет установившихся ошибок.....	7
3.1. Моделирование нескорректированного контура скорости.....	10
3.2. Моделирование системы и анализ полученных результатов.....	16
4. Оптимизация контура скорости. Стандартные настройки и их применение.....	19
4.1. Настройка на оптимум по модулю.....	19
4.2. Настройка на симметричный оптимум.....	23
5. Синтез регулятора скорости для настройки контура скорости на оптимум по модулю.....	27
6. Требования к оформлению отчета по курсовому проекта.....	40
7. Защита курсового проекта.....	42
Приложение.....	44

Учебное издание

ИССЛЕДОВАНИЕ И МОДЕЛИРОВАНИЕ КОНТУРА СКОРОСТИ
ЭЛЕКТРОПРИВОДА С ДВИГАТЕЛЕМ ПОСТОЯННОГО ТОКА

Учебно-методическое пособие

Составители: **Козелков Олег Владимирович**,
Малев Николай Анатольевич, **Мухаметшин Азат**
Ильдусович

Кафедра приборостроения и мехатроники КГЭУ

Редактор *И. В. Краснова*
Компьютерная верстка *И. В. Красновой*

Подписано в печать 19.12.2024.
Формат 60×84/16. Усл. печ. л. 1,86. Уч.изд л. 0,79.
Заказ № 544/эл.

Редакционно-издательский отдел КГЭУ,
420066, Казань, ул. Красносельская, 51