

**МИНИСТЕРСТВО НАУКИ И ВЫСШЕГО ОБРАЗОВАНИЯ
РОССИЙСКОЙ ФЕДЕРАЦИИ**

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

**СИСТЕМЫ АВТОМАТИЧЕСКОГО
РЕГУЛИРОВАНИЯ И УПРАВЛЕНИЯ
ЭЛЕКТРОМОБИЛЬНОГО ТРАНСПОРТА**

Учебно-методическое пособие

Казань 2024

УДК 681.516.31
ББК 31.291.5
С40

**С40 Системы автоматического регулирования и управления
электромобильного транспорта: Учеб.-метод. Пособие / В.М. Бутаков. –
Казань: Казан. гос. энерг. ун-т, 2024. – 39 с.**

Содержит методические указания по выполнению курсовой работы по дисциплине «Системы автоматического регулирования и управления электромобильного транспорта», которые определяют общие требования, предъявляемые к курсовой работе, последовательность ее подготовки и выполнения, требования к структуре, содержанию и оформлению.

Основу пособия составляет разработка функциональной схемы системы поддержания заданной скорости модели электромобиля с типовыми расчетами и примерами моделирования скоростного следящего электропривода. Приводятся методики выбора и расчета электродвигателя, синтеза регулятора скорости, а также исследования динамической модели скоростного следящего электропривода на персональном компьютере с использованием системы Matlab-Simulink.

Предназначено для всех форм обучения по образовательной программе «Проектирование и эксплуатация электротехнического оборудования электромобилей, беспилотного транспорта и зарядной инфраструктуры» направления подготовки 13.04.02 «Электроэнергетика и электротехника».

УДК 681.516.31
ББК 31.291.5

ВВЕДЕНИЕ

В соответствии с требованиями к условиям реализации образовательной программы «Проектирование и эксплуатация электротехнического оборудования электромобилей, беспилотного транспорта и зарядной инфраструктуры» обучающийся должен выполнить курсовую работу по дисциплине «Системы автоматического регулирования и управления электромобильного транспорта».

Курсовая работа – одна из основных форм самостоятельной учебной деятельности студентов – представляет собой логически завершенное и оформленное научное исследование.

Настоящее пособие разработано с целью оказания помощи студентам, приступающим к выполнению курсовой работы, в отношении выбора методов расчета и моделирования, порядка их проведения, объема и содержания работы.

В результате выполнения курсовой работы у обучающегося должны сформироваться:

способность осуществлять критический анализ проблемных ситуаций на основе системного подхода, вырабатывать стратегию действий;

способность проектировать объекты систем электромобильного и беспилотного транспорта.

Условием качественного выполнения и защиты курсовой работы является самостоятельное углубленное изучение темы с использованием специальной и справочной литературы.

Преподаватель выступает в качестве научного руководителя и обеспечивает систематические консультации, в ходе которых студенты получают рекомендации по использованию литературы и ответы на вопросы, возникающие в ходе выполнения курсовой работы.

1. ЗАДАНИЕ И ИСХОДНЫЕ ДАННЫЕ ДЛЯ ВЫПОЛНЕНИЯ КУРСОВОЙ РАБОТЫ

Задание на курсовую работу по дисциплине «Системы автоматического регулирования и управления электромобильного транспорта»:

1. Разработайте систему поддержания заданной скорости модели электромобиля с расчетом регулятора скорости и исследуйте его динамическую модель на ПК с использованием системы Matlab-Simulink:

а) разработайте функциональную схему системы поддержания заданной скорости модели электромобиля;

б) рассчитайте требуемую мощность, выберите соответствующий электродвигатель и определите параметры его динамической модели;

в) наберите структурную схему динамической модели (ССДМ) электродвигателя в системе Matlab-Simulink и постройте графики его переходной характеристики и ошибки по задающему воздействию;

г) синтезируйте регулятор для настройки контура скорости на оптимум по модулю;

д) наберите ССДМ контура скорости в системе Matlab-Simulink и постройте графики его переходной характеристики и ошибки по задающему воздействию и графики логарифмических частотных характеристик;

е) разработайте схему устройства для запоминания заданной скорости и смоделируйте его работу в программе Electronics Workbench;

ж) проведите анализ полученных графиков.

2. Оформите разработку системы поддержания заданной скорости модели электромобиля в виде расчетно-пояснительной записки.

Для выполнения расчетов необходимы следующие исходные данные:

- скорость модели электромобиля V , км/час;
- радиус колеса R , м;
- коэффициент сопротивления воздуха C_x ;
- лобовая площадь модели электромобиля S , м²;
- масса модели электромобиля m , кг;
- коэффициент передачи блока питания $K_{БП}$;
- постоянная времени блока питания $T_{БП}$, с;
- постоянная времени тахогенератора $T_{ТГ}$, с;
- коэффициент полезного действия η ;
- входное напряжение суммирующего усилителя контура скорости $U_{ВХ}^{КС}$, В;

Варианты исходных данных приведены в приложении 1.

2. ТРЕБОВАНИЯ К СОДЕРЖАНИЮ И ОФОРМЛЕНИЮ КУРСОВОЙ РАБОТЫ

2.1. Структура пояснительной записки

В пояснительной записке материал располагается следующим образом:

1. *Титульный лист* является первой страницей и оформляется в соответствии с определенными требованиями.

2. *Бланк задания* на курсовую работу – основной документ, используемый при выполнении курсовой работы (приложение 2). Оформляется на отдельном листе формата А4. Бланк содержит задания и исходные данные, необходимые для их выполнения.

3. *Содержание*. В содержании приводятся названия разделов и подразделов в полном объеме, как они даны в тексте, и указываются номера страниц, на которых они начинаются.

4. *Введение*. В этом разделе описывается принцип построения и работы функциональной схемы разрабатываемого скоростного следящего двухконтурного электропривода.

5. *Основная часть* включает:

разработку функциональной схемы системы поддержания заданной скорости модели электромобиля;

расчет требуемой мощности, выбор соответствующего электродвигателя и определение параметров его динамической модели;

синтез регулятора для настройки контура скорости на симметричный оптимум;

анализ результатов моделирования двигателя и контура скорости;

разработку схемы устройства для запоминания заданной скорости.

6. *Библиографический список* содержит библиографические описания использованных источников. В него рекомендуется включать издания, достаточно широко освещающие рассматриваемую проблему.

7. *Приложения*.

2.2. Оформление пояснительной записки

Объем пояснительной записки составляет 30–40 страниц текста на белых листах формата А4 (210 × 297 мм).

Требования к оформлению пояснительной записки аналогичны требованиям к оформлению текстовых документов. В связи с этим при оформлении пояснительной записки следует придерживаться следующих государственных стандартов:

1. ГОСТ 2.105-95 ЕСКД. Общие требования к текстовым документам.

2. ГОСТ 7.32-2001 СИБИД. Отчет о научно-исследовательской работе. Структура и правила оформления.

3. ГОСТ 7.1-2003 СИБИД. Библиографическая запись. Библиографическое описание. Общие требования и правила составления.

Пояснительная записка выполняется одним из следующих способов: рукописным или на компьютере. Поля на странице задаются следующие: слева – 30 мм, справа – 10 мм, сверху и снизу – 20 мм.

Терминология и определения в пояснительной записке должны быть едиными и соответствовать установленным стандартам, а при их отсутствии – общепринятым в научно-технической литературе.

Текст должен состоять из разделов и подразделов. Разделы должны иметь порядковые номера. Номер подраздела состоит из номеров раздела и своего собственного, разделенных точкой. Разделы и подразделы должны иметь заголовки. Заголовки должны быть краткими и отражать содержание раздела или подраздела, соответственно. Их записывают с прописной буквы, без точки в конце, не подчёркивая. Переносы слов в заголовках не допускаются. Если заголовок состоит из двух предложений, то их разделяют точкой.

В тексте необходимо указать источники и материалы, которые использовались при её написании. Для этого в ссылке, которую приводят в квадратных скобках в строку с текстом документа, указывают порядковый номер источника и страницы. Сведения разделяют запятой.

В записке используется сквозная нумерация страниц и приложений, входящих в её состав. Страницы нумеруются, начиная с титульного листа.

Термины и определения понятий, используемые в записке должны быть едиными и соответствовать стандартам, а при их отсутствии общепринятым в научно-технической литературе.

В тексте пояснительной записки не допускается:

- применять для одного и того же понятия различные научно-технические термины, близкие по смыслу (синонимы), а также иностранные слова и термины при наличии равнозначных на русском языке;

- сокращать обозначения единиц физических величин, если они употребляются без цифр, за исключением их использования в головках и боковиках таблиц и в расшифровках буквенных обозначений, входящих в формулы и рисунки;

- применять сокращение слов, кроме установленных правилами русской орфографии, пунктуации, а также соответствующих государственным стандартам;

- использовать в тексте математический знак минус (–) перед отрицательными значениями величин (необходимо писать слово «минус»);
- употреблять математические знаки без цифр, например: \leq (меньше или равно), \geq (больше или равно), \neq (не равно), а также знаки № (номер), % (процент);
- применять индексы стандартов (ГОСТ, ОСТ, СТП) без регистрационного номера;
- использовать обороты разговорной речи, техницизмы, профессионализмы;
- употреблять произвольные словообразования.

Формулы, уравнения. Расчетные уравнения и формулы приводятся сначала в общем виде, затем в них подставляют численные значения величин и записывают результат расчета с указанием размерности. Все расчеты должны быть выполнены в международной системе единиц СИ.

Оформление иллюстраций. Все иллюстрации (графики, схемы) именуются рисунками. Они должны быть связаны с текстом и содержать подрисуночную подпись. Рисунок располагают в работе после первого упоминания его в тексте или на следующей странице. Все рисунки имеют сквозную нумерацию в пределах раздела. Каждая подрисуночная подпись содержит номер рисунка. Точку после подписи не ставят, а слово «Рисунок» пишется сокращенно – «Рис. 1».

Оформление таблиц. Размещение и нумерация таблиц в тексте аналогично рисункам. Номер помещается справа над таблицей и сопровождается полным словом «Таблица». У всех таблиц должны быть заголовки. Таблицу необходимо располагать в записке непосредственно после текста, в котором она упоминается.

3. ПРИМЕР РАЗРАБОТКИ СИСТЕМЫ ПОДДЕРЖАНИЯ ЗАДАННОЙ СКОРОСТИ МОДЕЛИ ЭЛЕКТРОМОБИЛЯ

3.1. Разработка функциональной схемы системы поддержания заданной скорости модели электромобиля

Структурная схема электропривода электромобиля показана на рис.3.1. В ее состав входят: блок, формирующий задающее воздействие, блок управления, электродвигатель и электромобиль.

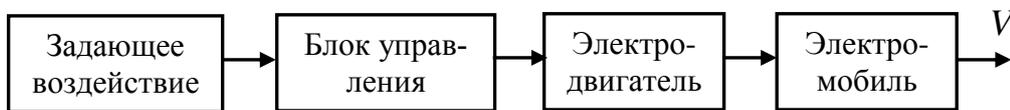


Рис.3.1 Структурная схема электропривода электромобиля

Структурная схема замкнутого электропривода электромобиля с системой стабилизации скорости показана на рис. 3.2. В ее состав дополнительно входит датчик скорости, преобразующий скорость движения электромобиля в электрический сигнал, и вычитающее устройство, формирующее сигнал отклонения в виде разности задающего воздействия и сигнала с датчика скорости.

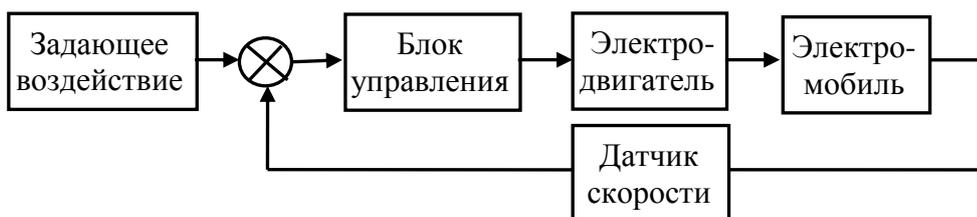


Рис. 3.2 Структурная схема электропривода электромобиля с системой стабилизации скорости

Функциональная схема системы поддержания заданной скорости модели электромобиля (Рис. 3.3) разрабатывается на основе структурной схемы электропривода электромобиля с системой стабилизации скорости.

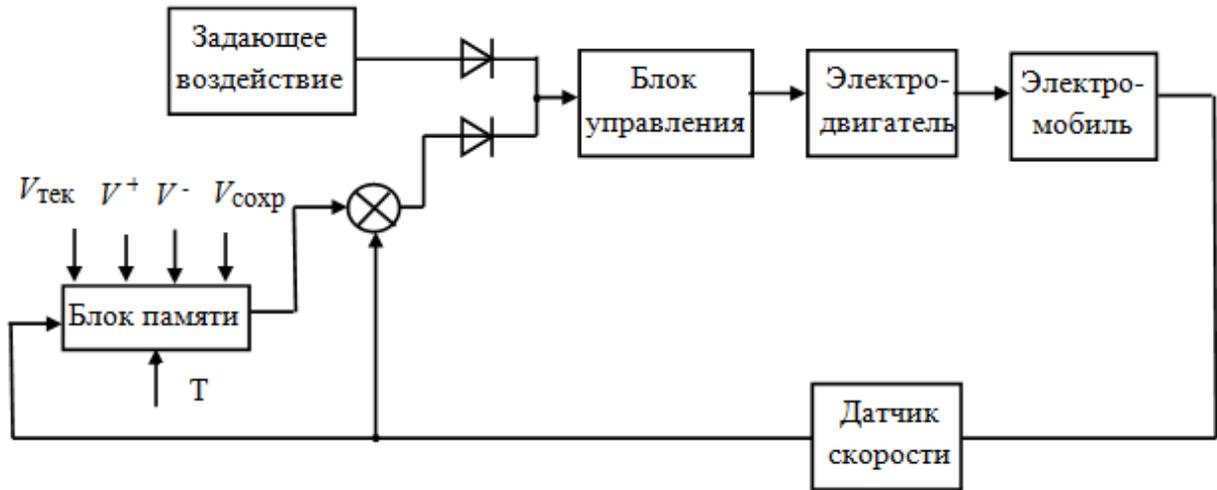


Рис.3.3 Функциональная схема системы поддержания заданной скорости модели электромобиля

В ее состав входит блок памяти, осуществляющий запоминание текущего значения скорости $V_{\text{тек}}$. Кроме этого блок памяти позволяет ступенчато увеличивать V^+ или уменьшать V^- сохраненное значение скорости.

При включении системы поддержания заданной скорости электромобиля образуется замкнутый контур автоматического управления, в котором задающим воздействием является сохраненное в блоке памяти значение скорости электромобиля. Поэтому электромобиль будет двигаться со скоростью, равной сохраненному значению в блоке памяти. При нажатии водителем на педаль тормоза T , сохраненное значение скорости перестает поступать на вычитающее устройство и электромобиль начинает останавливаться. Продолжать движение можно только при нажатии водителем педали акселератора, формирующем задающее воздействие в «ручном режиме».

Возобновление работы замкнутого контура автоматического управления возможно путем активации входа $V_{\text{сохр}}$. При этом электромобиль будет двигаться с скоростью, сохраненной в блоке памяти $V_{\text{сохр}}$. При активации входа $V_{\text{тек}}$ электромобиль продолжит движение в соответствии с новым значением текущей скорости $V_{\text{тек}}$.

3.2. Разработка блока памяти

Блок памяти целесообразно выполнить в виде цифрового устройства, поскольку выполнение запоминающих устройств на аналоговых элементах проблематично.

Контур автоматического поддержания заданной скорости работает в аналоговом режиме, поэтому для работы цифрового блока памяти необходимо осуществить сначала аналого-цифровое преобразование сигнала с датчика скорости, а затем цифро-аналоговое преобразование сохраненного значения скорости для подачи его на аналоговое вычитающее устройство.

Основой цифрового блока памяти служит двоично-десятичный реверсивный счетчик К155ИЕ6 (зарубежный аналог – микросхема 74192), условное графическое обозначение которого показано на рис. 3.4. В прямоугольниках рядом с выводами микросхемы К155ИЕ6 приведены обозначения выводов микросхемы 74192.

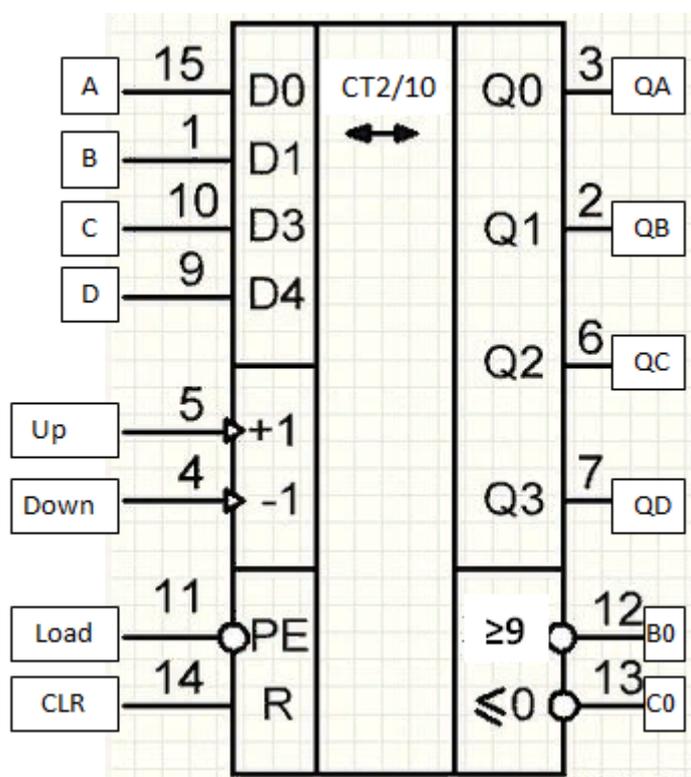


Рис. 3.4. Условное графическое обозначение микросхемы К155ИЕ6

Назначение выводов и таблица режимов работы микросхемы К155ИЕ6 показаны на рис. 3.5.

Назначение выводов K155IE6:		
01	D2	Информационный вход
02	Q2	Выход второго разряда
03	Q1	Выход первого разряда
04	-1	Вход "прямой счёт"
05	+1	Вход "обратный счёт"
06	Q3	Выход третьего разряда
07	Q4	Выход четвертого разряда
08	GND	Общий вывод
09	D4	Информационный вход
10	D3	Информационный вход
11	PE	Строб записи
12	>15	Выход прямого переноса
13	<0	Выход обратного переноса
14	R	Установка "0" (сброс)
15	D1	Информационный вход
16	+Vcc	Плюс питания 5В

PE Таблица режимов K155IE6					
Входы					Режим работы
R	\bar{C}	+1	-1		
1	X	X	X	Установка "0"	
0	0	X	X	Запись информации	
0	1	1	1	Хранение	
0	1	$_$	1	Прямой счёт	
0	1	1	$_$	Обратный счёт	

- 0 - низкий уровень
- 1 - высокий уровень
- X - любое состояние

Рис. 3.5. Назначение выводов и таблица режимов работы микросхемы K155IE5

Модель блока памяти на основе двухразрядного реверсивного счетчика в программе Electronics Workbench показана на рис. 6.

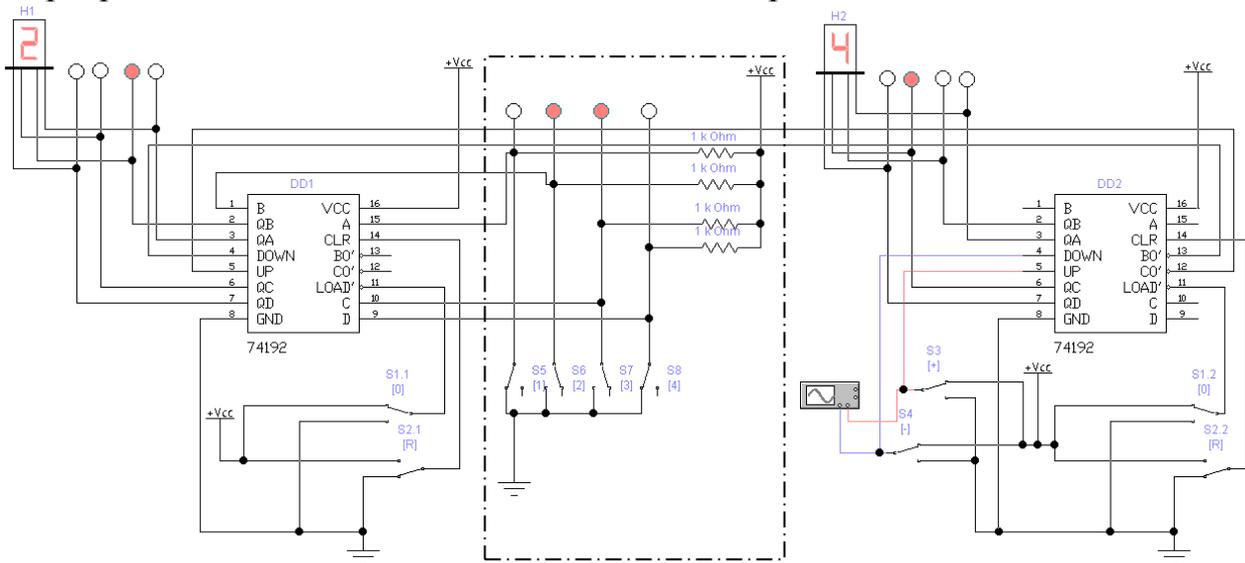


Рис. 3.6. Модель блока памяти на основе двухразрядного реверсивного счетчика

Счетчик собран на микросхемах *DD1* и *DD2*. Для индикации используются семисегментные индикаторы *H1* и *H2*. Назначение кнопок *S1-S8* следующее:

- S1* – предварительная установка счетчика в определенное состояние;
- S2* – сброс счетчика в нулевое состояние;
- S3* – прямой счет импульсов;
- S4* – обратный счет импульсов;

S5 – S8 – установка кода для предварительной записи.

Элементы, выделенные штрихпунктирной линией, предназначены для формирования параллельного кода, необходимого для демонстрации возможности его записи в старшие разряды счетчика.

Модель блока памяти системы поддержания заданной скорости электромобиля, набранная в программе Electronics Workbench показана на рис. 3.7.

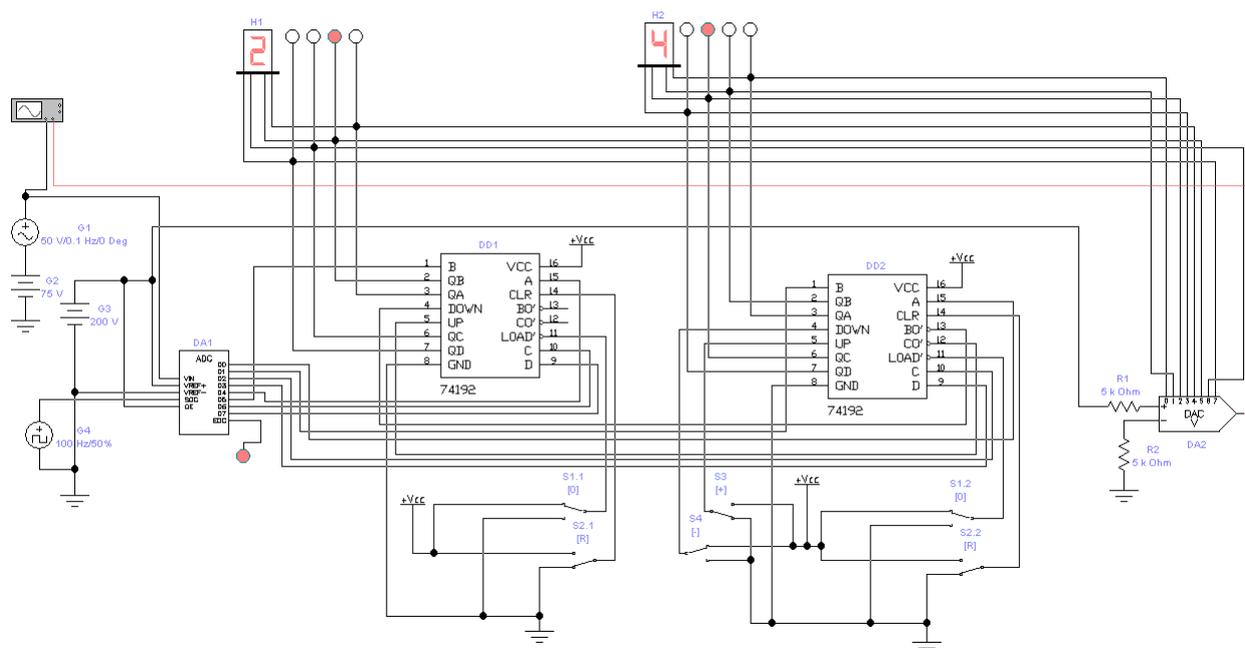


Рис. 3.7. Модель блока памяти системы поддержания заданной скорости электромобиля

На микросхеме DA1 выполнен АЦП, преобразующий аналоговый сигнал с датчика скорости в цифровой код. Источник постоянного напряжения G3, подключенный к выводам $VREF^+$ и $VREF^-$ выполняет функцию опорного напряжения АЦП.

Генератор синусоидальных колебаний G1 имитирует аналоговый сигнал с датчика скорости. Т.к. этот сигнал всегда положительный, поскольку система работает только при движении автомобиля передним ходом, то и имитирующий сигнал также не должен иметь отрицательных значений. Это обеспечивается за счет смещения с помощью источника постоянного напряжения G2, подключенного последовательно с генератором G1.

Генератор импульсов G4 задает частоту преобразования аналогового сигнала в цифровой. Цифровые индикаторы отображают шестнадцатеричный код, полученный из двоичного кода на выходе АЦП.

При нажатии кнопки S1 на вход цифроаналогового преобразователя (DA2) будет поступать цифровой код текущей скорости автомобиля, полученный путем аналого-цифрового преобразования сигнала с датчика скорости $V_{ДС}$.

Из графиков, приведенных на рис.3.8, видно, что сигнал с ЦАП $V_{ЦАП}$ полностью совпадает с сигналом с датчика скорости $V_{ДС}$.

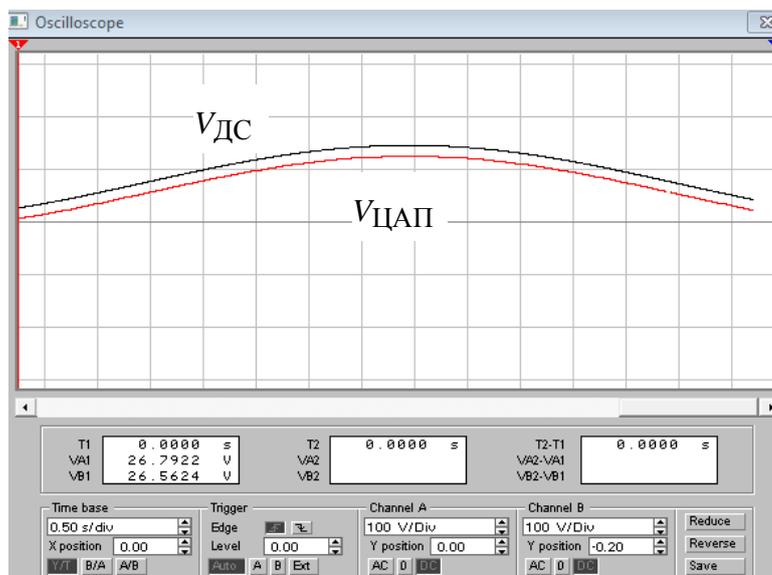


Рис. 3.8. Осциллограммы сигналов $V_{ДС}$ и $V_{ЦАП}$

Запись значения текущей скорости в момент времени t_1 в двухразрядный счетчик осуществляется отпусканием кнопки S1.

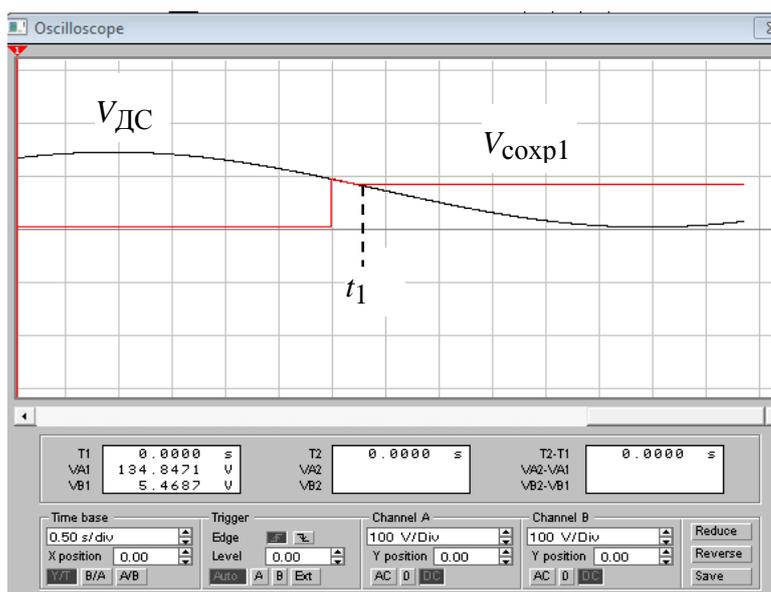


Рис. 3.9. Осциллограммы сигналов $V_{ДС}$ и $V_{ЦАП}$

Цифро-аналоговый преобразователь (DA2) преобразует сохраненное значение текущей скорости в аналоговый сигнал $V_{сохр1}$ (рис.3.9), который будет использоваться в качестве задающего воздействия при работе системы автоматического поддержания скорости электромобиля.

3.3. Расчет требуемой мощности и выбор электродвигателя

3.3.1. Расчет сил, действующих на электромобиль и требуемой мощности электродвигателя

Как видно из модели, показанной на рис. 3.10, в процессе движения на электромобиль действуют три силы:

F_T -сила тяги двигателя,

$F_{тр}$ -сила трения качения,

F_c -сила сопротивления воздуха.

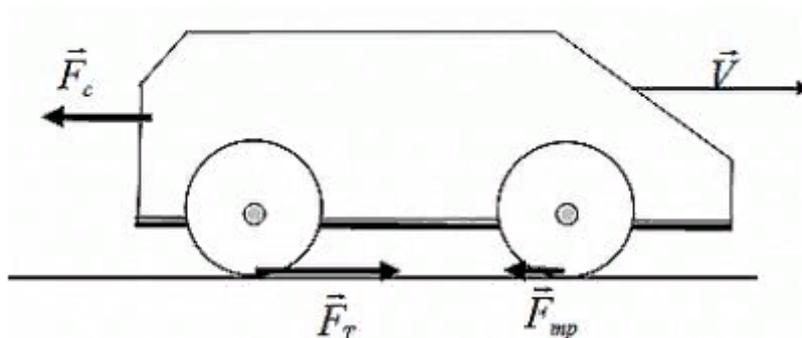


Рис. 3.10. Силы, действующие на электромобиль

Сила тяги тянет автомобиль и силы сопротивления тормозят его. Чтобы автомобиль пришел в движение должно выполняться условие:

$$F_T > F_{тр} + F_c \quad (3.1)$$

Найдём, чему равны эти силы.

$$F_{тр} = \mu \cdot m \cdot g, \quad (3.2)$$

где μ – коэффициент трения качения резина/асфальт,
 m , кг – масса автомобиля,
 $g = 9,8 \text{ м/с}^2$ – ускорение свободного падения.

$$F_c = C_x \cdot S \cdot \rho \cdot V^2 / 2, \quad (3.3)$$

где C_x – коэффициент сопротивления воздуха,

S , м^2 – лобовая площадь электромобиля,

$\rho = 1,29 \text{ кг/м}^3$ – плотность воздуха при нормальных условиях.

V , м/с – скорость электромобиля, м/с .

Если подставим в формулу (1) значения сил из формул (2) и (3), то получим силу тяги, которая необходима для приведения электромобиля в движение.

$$F_T > \mu \cdot m \cdot g + C_x \cdot S \cdot \rho \cdot V^2 / 2. \quad (3.4)$$

Мощность двигателя для движения электромобиля со скоростью V равна

$$P = F_T \cdot V = (\mu \cdot m \cdot g + C_x \cdot S \cdot \rho \cdot V^2 / 2) \cdot V. \quad (3.5)$$

3.3.2 Выбор электродвигателя

В приложении 3 приведены технические данные двигателей серии МИ. Анализ этих данных показывает, что ЭД различных типов с равными значениями номинальной мощности $P_{\text{ном}}$ имеют различные значения частоты вращения $n_{\text{ном}}$, напряжения питания $U_{\text{ном}}$, тока якоря $I_{\text{я}}$, сопротивления обмотки якоря $R_{\text{я}}$, номинального момента $M_{\text{ном}}$ и момента инерции $J_{\text{дв}}$. Поэтому при выборе ЭД необходимо принимать инженерные решения, исходя из условий эксплуатации и технической целесообразности. Так, например, для обеспечения конструктивных требований следует выбирать быстроходные ЭД с малым значением момента инерции $J_{\text{дв}}$. Вместе с тем, для выполнения требований по моменту нужно выбирать менее быстроходный ЭД (с большими габаритами и массой), имеющий большее значение номинального момента $M_{\text{ном}}$.

При выборе напряжения питания необходимо учитывать условия эксплуатации и требования по технике безопасности, предъявляемые к ЭМ.

3.3.3. Построение структурной схемы динамической модели электродвигателя

Для построения ССДМ электродвигателя требуется определить ее параметры:

1. Определение коэффициента противо-ЭДС K_e , В · с/рад

$$K_e = \frac{U_{\text{НОМ}} - I_{\text{я}} R_{\text{я}}}{\Omega_{\text{НОМ}}} \quad (3.6)$$

2. Определение коэффициента момента K_M , Н · м/А

$$K_M = \frac{M_{\text{НОМ}}}{I_{\text{я}}} \quad (3.7)$$

3. Определение электромеханической постоянной времени ЭД T_M , с

$$T_M = \frac{(J_{\text{ДВ}} + \frac{J_{\text{Н}}}{i_0^2}) R_{\text{я}}}{K_e K_M} \quad (3.8)$$

4. Определение электромагнитной постоянной времени ЭД $T_{\text{э}}$, с

$$T_{\text{э}} = \frac{L_{\text{я}}}{R_{\text{я}}} \quad (3.9)$$

При выборе значения индуктивности обмотки якоря необходимо руководствоваться ограничением

$$L_{\text{я}} < \frac{T_M R_{\text{я}}}{4} \quad (3.10)$$

5. Построение ССДМ ЭД.

ССДМ ЭД, набранная в системе Matlab-Simulink, показана на рис. 3.11.

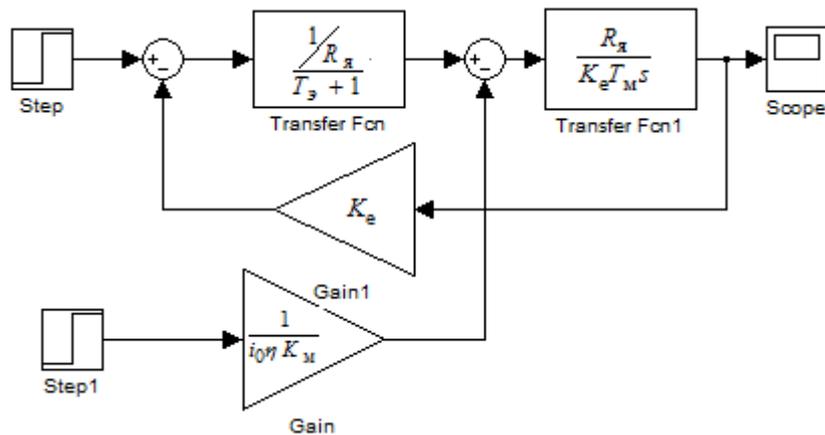


Рис. 3.11. Структурная схема динамической модели электродвигателя

Входные воздействия (номинальное напряжение ЭД $U_{\text{НОМ}}$ и статический момент сопротивления нагрузки $M_{\text{Н}}$) реализуются блоками «Step» и «Step1» соответственно.

Передаточные функции электромагнитной и электромеханической частей ЭД задаются блоками «Transfer Fcn» и «Transfer Fcn1».

Для реализации безынерционных звеньев используются блоки «Gain» и «Gain1».

Момент сопротивления нагрузки $M_{\text{Н}}$ вычисляется по формуле

$$M_{\text{Н}} = \frac{F_{\text{T}} \cdot V}{\Omega} = \frac{(\mu \cdot m \cdot g + C_x \cdot S \cdot \rho \cdot \frac{V^2}{2}) \cdot V}{\Omega} . \quad (3.11)$$

Для получения переходной характеристики линейной скорости движения автомобиля $V[\text{км/час}]$ в структурную схему динамической модели автомобиля (рис. 3.12) необходимо ввести блок Gain 2 с коэффициентом передачи K , величина которого определяется на основании выражения

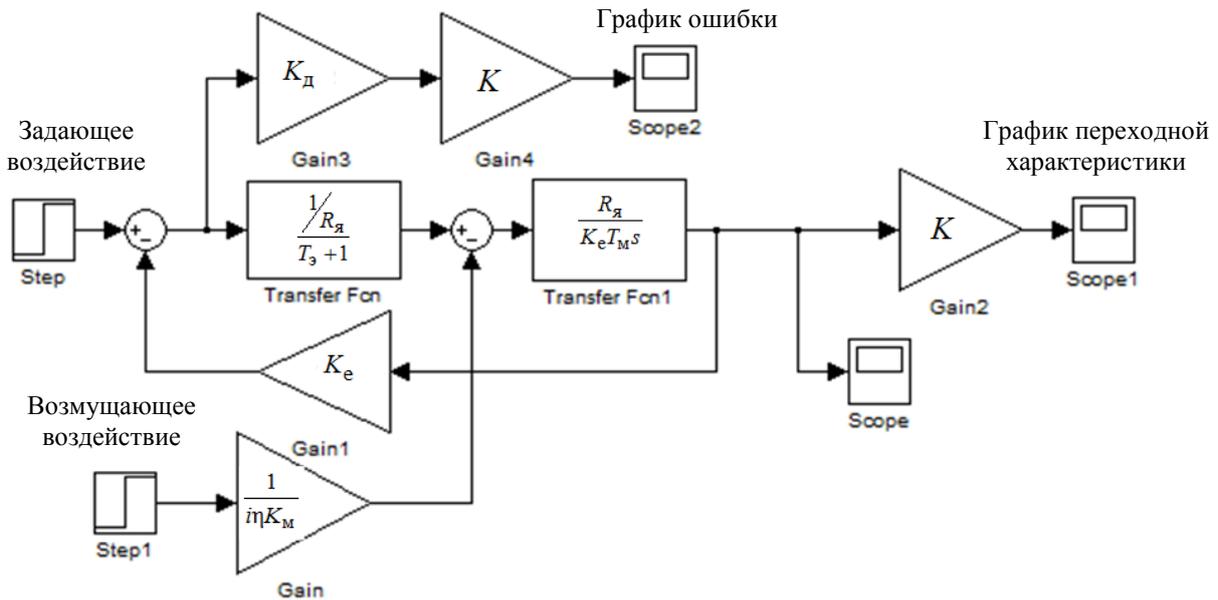


Рис. 3.12. Структурная схема динамической модели автомобиля

$$V[\text{км/час}] = \frac{\Omega[\text{рад/с}]}{2\pi} \cdot l \cdot \frac{3600}{1000} = \frac{\Omega[\text{рад/с}]}{2\pi} \cdot 2\pi r \cdot 3,6 = \Omega[\text{рад/с}] \cdot r \cdot 3,6 = \Omega[\text{рад/с}] \cdot K,$$

где $l = 2\pi r$ – длина окружности колеса, [м],

r – радиус колеса, [м].

$$\text{Получаем } K=3,6r. \quad (3.12)$$

Для получения графика ошибки линейной скорости электромобиля по задающему воздействию в структурную схему динамической модели электромобиля введены блоки Gain 3 (коэффициент передачи двигателя по скорости K_d) и Gain 4 (коэффициент K).

Пример 3.1. Рассчитайте требуемую мощность, выберите электродвигатель и постройте его динамическую модель, если коэффициент трения качения резина/асфальт $\mu = 0,02$; масса автомобиля $m=100$ кг; коэффициент сопротивления воздуха $C_x = 0,4$; лобовая площадь электромобиля $S=0,5$ м²; плотность воздуха при нормальных условиях $\rho=1,29$ кг/м³; скорость электромобиля $V=60$, км/час; радиус колеса $r= 0,1$ м; ускорение свободного падения $g = 9,8$ м/с²; $\eta = 0,9$.

Решение

1. По формуле 3.5 вычисляем требуемую мощность двигателя

$$P = F_T \cdot V = (\mu \cdot m \cdot g + C_x \cdot S \cdot \rho \cdot V^2 / 2) \cdot V = \\ = (0,02 \cdot 100 \cdot 9,8 + 0,4 \cdot 0,5 \cdot 1,29 \cdot 16,67^2 / 2) \cdot 16,67 = 924,3 \text{ Вт.}$$

2. Выбирается ЭД, номинальная мощность на валу которого больше требуемой ($P_{\text{ном}} > P_{\text{тр}}$).

Технические данные ЭД МИ-41 сведены в табл. 3.1.

Таблица 3.1

Технические данные ЭД МИ-22

Тип двигателя	Мощность на валу $P_{\text{ном}}$, кВт	Частота вращения $n_{\text{ном}}$, мин ⁻¹	Напряжение питания $U_{\text{ном}}$, В	Ток якоря $I_{\text{я}}$, А	Сопротивление обмотки якоря $R_{\text{я}}$, Ом	Момент номинальный $M_{\text{ном}}$, Н · м	Момент инерции $J_{\text{дв}} \cdot 10^{-4}$ кг · м ²
МИ-41	1100	1500	220	6,4	1,7	7,15	408

3. Вычисляются параметры динамической модели ЭД в соответствии с выражениями (3.6÷3.10)

Определяется коэффициент противо-ЭДС:

$$K_e = \frac{U_{\text{НОМ}} - I_{\text{я}} R_{\text{я}}}{\Omega_{\text{НОМ}}} = \frac{220 - 6,4 \cdot 1,7}{157} = 1,33 \text{ В} \cdot \text{с/рад.}$$

Определяется коэффициент передачи двигателя:

$$K_{\text{дв}} = \frac{1}{K_e} \cdot \frac{1}{1,33} = 0,752 \text{ рад/В} \cdot \text{с.}$$

Определяется коэффициент момента:

$$K_M = \frac{M_{\text{НОМ}}}{I_{\text{я}}} = \frac{7,15}{6,4} = 1,117 \text{ Н} \cdot \text{м/А}$$

Определяется электрохимическая постоянная времени ЭД:

$$T_M = \frac{(J_{\text{дв}} + \frac{J_{\text{н}}}{i_1^2}) R_{\text{я}}}{K_e K_M} = \frac{(408 \cdot 10^{-4} + \frac{1}{1^2}) \cdot 1,7}{1,33 \cdot 1,117} = 1,19 \text{ с.}$$

Для определения электромагнитной постоянной времени ЭД вычисляется индуктивность якоря

$$L_{\text{я}} < \frac{T_M R_{\text{я}}}{4} = \frac{1,19 \cdot 1,7}{4} = 0,506 \text{ Г.}$$

Принимается $L_{\text{я}} = 0,4 \text{ Г.}$

Тогда $T_{\text{э}} = \frac{L_{\text{я}}}{R_{\text{я}}} = \frac{0,4}{1,7} = 0,235 \text{ с.}$

4. Рассчитываются соответствующие коэффициенты и параметры ССДМ ЭД (см. рис. 3.12).

$$\frac{1}{R_{\text{я}}} = \frac{1}{1,7} = 0,588 \text{ Ом}^{-1};$$

$$\frac{1}{i \eta K_M} = \frac{1}{1 \cdot 0,9 \cdot 1,117} = 0,994 \text{ А/Н} \cdot \text{м};$$

$$\frac{R_{\text{я}}}{K_e T_M} = \frac{1,7}{1,33 \cdot 1,19} = 1,07 \text{ рад/А} \cdot \text{с}^2.$$

5. Рассчитывается коэффициент пересчета K угловой скорости вращения электродвигателя ω [рад/с] в линейную скорость движения автомобиля V [км/час] по формуле (3.12)

$$K=3,6 \cdot r=3,6 \cdot 0,1=0,36.$$

6. Рассчитывается момент сопротивления нагрузки по формуле (3.11)

$$\begin{aligned} M_H &= \frac{F_T \cdot V}{\Omega} = \frac{(\mu \cdot m \cdot g + C_x \cdot S \cdot \rho \cdot \frac{V^2}{2}) \cdot V}{\Omega} = \\ &= \frac{(0,02 \cdot 100 \cdot 9,8 + 0,4 \cdot 0,5 \cdot 1,29 \cdot \frac{16,67^2}{2}) \cdot 16,67}{157} = 5,87 \text{ Н} \cdot \text{м} \end{aligned}$$

С учетом полученных численных значений ССДМ электромобиля принимает вид, изображенный на рис. 3.12.

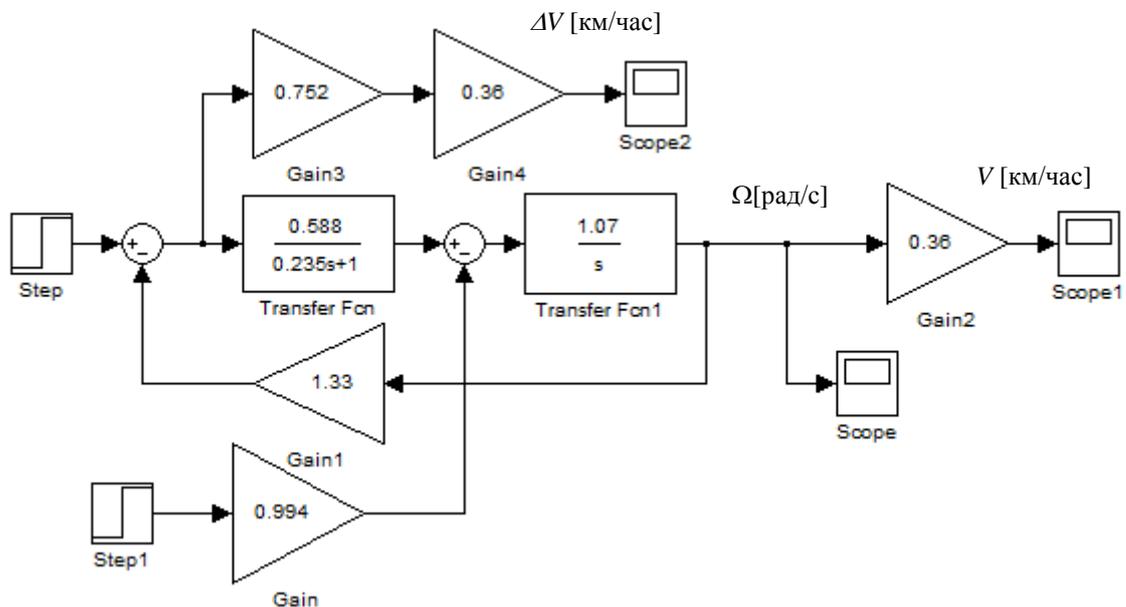


Рис. 3.13. Структурная схема динамической модели электромобиля с числовыми значениями

Строятся графики:
 переходной характеристики по задающему воздействию (рис. 3.14),
 график ошибки по задающему воздействию (рис. 3.15),

график ошибки по возмущающему воздействию (рис. 3.16).

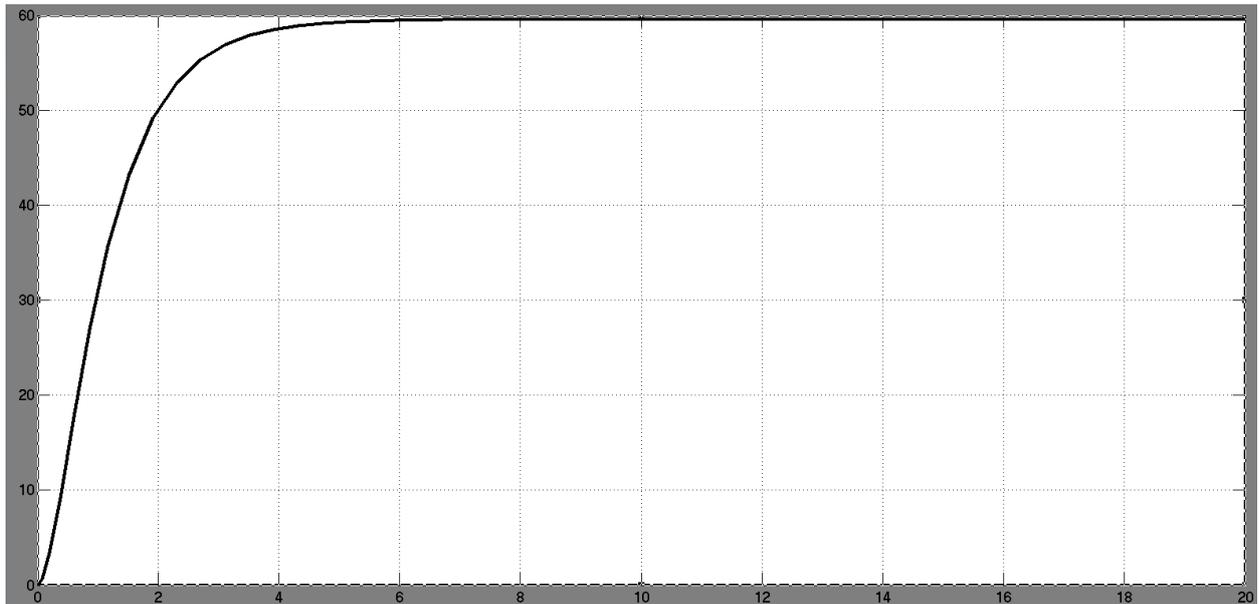


Рис. 3.14. Переходная характеристика скорости электромобиля по задающему воздействию

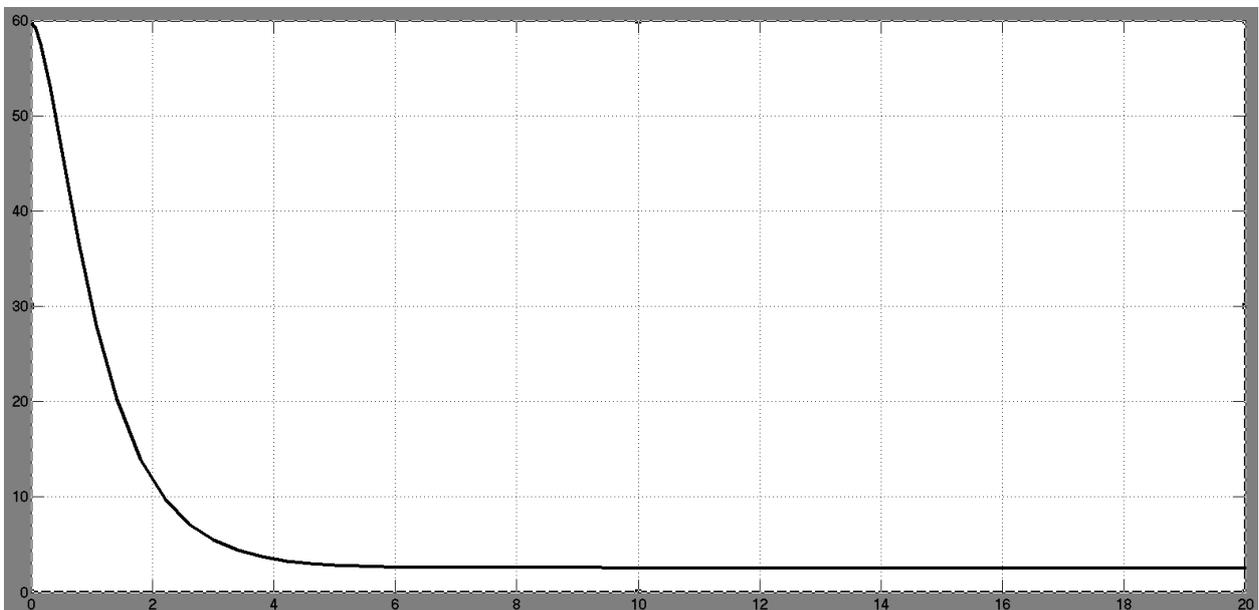


Рис. 3.15. График ошибки скорости электромобиля по задающему воздействию

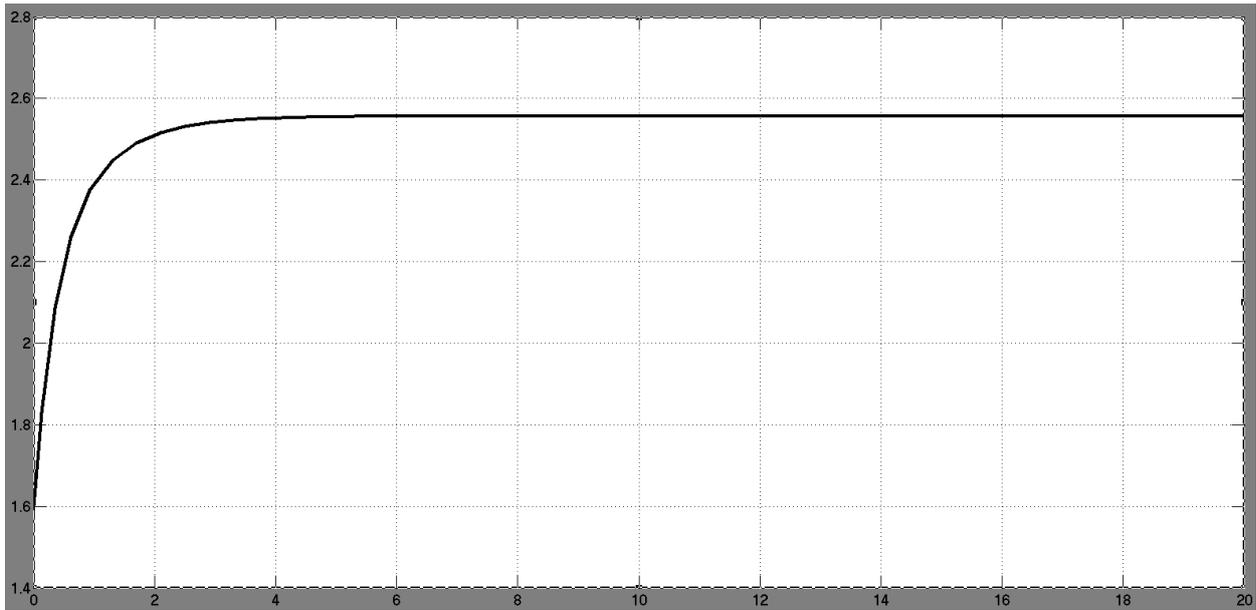


Рис. 3.16. График ошибки скорости электромобиля по возмущающему воздействию

Апериодический характер графиков подтверждает правильность расчёта постоянных времени T_M и T_3 электродвигателя.

Установившиеся значения скорости движения электромобиля при наличии задающего воздействия $V_{уст} = 60$ км/час.

Ошибка по задающему воздействию $\Delta V_{уст} = 2,5$ км/час.

Ошибка по возмущающему воздействию $\Delta V_{уст} = 2,56$ км/час.

Для устранения ошибки по задающему воздействию необходимо сделать систему замкнутой по угловой скорости, включив в отрицательную обратную связь датчик скорости, и настроить контур скорости на оптимум по модулю, обеспечивающий перерегулирование $\sigma = 4,3\%$.

Для устранения ошибки по возмущающему воздействию можно настроить контур скорости на симметричный оптимум. Однако такая настройка нежелательна, поскольку приведет к недопустимо большому перерегулированию $\sigma = 43\%$.

3.4. Синтез регулятора для настройки контура скорости на оптимум модулю

Структурная схема КС, показанная на рис. 3.17., состоит из регулятора скорости; КТ, БП; механической части двигателя; датчика скорости.

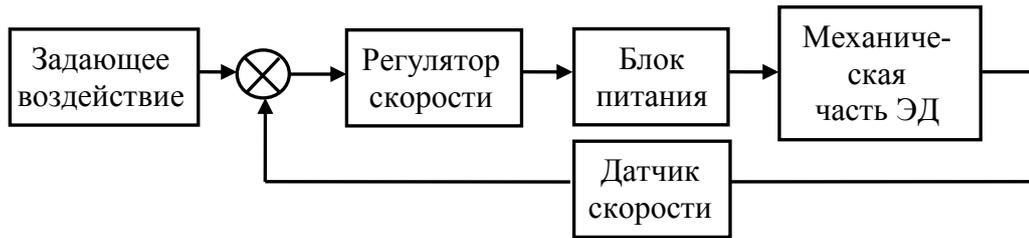


Рис. 3.17. Структурная схема контура скорости

БП, как правило, включает широтно-импульсный преобразователь (ШИП), на выходе которого формируется последовательность импульсов переменной скважности γ , и является существенно нелинейным элементом. Вместе с тем, частота среза КТ находится значительно ниже зоны рабочих частот БП, и, поэтому для решения практических задач полагают, что динамические свойства последнего с большой степенью точности описываются инерционным звеном с передаточной функцией

$$W_{\text{БП}}(s) = \frac{K_{\text{БП}}}{T_{\text{БП}}s + 1}. \quad (3.13)$$

Динамические свойства ТГ можно представить в виде передаточной функции инерционного звена:

$$W_{\text{ТГ}}(s) = \frac{K_{\text{ТГ}}}{T_{\text{ТГ}}s + 1}. \quad (3.14)$$

С учетом выражений (3.13) и (3.14) ССДМ КС примет вид, изображенный на рис. 3.18.

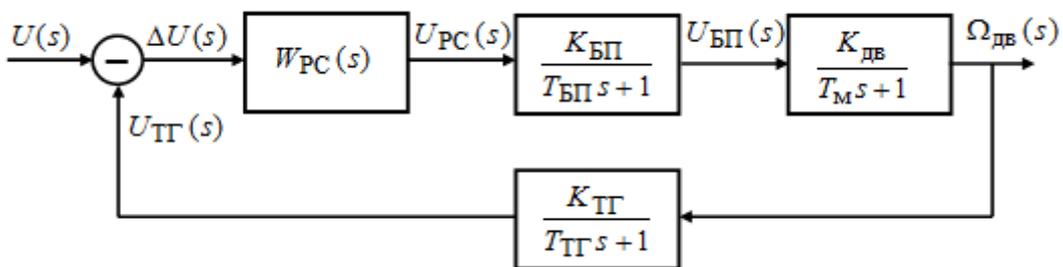


Рис. 3.18. Структурная схема динамической модели контура скорости

3.4.1. Расчет параметров регулятора и построение динамической модели контура скорости

Передаточная функция разомкнутого КС определяется по ССДМ, показанной на рис. 3.18.

$$W_{\text{кс}}(s) = \frac{U_{\text{ТГ}}(s)}{\Delta U_{\Omega}(s)} = W_{\text{рс}}(s) \cdot \frac{K_{\text{БП}}}{T_{\text{БП}}s + 1} \cdot \frac{K_{\text{ДВ}}}{T_{\text{М}}s + 1} \cdot \frac{K_{\text{ТГ}}}{T_{\text{ТГ}}s + 1}. \quad (3.15)$$

При расчете параметров РС постоянные времени $T_{\text{БП}}$ и $T_{\text{ТГ}}$ следует отнести к малым постоянным времени.

Передающая функция КС, настроенного на ОМ, имеет вид

$$W_{\text{КС}}(s) = \frac{1}{2T_{\Sigma}^{\text{КС}} s (T_{\Sigma}^{\text{КС}} s + 1)}, \quad (3.16)$$

где $T_{\Sigma}^{\text{КС}} = T_{\text{БП}} + T_{\text{ТГ}}$ – суммарная малая постоянная времени КС.

Для определения структуры РС необходимо приравнять правые части выражений (3.15) и (3.16)

$$W_{\text{рс}}(s) \cdot \frac{K_{\text{БП}}}{T_{\text{БП}}s + 1} \cdot \frac{K_{\text{ДВ}}}{T_{\text{М}}s + 1} \cdot \frac{K_{\text{ТГ}}}{T_{\text{ТГ}}s + 1} = \frac{1}{2T_{\Sigma}^{\text{КС}} s (T_{\Sigma}^{\text{КС}} s + 1)},$$

тогда

$$W_{\text{рс}}(s) = \frac{(T_{\text{БП}}s + 1) \cdot (T_{\text{ТГ}}s + 1) \cdot (T_{\text{М}}s + 1)}{K_{\text{БП}} K_{\text{ДВ}} K_{\text{ТГ}} 2T_{\Sigma}^{\text{КС}} s (T_{\Sigma}^{\text{КС}} s + 1)} = \frac{(T_{\text{М}}s + 1)}{K_{\text{БП}} K_{\text{ДВ}} K_{\text{ТГ}} 2T_{\Sigma}^{\text{КС}} s}$$

Перепишывая передаточную функцию РС в стандартном виде, получим

$$W_{\text{РС}} = \frac{K_{\text{РС}}(T_{\text{РС}}s + 1)}{T_{\text{РС}}s}, \quad (3.17)$$

где $K_{\text{РС}} = \frac{T_{\text{РС}}}{K_{\text{БП}} K_{\text{ДВ}} K_{\text{ТГ}} 2T_{\Sigma}^{\text{КС}}}$, $T_{\text{РС}} = T_{\text{М}}$,

Полученная передаточная функция РС описывает динамические свойства ПИ-регулятора.

После подстановки полученного значения передаточной функции регулятора скорости (3.17) в ССДМ КС (рис. 3.18), можно получить ССДМ КС с ПИ-регулятором, настроенного на ОМ (рис. 3.19).

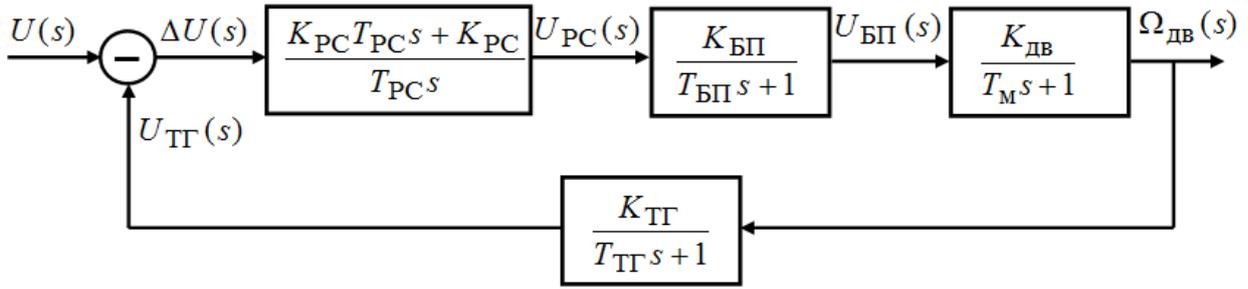


Рис. 3.19. Структурная схема динамической модели контура скорости с ПИ-регулятором

Пример 3.2. Определите параметры РС и постройте динамическую модель КС скоростного следящего ЭП нагрузки с ЭД МИ-41, если задающее воздействие (входное напряжение суммирующего усилителя контура скорости) $U_{\text{ВХ}}^{\text{КС}} = 10 \text{ В}$; постоянная времени ТГ $T_{\text{ТГ}} = 0,05 \text{ с}$.

Решение.

1. Рассчитывается суммарная малая постоянная КС.

$$T_{\Sigma}^{\text{КС}} = T_{\text{БП}} + T_{\text{ТГ}} = 0,05 + 0,05 = 0,1 \text{ с.}$$

2. Вычисляется требуемый коэффициент передачи ТГ по формуле

$$K_{\text{ТГ}} = \frac{U_{\text{ВХ}}^{\text{КС}}}{\Omega_{\text{НОМ}}} = \frac{10}{157} = 0,064 \text{ В} \cdot \text{с/рад.}$$

3. Определяются параметры РС.

$$K_{\text{РС}} = \frac{T_{\text{М}}}{K_{\text{БП}} K_{\text{ДВ}} K_{\text{ТГ}} 2T_{\Sigma}} = \frac{1,19}{30 \cdot 0,752 \cdot 0,064 \cdot 2 \cdot 0,1} = 4,12, \quad T_{\text{РС}} = T_{\text{М}} = 1,19 \text{ с.}$$

4. Определяются передаточная функция РС.

$$W_{\text{РС}} = \frac{K_{\text{РС}}(T_{\text{РС}}s + 1)}{T_{\text{РС}}s} = \frac{4,12(1,19s + 1)}{1,19s} = \frac{4,9s + 4,12}{1,19s}$$

Полученная передаточная функция РС описывает динамические свойства ПИ-регулятора.

5. Рассчитывается коэффициент передачи редуктора

$$K_{\text{Р}} = \frac{1}{i_1} = \frac{1}{1} = 1.$$

ССДМ КС, настроенного на ОМ с числовыми значениями (рис. 3.19) получается после подстановки заданных и рассчитанных числовых значений в ССДМ КС (см. рис. 3.19).

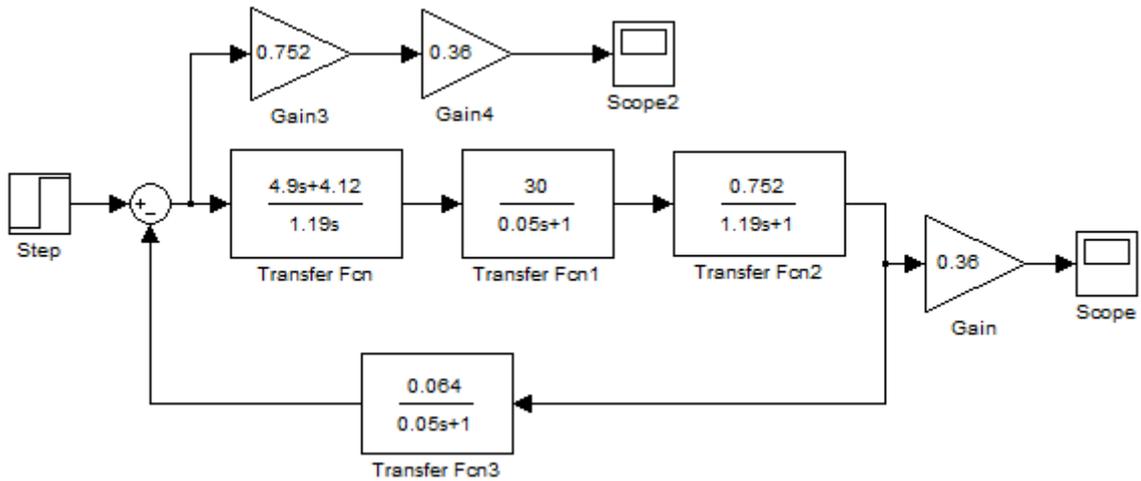


Рис. 3.20. Структурная схема динамической модели контура скорости с числовыми значениями

3.4.2. Моделирование контура скорости и анализ полученных результатов

При моделировании КС необходимо получить графики его переходной характеристики по задающему U_3 воздействию и график ЛЧХ. По результатам моделирования проводится анализ полученных показателей качества.

Пример 3.3. Постройте переходную характеристику КС и график ошибки по задающему U_3 воздействию и ЛЧХ КС с применением моделирующей программы и проведите анализ результатов моделирования. При решении задачи используйте числовые значения параметров и ССДМ примера 3.2.

Решение.

1. Построение переходной характеристики и графика ошибки КС по задающему воздействию.

Значение задающего воздействия принимаем равным $U_{\text{ВХ}}^{\text{КС}} = 10 \text{ В}$.

При этом в блок «Step» устанавливается значение $U_{\text{ВХ}}^{\text{КС}}$. Переходная характеристика КС по задающему воздействию, полученная с помощью блока Scope, показана на рис. 3.21.

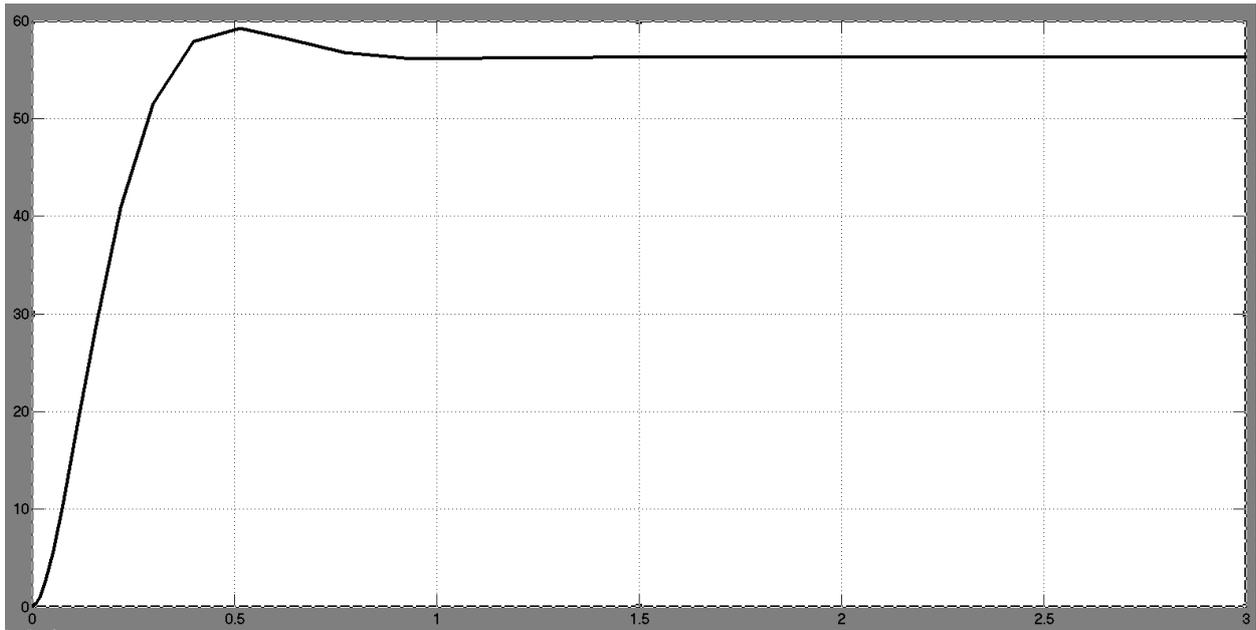


Рис. 3.21. Переходная характеристика контура скорости по задающему воздействию

График ошибки КС по задающему воздействию, полученный с помощью блока Scope 2, показан на рис. 3.21.

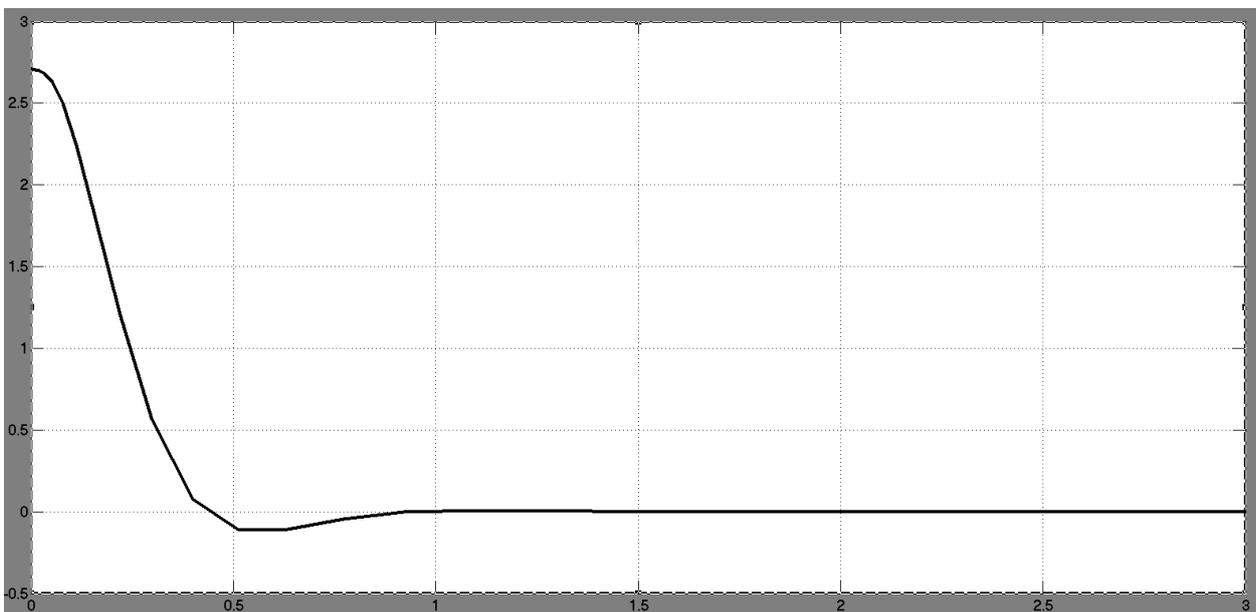


Рис. 3.22. График ошибки контура скорости по задающему воздействию

3. Построение ЛЧХ КС.

Программа для получения ЛЧХ КС принимает вид:

```
>> num1=[4.9 4.12];
den1=[1.19];
sys1=tf(num1,den1)
```

Transfer function:

$$4.9 s + 4.12$$

$$1.19$$

```
>> num2=[30];
den2=[0 .05 1];
sys2=tf(num2,den2)
```

Transfer function:

$$30$$

$$0.05 s + 1$$

```
>> num3=[0.752];
den3=[1.19 1];
sys3=tf(num3,den3)
```

Transfer function:

$$0.752$$

$$1.19 s + 1$$

```
>> num4=[0.064];
den4=[0.05 1];
sys4=tf(num4,den4)
```

Transfer function:

$$0.064$$

$$0.05 s + 1$$

```
>> sys5=sys1*sys2*sys3*sys4
```

Transfer function:

$$7.075 s + 5.949$$

$$0.00354 s^3 + 0.1446 s^2 + 1.535 s + 1.19$$

```
>> w=logspace(-3,5);
bode(sys5,w)
```

ЛЧХ КС показаны на рис. 3.23.

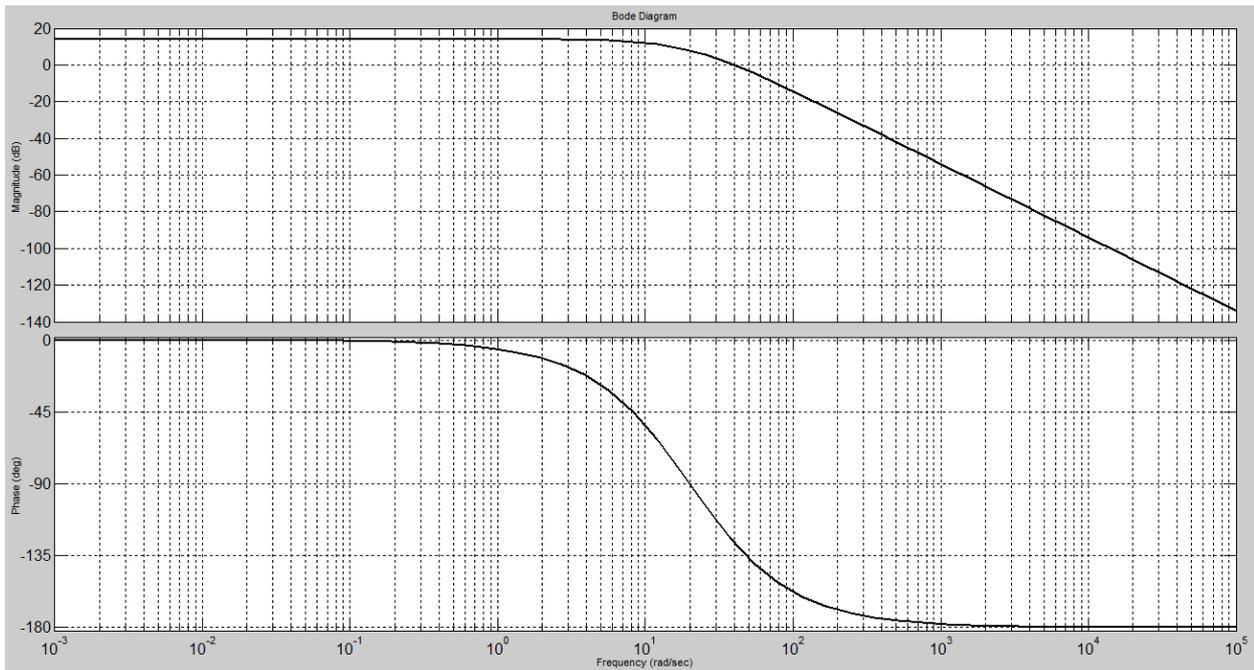


Рис. 3.23. ЛЧХ контура скорости

4. Анализ результатов моделирования

Анализ переходной характеристики КС по задающему воздействию.

Определяется величина перерегулирования $\sigma_{КС}$ и время нарастания $t_{Н}^{КС}$.

Для расчета $\sigma_{КС}$ по рис. 3.19 находится максимальное отклонение угловой скорости вращения вала ЭД

$$\Omega_{\max} = 56,5 \text{ км/час} \quad (3.36)$$

и установившееся значение

$$\Omega_{\text{уст}} = 58,5 \text{ км/час.} \quad (3.37)$$

Вычисляется перерегулирование

$$\sigma_{\text{КС}} = \frac{V_{\text{max}} - V_{\text{уст}}}{V_{\text{уст}}} \cdot 100\% \frac{58,5 - 57}{57} \cdot 100\% = 2,63\%.$$

Время нарастания $t_{\text{н}}^{\text{КС}}$ определяется в первой точке пересечения графика переходной функции и установившегося значения угловой скорости $\Omega_{\text{уст}} = 0,87$ рад/с.

Из графика (рис. 3.21) находится

$$t_{\text{н}}^{\text{КС}} = 0,13 \text{ с.}$$

Проверяется соответствие найденного и расчетного значения

$$t_{\text{н}}^{\text{КС}} = 3,1 T_{\Sigma}^{\text{КС}} = 3,1 \cdot 0,036 = 0,112 \text{ с.}$$

Путем сравнения результатов моделирования и технические требования задания, можно сделать вывод о том, что параметры РС рассчитаны правильно и КС настроен на ОМ.

Анализ графика ошибки по задающему воздействию. Из анализа графика (рис. 3.22) следует, что через одну секунду ошибка сводится к установившемуся значению, равному нулю. Это становится возможным за счет применения в контуре скорости ПИ-регулятора, делающего систему астатической относительно задающего воздействия.

Анализ ЛЧХ.

Значение запаса по фазе

$$\theta_3^{\text{КС}} = 55^\circ.$$

Значение запаса по амплитуде

$$L_3^{\text{КС}} = 75 \text{ дБ}.$$

Запасы устойчивости по фазе и амплитуде соответствуют параметрам контура, настроенным на ОМ.

ЗАКЛЮЧЕНИЕ

В пособии дана целевая установка на выполнение курсовой работы по дисциплине «Системы автоматического регулирования и управления электромобильного транспорта», включающая анализ исходных данных, технических требований к разрабатываемой системе поддержания заданной скорости модели электромобиля и методические указания по проведению необходимых расчетов и моделирования на ПК.

Изложен порядок разработки скоростного следящего одноконтурного электропривода, включающий анализ его структурной схемы и технических характеристик, а также разработку его функциональной схемы.

Подробно описан расчет электродвигателя, параметров его динамической модели. Большое внимание уделено рассмотрению порядка настройки системы путем синтеза регулятора для настройки контура скорости на симметричный оптимум.

Исследование структурных схем динамической модели электродвигателя и контура скорости проведено на основе анализа соответствующих переходных и логарифмических частотных характеристик, полученных с использованием системы Matlab-Simulink.

СПИСОК РЕКОМЕНДУЕМОЙ ЛИТЕРАТУРЫ

1. Системы автоматического регулирования и управления : практикум : в 2 частях / сост.: В. М. Бутаков [и др.]. - 2-е изд., перераб. и доп. - Казань : КГЭУ, 2022. - Текст : электронный.

Ч. 1. - 2022. - 79 с. - URL: <https://lib.kgeu.ru/> 426эл

2. Системы автоматического регулирования и управления : практикум : в 2 частях / сост. В. М. Бутаков [и др.]. - Казань : КГЭУ, 2022. - Текст : электронный.

Ч. 2. - 2022. - 84 с. - URL: <https://lib.kgeu.ru/>. - ~Б. ц. 448эл

3. Кудинов, Ю. И. Теория автоматического управления (с использованием MATLAB — SIMULINK) : учебное пособие для вузов / Ю. И. Кудинов, Ф. Ф. Пащенко. — 4-е изд., стер. — Санкт-Петербург : Лань, 2021. — 308 с. — ISBN 978-5-8114-5520-1. — Текст : электронный // Лань : электронно-библиотечная система. — URL: <https://e.lanbook.com/book/176901> (дата обращения: 17.05.2023). — Режим доступа: для авториз. пользователей.

СОДЕРЖАНИЕ

Введение.....	3
1. Задание и исходные данные для выполнения курсовой работы.....	4
2. Требования к содержанию и оформлению курсовой работы.....	6
2.1. Структура пояснительной записки.....	6
2.2. Оформление пояснительной записки.....	6
3. Пример разработки системы поддержания заданной скорости модели электромобиля	9
3.1. Разработка функциональной схемы системы поддержания заданной скорости модели электромобиля.....	9
3.2. Разработка блока памяти	10
3.3. Расчет требуемой мощности и выбор электродвигателя.....	15
3.3.1. Расчет сил, действующих на электромобиль и требуемой мощности электродвигателя	15
3.3.2. Выбор электродвигателя	16
3.3.3. Построение структурной схемы динамической модели электродвигателя	16
3.4. Синтез регулятора для настройки контура скорости на оптимум модулю	23
3.4.1. Расчет параметров регулятора и построение динамической модели контура скорости	24
3.4.2. Моделирование контура скорости и анализ полученных результатов	26
Заключение	31
Список рекомендуемой литературы.....	32
Приложение 1. Бланк задания для выполнения курсового проекта	33
Приложение 2. Варианты исходных данных	34

Исходные данные

№ П/П	V, км/час	R, м	C_x	S_2 , м ²	m, кг	$U_{ВХ}^{КС}$, В	$K_{БП}$	$T_{БП}$, с	$T_{ТГ}$, с	η
1	2	3	4	5	6	7	8	9	10	11
1	25	0,1	0,40	0,5	100	3	10	0,08	0,08	0,80
2	30	0,1	0,41	0,5	110	4	12	0,07	0,07	0,85
3	35	0,1	0,42	0,5	120	5	14	0,08	0,08	0,90
4	40	0,1	0,43	0,5	130	6	16	0,05	0,05	0,90
5	45	0,1	0,44	0,5	140	7	18	0,06	0,06	0,90
6	50	0,1	0,45	0,5	150	8	20	0,07	0,07	0,92
7	55	0,1	0,46	0,5	160	10	22	0,08	0,08	0,82
8	60	0,1	0,47	0,5	170	9	24	0,1	0,1	0,88
9	65	0,15	0,48	0,7	180	11	26	0,08	0,08	0,90
10	70	0,15	0,49	0,7	190	12	28	0,07	0,07	0,85
11	75	0,15	0,50	0,7	200	13	10	0,06	0,06	0,90
12	80	0,15	0,41	0,7	130	14	12	0,05	0,05	0,92
13	85	0,2	0,42	0,7	140	15	14	0,06	0,06	0,88
14	90	0,2	0,43	0,7	150	5	16	0,07	0,07	0,85
15	25	0,1	0,44	0,7	160	6	18	0,08	0,08	0,90
16	30	0,1	0,45	0,7	170	7	20	0,1	0,1	0,92
17	35	0,1	0,46	0,7	180	8	22	0,08	0,08	0,80
18	40	0,1	0,47	0,7	190	9	24	0,07	0,07	0,85
19	45	0,1	0,48	0,7	200	4	26	0,06	0,06	0,82
20	55	0,15	0,49	0,8	110	5	28	0,08	0,08	0,90
21	60	0,15	0,50	0,8	120	10	10	0,06	0,06	0,80
22	65	0,15	0,41	0,8	130	11	12	0,07	0,07	0,87
23	70	0,15	0,42	0,8	140	12	14	0,08	0,08	0,80
24	75	0,15	0,43	0,8	150	13	16	0,1	0,1	0,85
25	80	0,15	0,44	0,8	160	15	18	0,08	0,08	0,90
26	85	0,2	0,45	0,8	170	10	20	0,07	0,07	0,95
27	90	0,2	0,46	0,8	180	9	22	0,06	0,06	0,90
28	50	0,1	0,47	0,8	190	8	24	0,05	0,05	0,92
29	25	0,1	0,48	0,8	200	7	26	0,07	0,07	0,82
30	30	0,1	0,48	0,8	130	6	28	0,08	0,08	0,88

ОБРАЗЕЦ БЛАНКА ЗАДАНИЯ ДЛЯ ВЫПОЛНЕНИЯ КУРСОВОЙ РАБОТЫ

БЛАНК ЗАДАНИЯ

1. Разработайте систему поддержания заданной скорости модели электромобиля с расчетом регулятора скорости и исследуйте его динамическую модель на ПК с использованием системы Matlab-Simulink:

а) разработайте функциональную схему системы поддержания заданной скорости модели электромобиля;

б) рассчитайте требуемую мощность, выберите соответствующий электродвигатель и определите параметры его динамической модели;

в) наберите структурную схему динамической модели (ССДМ) электродвигателя в системе Matlab-Simulink и постройте графики его переходной характеристики и ошибки по задающему воздействию;

г) синтезируйте регулятор для настройки контура скорости на оптимум по модулю;

д) наберите ССДМ контура скорости в системе Matlab-Simulink и постройте графики его переходной характеристики и ошибки по задающему воздействию и графики логарифмических частотных характеристик;

е) разработайте схему устройства для запоминания заданной скорости и смоделируйте его работу в программе Electronics Workbench;

ж) проведите анализ полученных графиков.

2. Оформите разработку системы поддержания заданной скорости модели электромобиля в виде расчетно-пояснительной записки.

Исходные данные

№ п/п	V, км/час	R, м	C _x	S, м ²	m, кг	U _{ВХ} ^{КС} , В	K _{БП}	T _{БП} , с	T _{ТГ} , с	η

Задание выдал _____
Ф.И.О. руководителя подпись

« _____ » _____ 20__ г.

Задание получил _____
Ф.И.О. студента, № группы подпись

Технические данные двигателей серии МИ

Тип двигателя	Мощность на валу $P_{\text{ном}}$, кВт	Частота вращения $n_{\text{ном}}$, мин ⁻¹	Напряжение питания $U_{\text{ном}}$, В	Ток якоря $I_{\text{я}}$, А	Сопротивление обмотки якоря $R_{\text{я}}$, Ом	Момент номинальный $M_{\text{ном}}$, Н · м	Момент инерции $J_{\text{дв}} \cdot 10^{-4}$, кг · м ²
1	2	3	4	5	6	7	8
МИ-31	0,45	3000	60	10,3	0,118	1,45	91,8
	0,37	2000		8,2	-	1,8	
	0,20	1000		4,4	-	1,95	
	0,45	3000	100	5,6	0,345	1,45	
	0,37	2000		4,4	0,757	1,8	
	0,20	1000		2,4	2,5	1,95	
МИ-32	0,76	2500	110	8,2	0,237	2,96	135
	0,45	1500		5,0	0,605	2,92	
	0,37	1000		4,2	1,46	3,6	
	0,76	2500	220	4,1	0,85	2,96	
	0,45	1500		2,5	2,38	2,92	
	0,37	1000		2,1	5,27	3,6	
МИ-41	1,60	2500	110	19,2	0,147	6,25	408
	1,10	1500		13,0	0,42	7,15	
	0,76	1000	220	9,0	1,5	7,4	
	1,60	2500		9,5	0,58	6,25	
	1,10	1500		6,4	1,7	7,15	
	0,76	1000		4,5	3,32	7,4	
МИ-42	3,2	2500	110	36,3	0,06	12,5	662
	1,6	1500		18,2	0,192	10,4	
	1,1	1000	220	12,6	0,435	10,7	
	3,2	2500		18,2	0,239	12,5	
МИ-51	5,0	2500	220	27,2	-	19,4	127
	3,2	1500		17,1	-	20,8	
	1,6	1000		8,7	-	15,6	
МИ-52	7,0	2500	220	37,0	0,065	27,2	153
	4,5	1500		24,0	0,162	29,2	
	2,5	1000		13,1	0,392	24,2	

Учебное издание

ПРОЕКТИРОВАНИЕ ЭЛЕКТРООБОРУДОВАНИЯ
ЭЛЕКТРОМЕХАНИЧЕСКИХ КОМПЛЕКСОВ И СИСТЕМ

Учебно-методическое пособие

Автор: **Бутаков Валерий Михайлович,**

Кафедра электротехнических комплексов и систем КГЭУ

Редактор
Компьютерная верстка

Подписано в печать
Формат 60×84/16. Усл. печ. л. Уч.-изд. л. . Заказ №

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