

МЕЖГОСУДАРСТВЕННОЕ ОБРАЗОВАТЕЛЬНОЕ УЧРЕЖДЕНИЕ
ВЫСШЕГО ОБРАЗОВАНИЯ
«БЕЛОРУССКО-РОССИЙСКИЙ УНИВЕРСИТЕТ»

Кафедра «Техническая эксплуатация автомобилей»

СИСТЕМЫ АВТОМАТИЧЕСКОГО УПРАВЛЕНИЯ НА АВТОМОБИЛЬНОМ ТРАНСПОРТЕ

*Методические рекомендации
к лабораторным работам для студентов специальностей
1-37 01 06 «Техническая эксплуатация автомобилей
(по направлениям)»
и 1-37 01 07 «Автосервис» очной и заочной форм обучения*



Могилев 2023

УДК 62.529
ББК 681.5
С22

Рекомендовано к изданию
учебно-методическим отделом
Белорусско-Российского университета

Одобрено кафедрой «Техническая эксплуатация автомобилей»
«31» августа 2023 г., протокол № 1

Составитель ст. преподаватель А. В. Юшкевич

Рецензент канд. техн. наук, доц. Е. В. Ильюшина

Методические рекомендации предназначены для выполнения лабораторных работ по дисциплине «Системы автоматического управления на автомобильном транспорте» студентами специальностей 1-37 01 06 «Техническая эксплуатация автомобилей» (по направлениям) и 1-37 01 07 «Автосервис» очной и заочной форм обучения.

Учебное издание

СИСТЕМЫ АВТОМАТИЧЕСКОГО УПРАВЛЕНИЯ НА АВТОМОБИЛЬНОМ ТРАНСПОРТЕ

Ответственный за выпуск	О. В. Билык
Корректор	И. В. Голубцова
Компьютерная верстка	М. М. Дударева

Подписано в печать 09.11.2023. Формат 60×84/16. Бумага офсетная. Гарнитура Таймс.
Печать трафаретная. Усл. печ. л. 1,86. Уч.-изд. л. 2,0 . Тираж 36 экз. Заказ № 1193.

Издатель и полиграфическое исполнение:
Межгосударственное образовательное учреждение высшего образования
«Белорусско-Российский университет».
Свидетельство о государственной регистрации издателя,
изготовителя, распространителя печатных изданий
№ 1/156 от 07.03.2019.
Пр-т Мира, 43, 212022, г. Могилев.

© Белорусско-Российский
университет, 2023

Содержание

Введение.....	4
1 Лабораторная работа № 1. Исследование статических характеристик преобразователей частоты вращения валов двигателя.....	5
2 Лабораторная работа № 2. Исследование временных характеристик преобразователя частоты вращения.....	9
3 Лабораторная работа № 3. Исследование частотных характеристик модели подвески автомобиля.....	11
4 Лабораторная работа № 4. Исследование корректирующих элементов систем автоматики.....	13
5 Лабораторная работа № 5. Исследование дифференцирующих элементов систем регулирования.....	17
6 Лабораторная работа № 6. Исследование интегрирующих элементов систем регулирования.....	22
7 Лабораторная работа № 7. Исследование частотных характеристик модели двигателя внутреннего сгорания.....	27
8 Лабораторная работа № 8. Определение статической характеристики нелинейного элемента системы автоматики.....	30
Список литературы.....	32

Введение

Дисциплина «Системы автоматического управления на автомобильном транспорте» является одной из основополагающих при подготовке специалистов высшей квалификации по специальностям 1-37 01 06 «Техническая эксплуатация автомобилей (по направлениям)» и 1-37 01 07 «Автосервис».

В основе изучения систем автоматического управления на автомобильном транспорте и их элементов лежит понимание общих принципов. Поэтому при изучении каждой темы, агрегата, системы, узла или механизма следует добиваться усвоения общих принципов, присущих их функциональному назначению и конструкции. При таком методе изучения вырабатывается способность свободно разбираться во всем многообразии конструктивных форм и особенностей различных систем управления автомобилями и оборудования для их технического диагностирования.

Весьма важным для свободного ориентирования во множестве сходных по назначению и различных по устройству механизмов, деталей и других систем автоматического управления систем является усвоение их классификации по определенным признакам.

Изучение агрегатов, механизмов и систем автоматического управления начинается: с выявления их назначения, классификационных признаков, устройства и принципа действия; с ознакомления требований, которые предъявляются ко всем агрегатам, механизмам и системам, в каких условиях они работают, из каких материалов изготавливаются.

Лабораторные работы проводятся в объеме часов, указанном в рабочей программе данной дисциплины.

Требования к оформлению отчета и его структура. Отчет по выполненной лабораторной работе предоставляется в письменном виде со следующей структурой:

- название лабораторной работы;
- цель лабораторной работы;
- ход выполнения лабораторной работы;
- вывод по выполненной лабораторной работе.

1 Лабораторная работа № 1. Исследование статических характеристик преобразователей частоты вращения валов двигателя

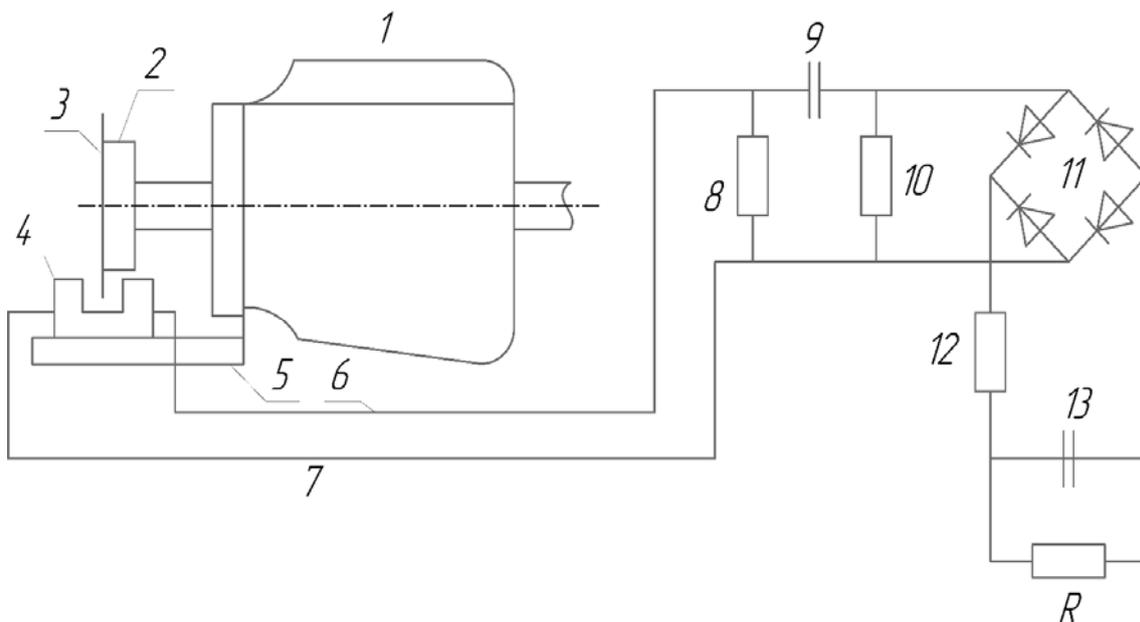
Цель работы: изучить конструкцию, принципы действия и исследование преобразователей частоты вращения вала двигателя внутреннего сгорания.

1.1 Оборудование для выполнения лабораторной работы

Двухканальный электронный цифровой осциллограф АКИП 4115/2А, датчик частоты вращения.

1.2 Общие положения

На рисунке 1.1 приведена схема преобразователя частоты вращения вала двигателя.



1 – двигатель; 2 – шкив; 3 – металлический диск; 4 – датчик КВД-25; 5 – кронштейн; 6, 7 – электрические провода; 8, 10, 12 – резисторы; 9, 13 – конденсаторы

Рисунок 1.1 – Схема преобразователя частоты вращения вала двигателя

На рисунке 1.2 приведена принципиальная схема датчика КВД-25. Датчик состоит из генератора, выполненного на транзисторе VT1, триггера, выполненного на транзисторах VT2, VT3, VT4, и усилителя, собранного на транзисторе VT5. Генератор имеет три катушки индуктивности. При введении в зазор между катушками индуктивности, включенных в цепь базы и коллектора, металлической пластины коэффициент обратной связи уменьшается, происходит срыв колебаний сигнала на выходе генератора. Закрытый до этого момента времени

транзистор VT5 открывается, на резисторе, включенном в цепь его коллектора, происходит ступенчатое изменение напряжения (рисунок 1.3, а, б).

При выходе из зазора металлической пластины коэффициент обратной связи генератора возрастает, колебания повторяются вновь, транзистор VT5 закрывается. На резисторе, включенном в цепь его коллектора, опять происходит изменение уровня напряжения (см. рисунок 1.3, а, б). При периодическом вхождении диска в зазор (см. рисунок 1.1) между катушками индуктивности на резисторе δ (см. рисунок 1.1) формируются периодические импульсные процессы, состоящие из прямоугольных импульсов одинаковой высоты.

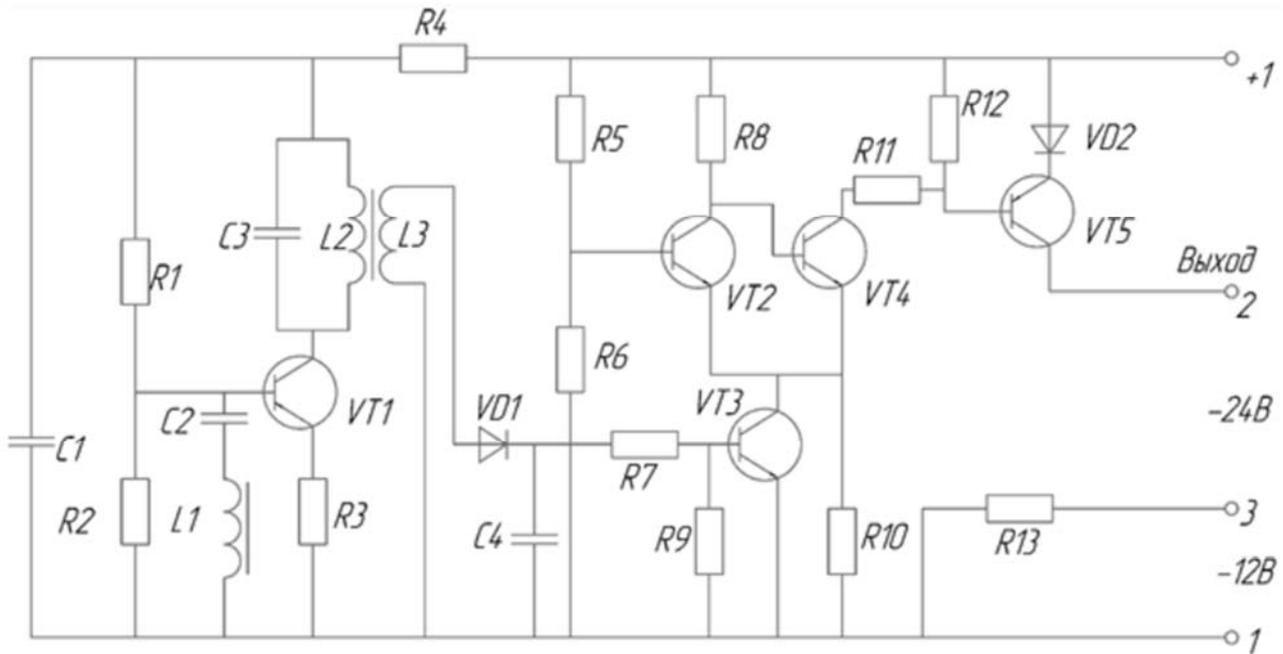


Рисунок 1.2 – Принципиальная схема датчика КВД -25

Таким образом, при вращении вала двигателя (см. рисунок 1.1) с частотой, равной 1200 мин^{-1} , импульсный процесс имеет следующий вид (см. рисунок 1.3, а). Для частоты вращения вала двигателя, равной 2400 мин^{-1} , импульсный процесс представлен на рисунке 1.3, б. Анализ импульсных процессов, изображенных на рисунке 1.3, а, б, позволяет сделать вывод, что все прямоугольные импульсы имеют одинаковую высоту, равную напряжению питания датчика КВД-25 с увеличением частоты вращения вала от 1200 мин^{-1} до 2400 мин^{-1} длительность импульсов уменьшается в 2 раза, частота следования импульсов возрастает в 2 раза.

Так как одним из основных требований к датчику частоты вращения является требование линейности его статической характеристики, т. е. линейности его зависимости напряжения на выходе датчика от частоты вращения вала двигателя при установившемся режиме работы, то в качестве параметра принимается частота следования импульсов.

Импульсы с резистора δ поступают на дифференцирующую цепь, состоящую из конденсатора 9 и резистора 10. На резисторе 10 возникают экспоненци-

альные импульсы, изображенные на рисунке 1.3, *в*, *г*. После выпрямления импульсы становятся однополярными (рисунок 1.3, *д*, *е*). После интегрирования с помощью резистора *I2* и конденсатора *I3* на резисторе *R* нагрузки возникает непрерывный аналоговый сигнал (рисунок 1.3, *ж*, *з*).

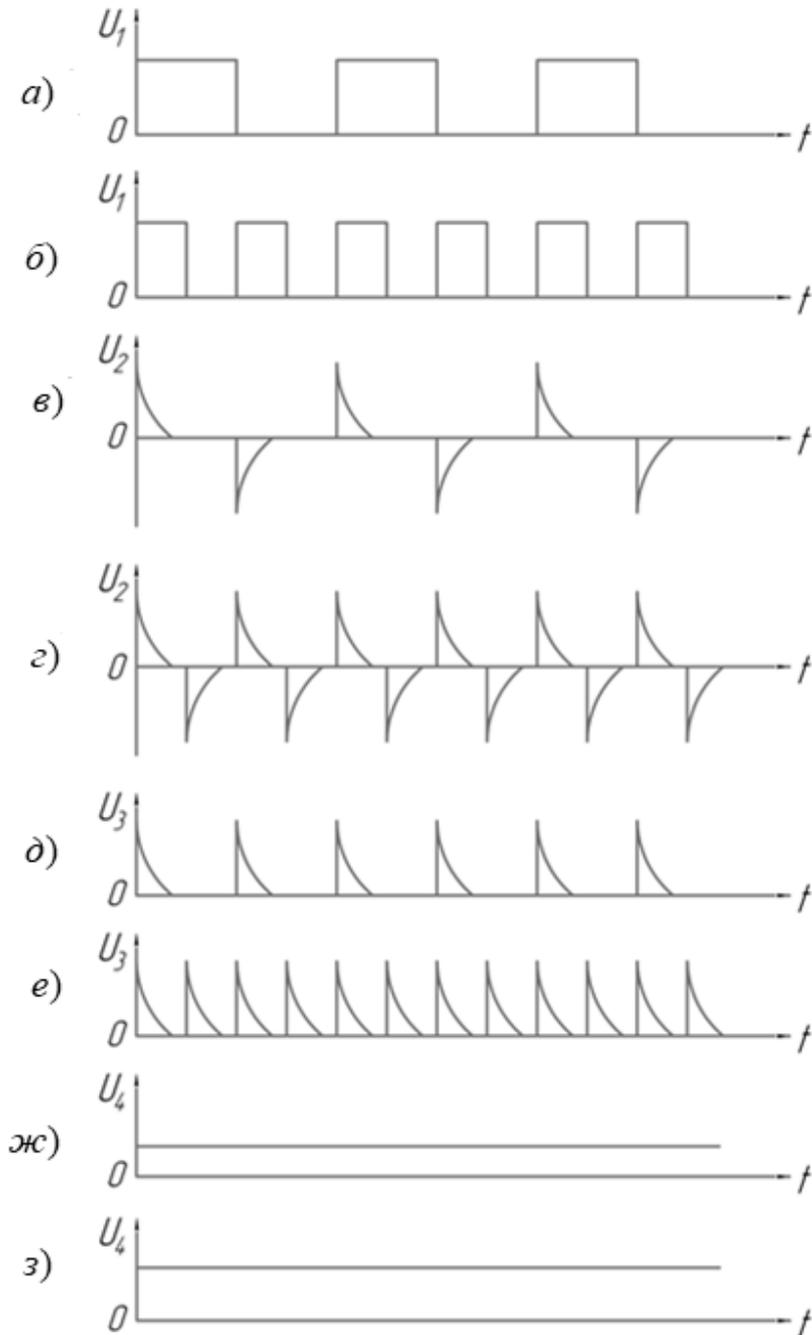


Рисунок 1.3 – Графики сигналов в цепях преобразователя

1.3 Организация работы

Работа рассчитана на 2 ч. Проводится бригадой из двух-трех человек под руководством преподавателя.

Ход выполнения лабораторной работы

1 Изучить принцип действия датчика КВД-25.

2 Изучить преобразователь частоты вращения.

3 Подключить к резистору R электронный осциллограф, получить на его экране осциллограммы сигналов: на резисторе δ , на резисторе 1θ , на резисторе R и зарисовать их в отчет.

4 Установить на стенде КИ-968 частоту вращения вала, равную 1000 мин^{-1} , и произвести отсчет напряжения на выходе преобразователя. Давая с помощью регулятора стенда различные частоты вращения вала, произвести отсчеты сигналов на выходе преобразователя. Заполнить таблицу 1.1.

Таблица 1.1 – Данные для построения характеристики

Номер опыта	1	2	3	4	5	6	7	8	9
$\omega, \text{ мин}^{-1}$	1000	1500	2000	2500	3000	3500	4000	4500	5000
$U, \text{ мВ}$									

1.4 Содержание отчета

1 Описать датчик КВД-25.

2 Описать преобразователь частоты вращения.

3 Описать назначение элементов схемы преобразователя.

4 Построить статическую характеристику.

5 Методом наименьших квадратов получить уравнение экспериментально снятой статической характеристики.

Контрольные вопросы

1 Конструкция преобразователя.

2 Принцип работы преобразователя.

3 Определение статической характеристики преобразователя.

4 Назначение дифференцирующей цепи преобразователя.

2 Лабораторная работа № 2. Исследование временных характеристик преобразователя частоты вращения

Цель работы: изучить динамические свойства преобразователей частоты вращения вала двигателя и трансмиссии.

2.1 Оборудование для выполнения лабораторной работы

Стенд для исследования динамики преобразователя частоты вращения, лабораторный автотрансформатор, двухканальный электронный цифровой осциллограф АКПП 4115/2А.

2.2 Общие положения

В реальных условиях эксплуатации машин момент на валу ДВС и трансмиссии, частота вращения валов ДВС и трансмиссии, мощность на валах машины могут иметь произвольный характер. Для исследования динамических свойств элементов и систем автоматического регулирования и управления ДВС, трансмиссией и другими агрегатами, и процессами, протекающими в машинах, выбираем типовые возмущения, которые по возможности близко отражали бы наиболее существенные особенности реальных возмущений. Наиболее часто типовым входным сигналом является толчкообразное возмущение или ступенчатая функция. Определим две типовые функции возмущения.

Ступенчатая функция – это функция, которая при $t < 0$ равна нулю и при $t > 0$ равна постоянному значению A . Такую функцию обозначают как

$$X_{ex}(t) = A. \quad (2.1)$$

При $A = 1$ функция называется единичной: $X_{ex}(t) = 1(t)$.

Импульсная функция – это функция, определяемая выражением

$$\int_0^t \frac{d[1(t)]}{dt} dt = \int_0^t 1'(t) dt = 1, \quad (2.2)$$

где $1(t)$ – единичная ступенчатая функция;

$1'(t)$ – первая производная единичной ступенчатой функции.

Импульсная функция (или функция Дирака) равна нулю при $t > 0$, а величина ее бесконечно велика при $t = 0$. Площадь ее, определяемая выражением (2.2), равна единице. Импульсную функцию можно определить как предел прямоугольного импульса, у которого высота стремится к бесконечности, а длительность – к нулю.

Изменение во времени регулируемого параметра системы при воздействии на нее ступенчатой функции есть переходная характеристика системы, а изме-

нение во времени регулируемого параметра системы при воздействии на нее импульсной функции есть импульсная переходная характеристика.

2.3 Организация работы

Работа рассчитана на 2 ч. Выполняется группами из двух-трех человек под руководством преподавателя.

Ход выполнения лабораторной работы

1 Собрать схему для исследования динамики преобразователя частоты вращения вала, изображенную на рисунке 1.1.

2 Включить стенд в сеть и установить с помощью регулятора автотрансформатора частоту вращения вала двигателя, равную 1000 мин^{-1} . Затем осуществить торможение вала, приложив к нему тормозной момент, и зарегистрировать переходную характеристику преобразователя частоты вращения вала. Нарисовать ее в отчет.

3 Установить частоты вращения вала двигателя стенда, равные соответственно 1500 мин^{-1} , 2000 мин^{-1} , и повторить опыт, описанный ранее.

4 Данные, полученные в ходе эксперимента, занести в таблицу 2.1.

Таблица 2.1 – Данные, полученные в ходе эксперимента

$t, \text{мс}$	
$n_{\omega}(t)$	

2.4 Содержание отчета

1 Описать стенд для исследования временных характеристик преобразователя частоты вращения вала.

2 Дать определения временных характеристик преобразователя.

3 Построить переходную характеристику преобразователя.

4 Пронормировать переходную характеристику.

5 Аппроксимировать переходную характеристику преобразователя частоты вращения вала методом наименьших квадратов.

Контрольные вопросы

1 Дать определение переходной характеристики преобразователя частоты вращения вала.

2 Дать определение импульсной переходной характеристики преобразователя частоты вращения вала.

3 Из каких устройств и элементов состоит стенд для исследования преобразователя частоты вращения вала?

3 Лабораторная работа № 3. Исследование частотных характеристик модели подвески автомобиля

Цель работы: изучить динамические свойства модели подвески автомобиля.

3.1 Оборудование для выполнения лабораторной работы

Аккумулятор, генератор сигналов, осциллограф электронный, электронная схема модели подвески.

3.2 Общие положения

Динамические свойства подвески автомобиля описываются колебательным звеном, связь между входной и выходной координатами определяется уравнением

$$T_1^2 \frac{d^2 h_{dn}}{dt^2} + T_2^2 \frac{dh_{dn}}{dt} + h_{dn} = kh_{dor} \quad (3.1)$$

или

$$T^2 \frac{d^2 h_{dn}}{dt^2} + 2T \xi \frac{dh_{dn}}{dt} + h_{gn} = kh_{dor}, \quad (3.2)$$

где $T = T_1 = 1/\omega_0$ – постоянная времени звена;

ω_0 – собственная частота колебаний;

$\xi = T_2/2T_1$ – коэффициент затухания звена;

$T = 2\xi/\omega_0$ – постоянная времени звена.

Звено, динамические свойства которого описываются уравнениями (3.1) и (3.2), будет колебательным при выполнении следующего условия:

$$T_2^2 - 4T_1^2 < 0. \quad (3.3)$$

Под входной координатой, если с помощью уравнений (3.1) и (3.2) описываются динамические свойства машин, понимается перемещение днища h_{dn} , под входной координатой h_{dor} – неровности дороги.

Передаточная функция подвески автомобиля, представляющая из себя отношение изображения по Лапласу перемещения днища к изображению по Лапласу неровностей дороги при нулевых начальных условиях, определяется выражением

$$W_{(P)} = \frac{k}{T_1^2 p^2 + T_2 p + 1}. \quad (3.4)$$

Выражение для амплитудно-частотной характеристики подвески

$$|W(i\omega)| = \frac{k}{\sqrt{(1 - \omega^2 T_1^2)^2 + \omega^2 T_2^2}}. \quad (3.5)$$

3.3 Организация работы

Работа рассчитана на 2 ч. Выполняется бригадой из двух-трех человек под руководством преподавателя.

Ход выполнения лабораторной работы

1 Изучить устойчивые колебательные процессы, происходящие в подвеске автомобиля при его эксплуатации, на модели.

2 Собрать схему для исследования динамических свойств подвески согласно рисунку 1.1.

3 Включить генератор и осциллограф в сеть. Установить высоту прямоугольных импульсов генератора, равную 1 В, частоту, равную 0,01 Гц. Получить на экране осциллографа переходную характеристику подвески, зарисовать ее в отчет.

4 Установить амплитуду сигналов синусоидальной формы, равную 1 В. Изменяя угловую частоту этих сигналов от 10 до 100 Гц, измерить амплитуды сигналов на выходе модели подвески. Заполнить таблицу 3.1.

Таблица 3.1 – Данные, полученные в ходе эксперимента

Номер опыта	1	2	3	4	5	6	7	8	9	10
f , Гц	10	20	30	40	50	60	70	80	90	100
ω , рад/с										
$U_{вых}$, В										

5 Используя полученные данные, построить амплитудно-частотную характеристику подвески автомобиля.

3.4 Содержание отчета

1 Привести цель работы и краткое изложение процессов, происходящих в подвеске автомобиля.

2 Построить переходную характеристику подвески, снятую экспериментально, определить из нее коэффициент усиления как отношение установившегося значения на выходе к входному сигналу, частоту колебаний, постоянные времени подвески T_1 и T_2 .

$$\beta = \frac{2\pi}{\tau}, \quad (3.6)$$

где τ – период колебаний, равный времени между двумя соседними максимумами колебания.

Определить также коэффициенты α , T_1^2 , T_2 и T_1

$$\alpha = \frac{1}{\tau} \ln \frac{a_1}{a_2}; \quad T_1^2 = \frac{1}{\alpha^2 + \beta^2}; \quad T_2 = \frac{2\alpha}{\alpha^2 + \beta^2}, \quad (3.7)$$

где a_1 , a_2 – первая и вторая амплитуды колебания.

3 Построить амплитудно-частотную характеристику подвески.

4 Определить коэффициент затухания подвески.

Контрольные вопросы

1 Дать определение переходной характеристики звена автоматики.

2 Дать определение амплитудно-частотной характеристики подвески.

3 Дать заключение по характеру изменения полученной экспериментально переходной характеристики подвески.

4 Прочитать по графику построенной амплитудно-частотной характеристики подвески полученную зависимость, отметить ее характерные точки.

4 Лабораторная работа № 4. Исследование корректирующих элементов систем автоматики

Цель работы: изучить динамические свойства звеньев с корректирующими элементами.

4.1 Оборудование для выполнения лабораторной работы

Аккумулятор, генератор сигналов, осциллограф СИ-54, звенья аperiodическое, пропорционально-дифференцирующее инерционное.

4.2 Общие положения

Быстродействие систем и элементов автоматического регулирования определяется постоянной времени данной системы или элемента. Выражение для передаточной функции аperiodического звена

$$W(p) = \frac{1}{T \cdot p + 1}, \quad (4.1).$$

где 1 – коэффициент усиления звена;

T – постоянная времени этого звена;

p – оператор Лапласа.

При последовательной коррекции структурная схема системы из двух звеньев: исходного апериодического и корректирующего приведена на рисунке 4.1.

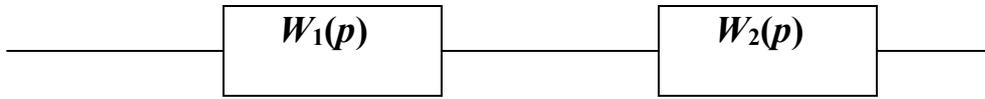


Рисунок 4.1 – Структурная схема системы

Идеальное пропорционально-дифференцирующее звено имеет выражение для передаточной функции

$$W_2(p) = K_n + K_d p, \quad (4.2)$$

где K_n – коэффициент усиления звена составляющей, пропорциональной входной величине;

K_d – коэффициент усиления звена составляющей, пропорциональной первой производной от входной величины.

Влияние пропорционально-дифференцирующего звена на качество переходных процессов определяется передаточной функцией последовательного соединения апериодического и пропорционально-дифференцирующего звеньев

$$W(p) = \frac{K_n + K_d p}{T \cdot p + 1}. \quad (4.3)$$

Соответствующая переходная характеристика имеет выражение

$$h(t) = K_n h_0(t) + K_d h_0'(t). \quad (4.4)$$

На рисунке 4.1 приведены переходные характеристики для нескольких значений коэффициента K_d воздействия по производной. Цифрой 1 обозначена переходная характеристика одного апериодического звена, цифрой 2 – переходная характеристика апериодического звена с корректирующей цепью. Переходная характеристика усиленного звена соответствует отношению коэффициентов усиления пропорционально-дифференцирующего звена K_d / K_n , равному постоянной времени апериодического звена. При выполнении условия $K_d / K_n = T_0$ передаточная функция соединения этих звеньев определяется выражением

$$W_c(p) = \frac{(1 + K_d / K_n \cdot p) K_n K_0}{T_0 \cdot p + 1} = K_n K_0. \quad (4.5)$$

При наличии инерционности в пропорционально-дифференцирующих звеньев передаточная функция определяется выражением

$$W_{\text{пд}}(p) = \frac{K_{\text{п}} + K_{\text{п}} \cdot p}{T_{\text{пд}} \cdot p + 1}, \quad (4.6)$$

где $T_{\text{нд}} \ll K_{\text{д}} / K_{\text{н}}$.

На рисунке 4.2 изображена схема пропорционально-дифференцирующего инерционного звена.

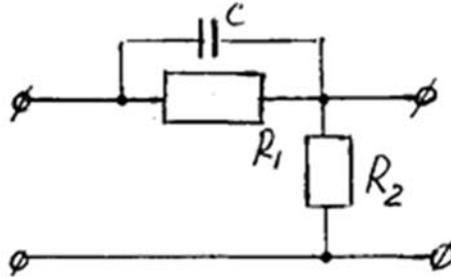


Рисунок 4.2 – Схема пропорционально-дифференцирующего инерционного звена

Передаточная функция системы двух звеньев: апериодического исходного звена и инерционного пропорционального дифференцирующего звена имеет выражение

$$W_c(p) = \frac{(1 + K_{\text{д}} / K_{\text{п}} \cdot p) K_{\text{п}} K_0}{(T_0 \cdot p + 1)(T_{\text{пд}} \cdot p + 1)}. \quad (4.7)$$

При выполнении условия $K_{\text{д}} / K_{\text{н}} = T_0$ будет скомпенсирована постоянная времени T_0 , но сохранится постоянная времени $T_{\text{нд}}$.

4.3 Организация работы

Работа рассчитана на 2 ч. Выполняется бригадой из трех человек под руководством преподавателя.

Ход выполнения лабораторной работы

1 Изучить процессы, происходящие в корректирующих элементах систем автоматического регулирования.

2 Собрать схему для исследования переходных характеристик инерционного пропорционально-дифференцирующего элемента (рисунок 4.3).

3 Включить генератор и осциллограф в сеть. Установить на входе элемента сигнал в виде прямоугольных импульсов заданной длительности, например, 1 с, высота импульсов 1 В. Наблюдать переходную характеристику инерционного пропорционально-дифференцирующего элемента. Заполнить таблицу 4.1.

Таблица 4.1 – Результаты эксперимента

Номер опыта	1	2	3	4	5	6	7	8	9	10
t, c										
$h(t), B$										

В таблицу 4.1 ввести данные о значениях переходной характеристики инерционного пропорционально-дифференцирующего звена через время, равное 0,1 с.

4 Собрать схему, изображенную на рисунке 4.4, и повторить опыт согласно п. 3 данного указания. Заполнить таблицу 4.2, аналогичную таблице 4.1.

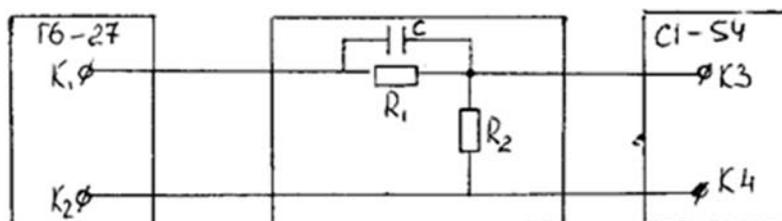


Рисунок 4.3 – Схема для исследования динамических свойств корректирующего элемента

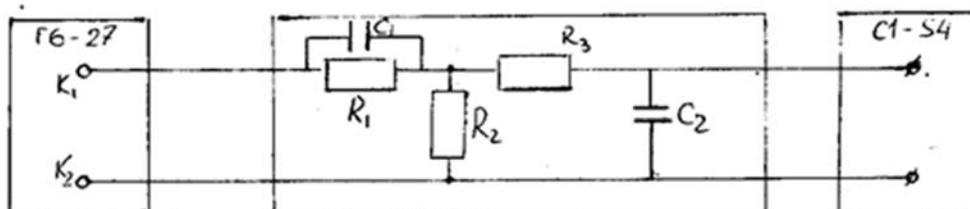


Рисунок 4.4 – Схема системы автоматики с корректирующим элементом

4.4 Содержание отчета

1 Привести цель работы и краткое изложение процессов, происходящих в корректирующих элементах систем автоматического регулирования.

2 Построить переходную характеристику корректирующего элемента.

3 Построить переходную характеристику системы автоматического регулирования, состоящей из апериодического звена и соединенного с ним корректирующего элемента.

4 Дать письменный анализ полученным экспериментальным данным.

5 Письменно сделать выводы полученных результатов.

Контрольные вопросы

1 Изложить методику определения переходной характеристики инерционного пропорционально-дифференцирующего элемента.

2 Какие процессы происходят в инерционном пропорционально-дифференцирующем элементе?

3 Что такое переходная характеристика элемента системы автоматики?

4 Почему с помощью пропорционально-дифференцирующего элемента можно производить коррекцию динамических свойств систем автоматики и отдельных звеньев этих систем?

5 Что получается в результате применения корректирующих элементов?

6 Какие изменения в системе автоматического регулирования?

5 Лабораторная работа № 5. Исследование дифференцирующих элементов систем регулирования

Цель работы: изучить динамические свойства дифференцирующих элементов систем автоматики.

5.1 Оборудование для выполнения лабораторной работы

Аккумулятор, генератор сигналов, цифровой осциллограф АКИП, звено дифференцирующее инерционное.

5.2 Общие положения

На рисунке 5.1 приведена принципиальная схема дифференцирующего элемента систем регулирования. Конструктивно он состоит из последовательного соединения конденсатора и резистора. Ток, протекающий через емкость конденсатора, пропорционален величине этой емкости и производной от приложенного напряжения к конденсатору $i = c dU_c/dt$, а напряжение на выходе этого элемента определяется выражением

$$U_{вых}(t) = iR = CR dU_c/dt. \quad (5.1)$$

Так как напряжение на входе цепи равно сумме напряжений на конденсаторе и на выходе цепи $U_{вх} = U_c + U_{вых}$, то напряжение на конденсаторе равно разности напряжений на входе элемента и на его выходе:

$$U_c = U_{вх} - U_{вых}. \quad (5.2)$$

Дифференцируя выражение (5.2) и подставляя его в выражение (5.1), имеем выражение для напряжения на выходе элемента

$$U_{вых}(t) = CR (dU_{вх}/dt - dU_{вых}/dt). \quad (5.3)$$

Напряжение на выходе элемента будет пропорционально разности производных от напряжения на входе цепи и напряжения на ее выходе. Для того чтобы данная цепь была дифференцирующей, необходимо, чтобы выполнялось условие

$$dU_{вых}/dt \ll dU_{вх}(dt). \quad (5.4)$$

Тогда напряжение на выходе цепи будет пропорционально производной от напряжения на входе цепи:

$$U_{вых}(t) = CR (dU_{вх}/dt). \quad (5.5)$$

В момент появления прямоугольного импульса (рисунок 5.1, б) конденсатор начинает заряжаться, напряжение на нем возрастает (рисунок 5.1, в) по экспоненциальному закону

$$U_c = U_{вх}(1 - e^{-t/CR}). \quad (5.6)$$

Так как напряжение на выходе элемента равно разности напряжений на входе цепи и на конденсаторе, то на резисторе формируется положительный экспоненциальный импульс, равный разности импульсов, изображенных на рисунке 5.1, б, в соответственно. Этот импульс изображен на рисунке 5.1, г, он описывается уравнением, при этом T называется постоянной времени дифференцирующей цепи, которая равна произведению емкости конденсатора исчисляемого в фарадах на сопротивления резистора, исчисляемого в омах:

$$U_{вых} = \frac{1}{T} e^{-\frac{t}{T}}. \quad (5.7)$$

На рисунке 5.1, г приведены положительный и отрицательный экспоненциальные импульсы, т. к. входное напряжение на дифференцирующий элемент является прямоугольным импульсом и по окончании длительности этого прямоугольного импульса происходит дифференцирование также. Так как по окончании длительности прямоугольного импульса напряжение изменяется от величины входного до нуля, производная отрицательна и выходное напряжение в этом случае является отрицательным экспоненциальным импульсом. Полученный первый экспоненциальный импульс на выходе дифференцирующей цепи представляет собой зависимость напряжения на выходе данной цепи во времени при ступенчатом изменении напряжения на ее входе, эта зависимость и есть переходная характеристика дифференцирующей цепи. При этом постоянная времени T может быть определена, если провести касательную от точки характеристики, соответствующей максимальному значению напряжения на выходе до пересечения с осью абсцисс и произвести отсчет значения абсциссы полученной точки пересечения касательной с осью абсцисс.

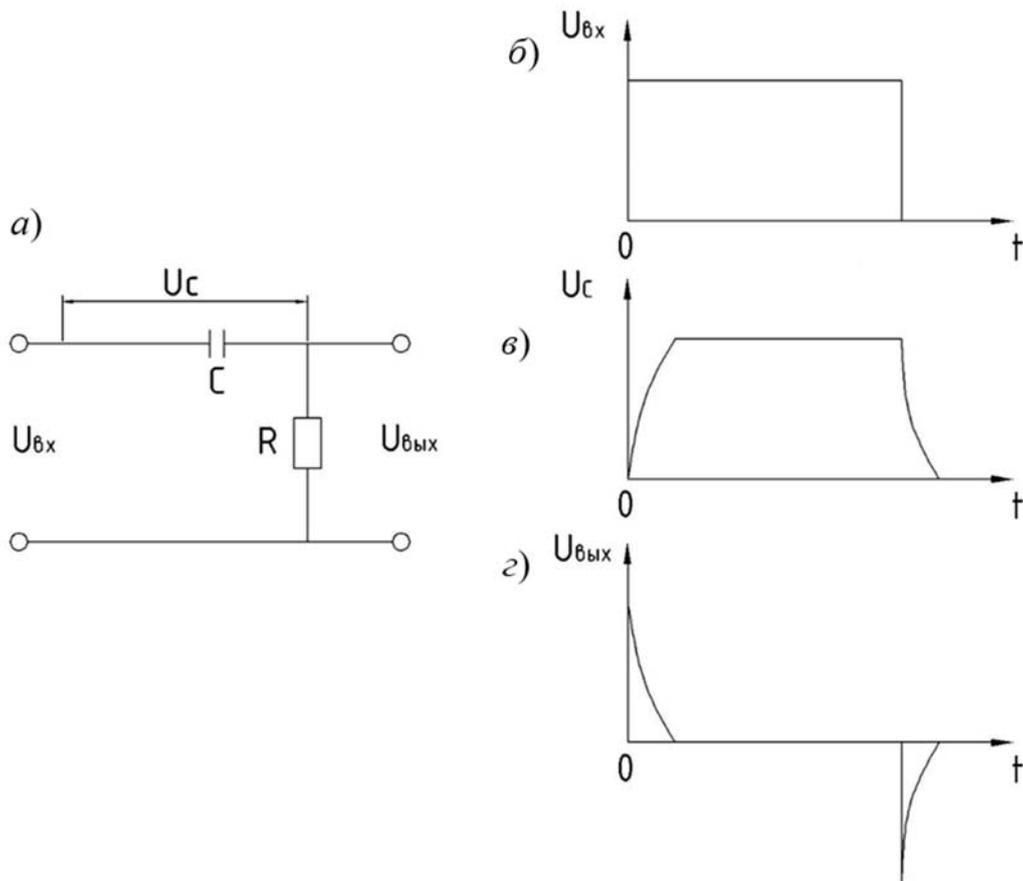


Рисунок 5.1 – Схема дифференцирующего элемента

Передаточная функция дифференцирующего элемента определяется отношением изображения по Лапласу выходной величины к изображению по Лапласу входной величины при нулевых начальных условиях:

$$\frac{U_{\text{вых}}(P)}{U_{\text{вх}}(P)} = W(P) = \frac{R}{R + \frac{1}{CP}} = \frac{RCP}{RCP + 1} = \frac{T_{\text{диф}}P}{T_{\text{диф}}P + 1}. \quad (5.8)$$

5.3 Организация работы

Работа рассчитана на 4 ч. Проводится бригадой из 10–12 человек под руководством преподавателя.

Ход выполнения лабораторной работы

1 Изучить процессы, происходящие над сигналами в дифференцирующей цепи.

2 Собрать схему для исследования дифференцирующей цепи согласно рисунку 5.2.

3 Для экспериментального определения переходной характеристики дифференцирующего элемента соединить выход генератора прямоугольных им-

пульсов со входом дифференцирующего элемента, а выход дифференцирующего элемента соединяем со входом одного из каналов аналогового осциллографа. Переходную характеристику в виде положительного и отрицательного экспоненциальных импульсов зарисовать в отчет и по положительному импульсу определить постоянную времени элемента, проведя касательную к кривой переходной характеристики, первая точка которой соответствует максимальному значению переходной характеристики этой характеристики, и измерив время, при котором эта касательная пересечет ось абсцисс. Значение постоянной времени записать в отчет.

4 Включить генератор и цифровой осциллограф АКПП в сеть. Установить амплитуду сигнала синусоидальной формы равной 1 В. Изменяя частоту от 10 до 90 Гц, измерять амплитуды сигналов на выходе элемента. Заполнить таблицу 5.1. Используя полученные данные, построить амплитудно-частотную характеристику дифференцирующего элемента, при этом по оси ординат отложить отношения амплитуд выходного напряжения к постоянной амплитуде входного напряжения, а по оси абсцисс – угловую частоту в радиан в секунду. Используя амплитудно-частотную характеристику, по ней определить постоянную времени дифференцирующего элемента и сравнить ее значение со значением постоянной времени, определенной по переходной характеристике. Результат сравнения записать в отчет.

Таблица 5.1 – Данные для построения АЧХ

Номер опыта	1	2	3	4	5	6	7	8	9	10	11	12
f , Гц	0	10	20	30	40	50	60	70	80	90	100	200
$U_{вых}$												

5 Собрать схему для определения фазо-частотной характеристики данного элемента согласно рисунку 5.3.

6 Поддерживая амплитуду на входе элемента, равную 1 В, изменяя частоту сигнала от 0 до 5 рад/с через 0,1 рад/с, зарегистрировать фазу выходного сигнала относительно входного. Заполнить таблицу 5.2.

Таблица 5.2 – Данные для построения ФЧХ

Номер опыта	1	2	3	4	5	6	7	8	9	10	11	12
f , Гц	0	10	20	30	40	50	60	70	80	90	100	200
$U_{вых}$												

7 Построить по полученным данным фазо-частотную характеристику дифференцирующего элемента.

5.4 Содержание отчета

1 Привести цель работы и краткое описание процессов, происходящих в дифференцирующем элементе.

2 Построить переходную, амплитудно-частотную и фазо-частотную характеристики дифференцирующего звена.

3 Дать анализ полученным графическим зависимостям.

4 Преобразовать передаточную функцию по выражению (5.8) для получения выражения частотной функции, амплитудно-частотной и фазо-частотной характеристик.

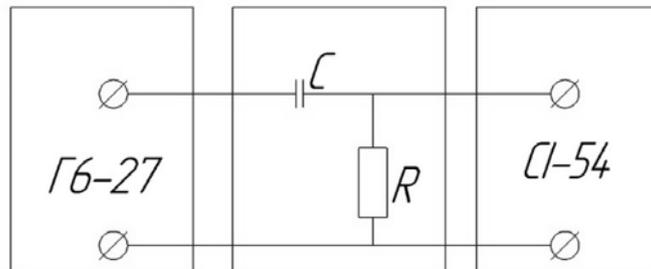


Рисунок 5.2 – Схема для измерения амплитудно-частотной характеристики элементов систем регулирования

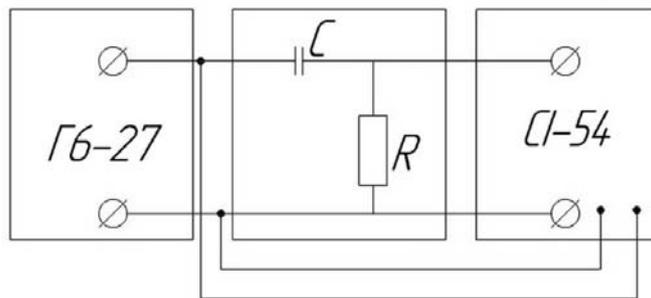


Рисунок 5.3 – Схема для измерения фазо-частотной характеристики элементов систем регулирования

Контрольные вопросы

1 Изложить методику определения частотных характеристик дифференцирующего звена.

2 Охарактеризовать процессы, происходящие в дифференцирующем звене при поступлении на его вход прямоугольного импульса.

3 Дать определение передаточной функции звена.

4 Дать определение амплитудно-частотной характеристики элемента автоматики.

5 Дать определение фазо-частотной характеристики элементов систем регулирования.

6 Лабораторная работа № 6. Исследование интегрирующих элементов систем регулирования

Цель работы: изучить динамические свойства интегрирующих элементов систем регулирования путем определения их переходной и амплитудно-частотной характеристик.

6.1 Оборудование для выполнения лабораторной работы

Аккумулятор, выпрямитель, генератор сигналов, цифровой осциллограф АК ИП-4115/2А, интегрирующий элемент, регулируемый источник постоянного тока.

6.2 Общие положения

На рисунке 6.1, а приведена принципиальная схема интегрирующего элемента, применяемого в системах автоматического регулирования. Конструктивно он состоит из последовательного соединения резистора и конденсатора. Для $U_{вых}(0) = 0$ напряжение на выходе такой цепи

$$U_{вых}(t) = \frac{1}{C} \int_0^t i dt. \quad (6.1)$$

Для такой цепи справедливо равенство

$$U_{вх} = iR + U_{вых}. \quad (6.2)$$

Ток в данной цепи определяется выражением

$$i = \frac{U_{вх} - U_{вых}}{R}. \quad (6.3)$$

Напряжение на выходе интегрирующей цепи, изображенной на рисунке 6.1, а, определяется выражением

$$U_{вых}(t) = \frac{1}{RC} \int_0^t (U_{вх} - U_{вых}) dt. \quad (6.4)$$

Анализ последнего выражения показывает, что для того чтобы данная цепь была интегрирующей, необходимо, чтобы выполнялось условие

$$|U_{\text{вых}}| \ll |U_{\text{вх}}|. \quad (6.5)$$

Тогда напряжение на выходе цепи будет пропорционально интегралу от напряжения на ее входе:

$$U_{\text{вых}}(t) = \frac{1}{RC} \int_0^t U_{\text{вх}} dt. \quad (6.6)$$

Продифференцируем выражение (6.4). Получаем уравнение, при условии $U_{\text{вх}} = k$,

$$RC \frac{dU_{\text{вых}}(t)}{dt} + U_{\text{вых}}(t) = k \cdot 1(t). \quad (6.7)$$

Произведение RC есть постоянная времени $T = RC$ данной цепи, поэтому предыдущее уравнение принимает вид

$$T \frac{dU_{\text{вых}}(t)}{dt} + U_{\text{вых}}(t) = k. \quad (6.8)$$

Полное решение этого уравнения есть сумма частного решения $U_{\text{ч}} = k$ и общего решения $U_{\text{общ}}$, которые находят из уравнения

$$T \frac{dU_{\text{вых}}(t)}{dt} + U_{\text{вых}}(t) = 0. \quad (6.9)$$

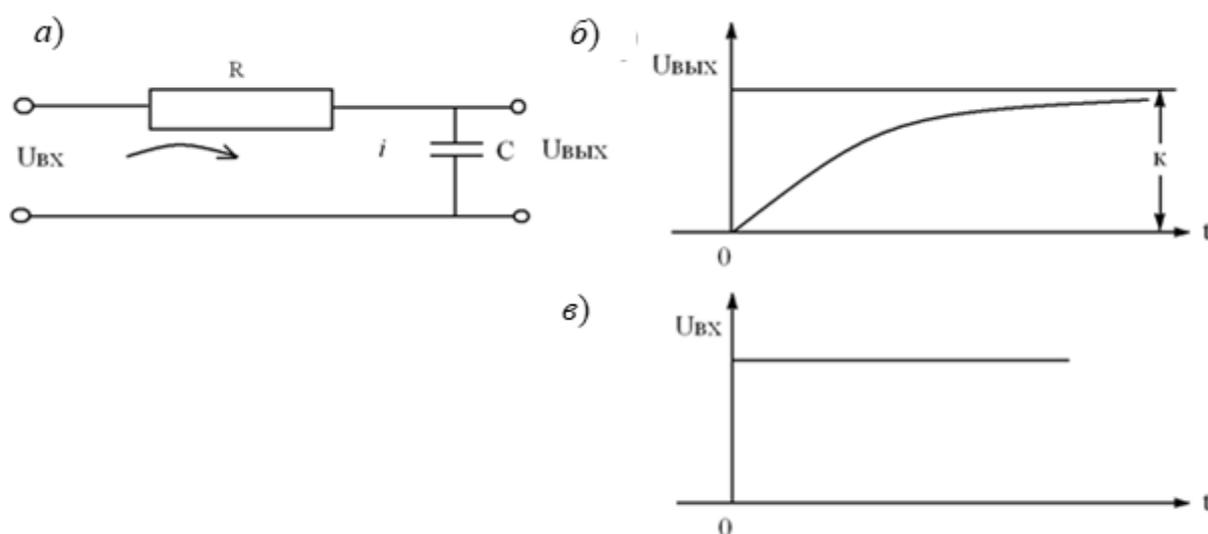


Рисунок 6.1 – Схема интегрирующего элемента, ступенчатая функция и переходная характеристика

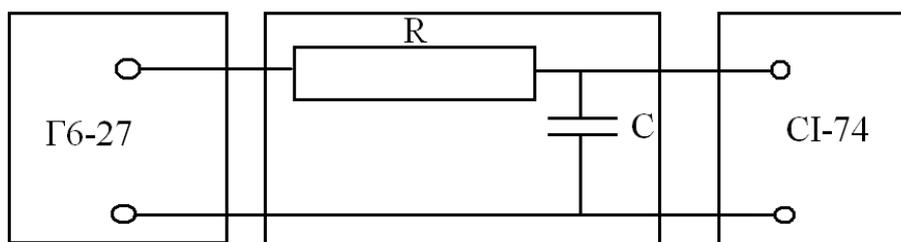


Рисунок 6.2 – Схема для определения характеристик интегрирующего элемента

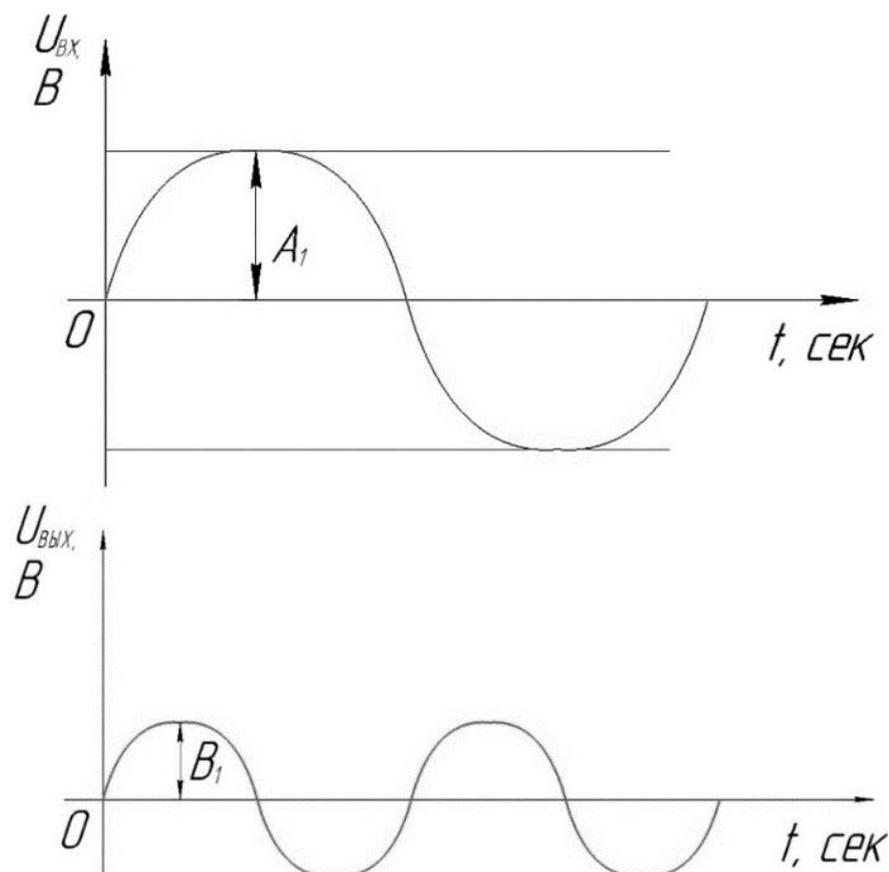


Рисунок 6.3 – Графики синусоидального напряжения на входе и выходе интегрирующего элемента

$$U_{\text{вых}}(t) = k + A \cdot e^{-\frac{t}{T}}. \quad (6.10)$$

Найдем постоянную A , используя начальные условия:

$$U_{\text{вых}}(0) = k + A = 0; \quad A = -k. \quad (6.11)$$

Искомое решение, удовлетворяющее уравнению (6.8), имеет аналитическую запись

$$U_{\text{вых}}(t) = k - k \cdot e^{-\frac{t}{T}} = k \left(1 - e^{-\frac{t}{T}} \right). \quad (6.12)$$

На рисунке 6.1, б изображена ступенчатая функция $U_{\text{вх}}$.

На рисунке 6.1, в изображен график переходной характеристики этого элемента, которая определяется как изменение во времени напряжения на выходе этой цепи при подаче на вход ее напряжения в виде ступенчатой функции. Переходную характеристику строим по формуле (6.12). При выполнении лабораторной работы она также определяется на экране осциллографа.

Передаточная функция интегрирующего звена (элемента) определяется следующим образом:

$$W_{II}(p) = \frac{\frac{1}{Cp}}{R + \frac{1}{Cp}} = \frac{1}{RCp + 1} = \frac{1}{Tp + 1}. \quad (6.13)$$

Выражение для построения амплитудно-частотной характеристики имеет вид

$$W_{II}(p) = \frac{1}{\sqrt{T^2 \omega^2 + 1}}.$$

6.3 Организация работы

Работа рассчитана на 4 ч. Проводится под руководством преподавателя.

Ход выполнения лабораторной работы

1 Изучить процессы, происходящие в интегрирующем элементе систем автоматизации, формулы, характеризующие эти процессы, записать в отчет.

2 Собрать схему для исследования динамических свойств интегрирующего элемента для экспериментального определения его переходной характеристики, соединив выход регулируемого источника постоянного тока со входом интегрирующего элемента, а выход интегрирующего элемента – со входом одного из каналов осциллографа. Переходную характеристику зарисовать в отчет и по ней определить постоянную времени элемента, проведя касательную к началу координат этой характеристики и измерив время, при котором эта касательная пересечет установившееся значение характеристики. Значение постоянной времени записать в отчет.

3 Включить генератор и осциллограф в сеть. Установить амплитуду сигнала синусоидальной формы равной 1 В. Изменяя частоту от 10 до 90 Гц, измерить амплитуды сигналов на выходе элемента. Заполнить таблицу 6.1. Используя полученные данные, построить амплитудно-частотную характеристику ин-

тегрирующего элемента, при этом по оси ординат отложить отношения амплитуд выходного напряжения к постоянной амплитуде входного напряжения, а по оси абсцисс – угловую частоту в радиан в секунду. Используя амплитудно-частотную характеристику, по ней определить постоянную времени интегрирующего элемента и сравнить ее значение со значением постоянной времени, определенной по переходной характеристике. Результат сравнения записать в отчет.

Таблица 6.1 – Данные для построения амплитудно-частотной характеристики

Номер опыта	1	2	3	4	5	6	7	8	9
f , Гц	10	20	30	40	50	60	70	80	90
ω , рад/с									
B/A									

6.4 Содержание отчета

- 1 Привести цель работы и изложение процессов, происходящих в интегрирующем элементе.
- 2 Построить амплитудно-частотную характеристику интегрирующего элемента.
- 3 Дать анализ полученным графическим зависимостям.
- 4 Произвести преобразования выражения для передаточной функции интегрирующего элемента и получить выражения для частотной функции, амплитудно-частотной характеристики.

Контрольные вопросы

- 1 Изложить методику определения переходной и амплитудно-частотной характеристик.
- 2 Дать определение переходной характеристики интегрирующего элемента.
- 3 Дать определение передаточной характеристики интегрирующего элемента.
- 4 Что такое характеристическое уравнение звена или системы автоматике?
- 5 Дать определение амплитудно-частотной характеристики элемента автоматике.

7 Лабораторная работа № 7. Исследование частотных характеристик модели двигателя внутреннего сгорания

Цель работы: изучить динамические свойства интегрирующих элементов систем регулирования путем определения их переходной и амплитудно-частотной характеристик.

7.1 Оборудование для выполнения лабораторной работы

Цифровой осциллограф АКПП-4115/2А, стенд КИ-968, преобразователь импульсный щелевой с дифференцирующим звеном, регулируемый источник постоянного тока.

7.2 Общие положения

Диагностические параметры используют для диагностирования агрегатов и узлов (двигателя, сцепления, коробки передач). Основной – частота вращения коленвала.

Тахогенератор – электрическая машина постоянного тока. Вал тахогенератора соединён с тем валом (или шестерней), частоту вращения которого необходимо измерить. Характеристика тахогенератора представлена на рисунке 7.1.

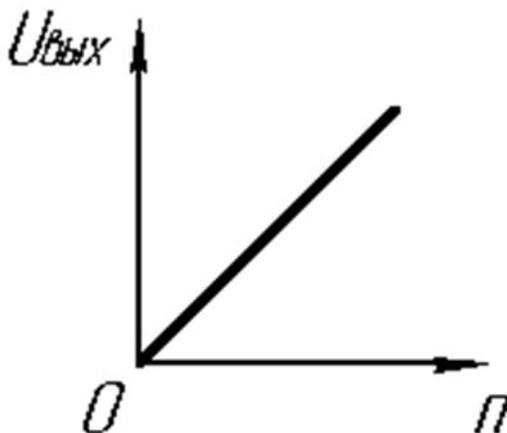


Рисунок 7.1 – Характеристика тахогенератора

Схема импульсного бесконтактного датчика частоты вращения представлена на рисунке 7.2. При этом вал, частоту вращения которого измеряем, свободно вращается, а на нём можно устанавливать тонкий диск с выступами и прорезями, либо если есть шестерня, то можно использовать уже имеющуюся шестерню для измерения частоты вращения.

Преобразователь импульсный щелевой (ПИЩ) выполнен на транзисторном генераторе. Операцию интегрирования этих импульсных процессов с целью получения аналогового сигнала применить нельзя. На выходе дифференцирующей цепи R_2 возникают экспоненциальные импульсы, у которых площадь одинакова при любой частоте вращения вала. Поэтому если мы установим после R_2 интегрирующую цепь, то на выходе всего датчика частоты вращения, например, при 1000 мин^{-1} , будет 1 В, а при 6000 мин^{-1} будет 6 В.

При прохождении выступа диска, закреплённого на шкиве, через щель преобразователя на выходе преобразователя возникает периодическая последовательность прямоугольных импульсов напряжения, длительность которых зависит от частоты вращения коленвала, а высота постоянна.

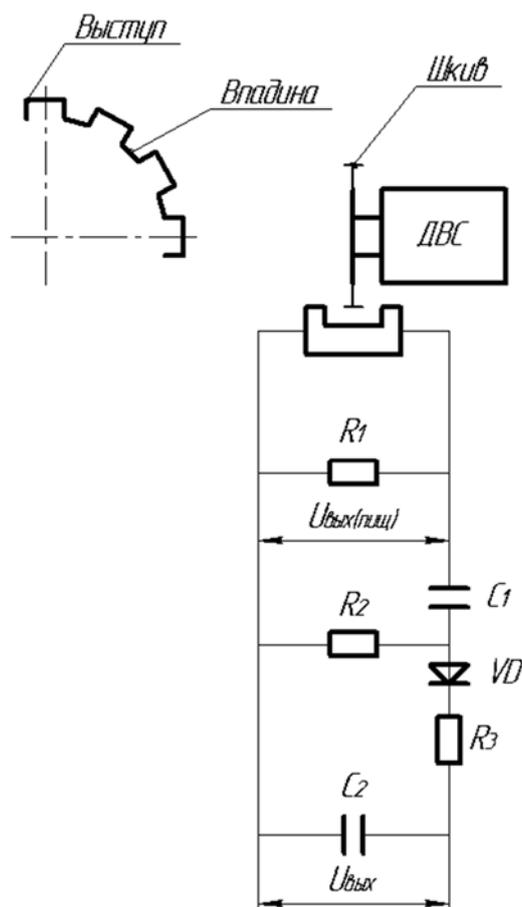


Рисунок 7.2 – Схема импульсного бесконтактного датчика частоты вращения

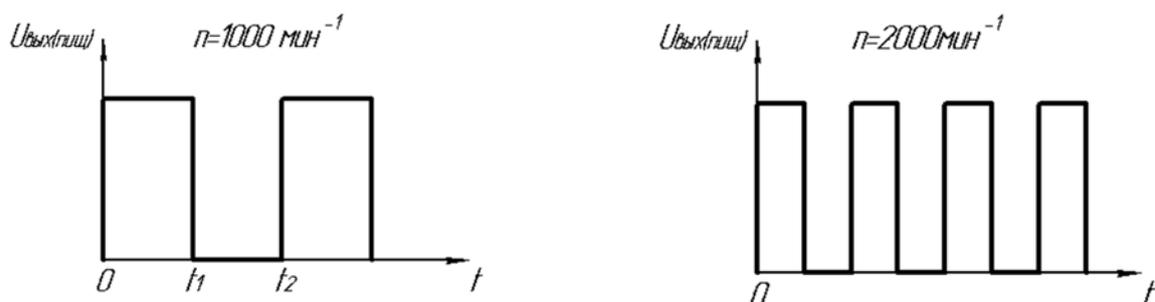


Рисунок 7.3 – Сигналы на выходе преобразователя

Чтобы получился датчик частоты вращения коленвала, необходимо выводом резистора R_1 присоединить дифференцирующую цепь. На её выходе будут идти одинаковые экспоненциальные сигналы.

Постоянная времени дифференцирующего звена определяется по формуле

$$(R_1 + R_2)C_1 = T_1. \quad (7.1)$$

7.3 Организация работы

Работа рассчитана на 2 ч. Проводится бригадой из двух-трех человек под руководством преподавателя.

Ход выполнения лабораторной работы

1 Изучить процессы, происходящие в дифференцирующем элементе систем автоматики, формулы, характеризующие эти процессы, записать в отчет.

2 Определить время и емкость конденсатора при прохождении диска через щель преобразователя выступа или прорези при $R_1 = 5$ кОм, $R_2 = 5,1$ кОм и длительности прямоугольного импульса 5Т.

3 Собрать схему для исследования динамических свойств дифференцирующего элемента для экспериментального определения его амплитудно-частотной характеристики.

Таблица 7.1 – Данные для построения амплитудно-частотной характеристики

Номер опыта	1	2	3	4	5	6	7	8	9
f , Гц	10	20	30	40	50	60	70	80	90
ω , рад/с									
A									

7.4 Содержание отчета

1 Описание схемы импульсного бесконтактного датчика частоты вращения.

2 Назначение элементов схемы.

3 Описание действия обратных связей импульсного бесконтактного датчика частоты вращения.

Контрольные вопросы

1 Принцип действия импульсного бесконтактного датчика частоты вращения.

2 Принцип действия и график напряжений на дифференцирующей цепи.

3 Принцип действия обратной связи.

8 Лабораторная работа № 8. Определение статической характеристики нелинейного элемента системы автоматики

Цель работы: изучить конструкцию и принцип действия реле времени.

8.1 Оборудование для выполнения лабораторной работы

Аккумулятор, выпрямитель, генератор сигналов, цифровой осциллограф АКПП-4115/2А, регулируемый источник постоянного тока, реле времени.

8.2 Общие положения

На рисунке 8.1 приведена схема реле времени на трех транзисторах. На ней обозначены: $R1$ – резистор, обеспечивающий работу транзистора $T1$ с фик-

сированным током базы; транзистор $T1$, включенный по схеме с общим эмиттером; $R2$ – резистор, включенный в цепь коллектора транзистора $T1$; транзистор $T2$, включенный по схеме с общим эмиттером, в цепь коллектора которого включена обмотка электромагнитного реле или электромагнитного клапана управления электрогидравлическим подъемником; $R3$ – резистор, включенный в цепь обратной связи, соединяющей коллектор второго транзистора $T2$ с базой первого транзистора $T1$; $R4$ – переменный резистор, входящий в состав интегрирующей цепи $R4$; $C1$; $R5$ резистор, соединяющий интегрирующую цепь $R4$; $C1$ с базой третьего транзистора обратной полярности (проводимости); $R6$ – резистор, обеспечивающий работу транзистора $T3$ с фиксированным током базы; $R7$ – резистор, включенный в цепь коллектора третьего транзистора и являющийся нагрузкой третьего усилителя, выполненного на транзисторе $T3$.

Сопротивление резистора $R2$ выбираем из условия надёжного открывания первого транзистора, сопротивление резистора обратной связи $R3$ выбираем из условия

$$R3 = \frac{\beta_1 \cdot \beta_2 \cdot R_э}{K^2}, \quad (8.1)$$

где β_1, β_2 – коэффициенты усиления по току первого и второго транзисторов реле времени соответственно;

K – коэффициент запаса, который принимается от 1,5 до 3,0;

$R_э$ – сопротивление электромагнита.

Если входное напряжение реле времени меньше заданного порогового, алгебраическая сумма всех подаваемых на вход первого транзистора сигналов меньше нуля. Протекает ток базы первого транзистора, ток коллектора, поэтому первый транзистор открыт, напряжение на его коллекторе равно нулю, ток базы второго транзистора равен нулю, ток коллектора второго транзистора также равен нулю, второй транзистор закрыт, по обмотке электромагнита ток не протекает.

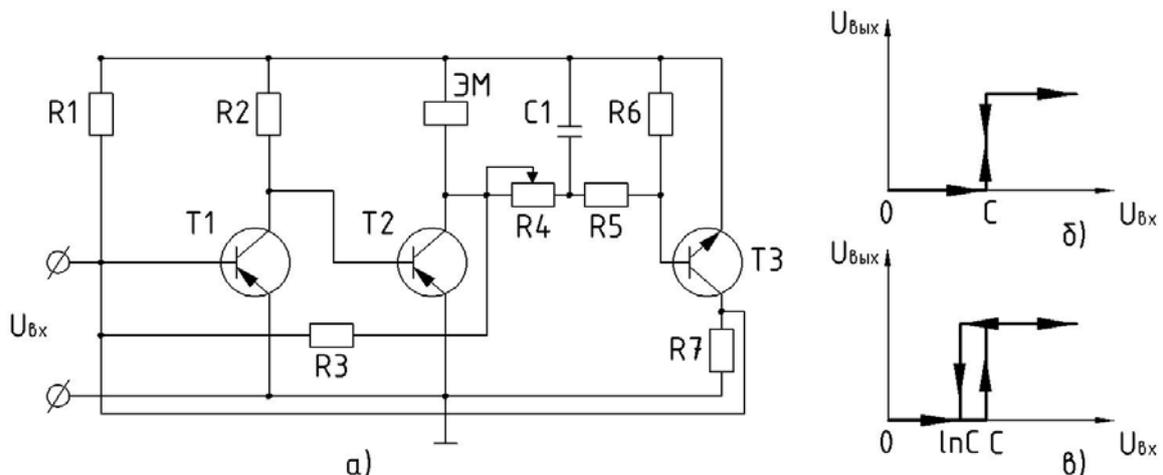


Рисунок 8.1 – Схема реле времени

При достижении входным напряжением порогового значения алгебраическая сумма всех подаваемых на вход реле времени сигналов больше нуля, ток базы первого транзистора становится равным нулю, первый транзистор закрывается, напряжение на его коллекторе становится равным 12,3 В, второй транзистор открывается, появляется ток коллектора, протекающий по обмотке электромагнита. Электромагнит срабатывает. Одновременно возрастает напряжение на конденсаторе С1. Когда напряжение на С1 достигнет уровня, соответствующего выдержки времени, равной, например, 5 с, открывается третий транзистор, на его коллекторе напряжение становится равным нулю. Оно подаётся на вход реле времени по цепи обратной связи. Поэтому алгебраическая сумма сигналов, подаваемых на вход первого транзистора, становится меньше нуля. Первый транзистор открывается, второй закрывается. Реле времени приходит в исходное состояние. Таким образом, электромагнит находится во включенном состоянии 5 с.

8.3 Организация работы

Работа рассчитана на 2 ч. Проводится бригадой из двух-трех человек под руководством преподавателя.

Ход выполнения лабораторной работы

1 Изучить принцип действия реле времени.

2 Включить реле времени в сеть 12 В, подать на вход напряжение 1 В и измерить время нахождения электромагнита во включенном состоянии с помощью секундомера или электронного осциллографа. Провести опыт по измерению выдержки времени 10 раз. Заполнить таблицу 8.1.

Таблица 8.1 – Результаты эксперимента

Номер опыта	1	2	3	4	5	6	7	8	9	10
t, c										

3 Вычислить среднюю выдержку времени нахождения электромагнита электрогидравлического подъемника во включенном состоянии.

8.4 Содержание отчета

1 Описание схемы реле времени.

2 Назначение элементов схемы.

3 Описание действия обратных связей реле времени.

Контрольные вопросы

1 Принцип действия первого усилителя реле времени.

2 Принцип действия второго усилителя реле времени.

3 Принцип действия и график напряжения на интегрирующей цепи реле времени.

4 Принцип действия обратной связи.

Список литературы

1 **Богатырев, А. В.** Электронные системы мобильных машин: учебное пособие / А. В. Богатырев. – Москва: ИНФРА-М, 2022. – 224 с.

2 **Масаев, В. Н.** Автоматизированные системы управления и связь: учебное пособие / В. Н. Масаев, А. Н. Минкин, А. П. Филкова. – Железногорск: Сибирская пожарно-спасательная академия ГПС МЧС России, 2018. – 138 с.

3 **Симаков, Г. М.** Системы расчета автоматизированного электропривода: учебное пособие / Г. М. Симаков, Ю. В. Панкрац, Д. А. Котин. – Новосибирск: НГТУ, 2019. – 147 с.

4 **Савич, Е. Л.** Системы безопасности автомобилей: учебное пособие / Е. Л. Савич, В. В. Капустин. – Минск : Новое знание ; Москва : ИНФРА-М, 2023. – 445 с.

5 **Тишин, Б. М.** Системы безопасности автомобилей: методическое пособие / Б. М. Тишин. – Москва; Вологда: Инфра-Инженерия, 2019. – 152 с.

6 Электронные системы управления работой дизельных двигателей: учебное пособие / Под ред. С. И. Головина. – Москва : ИНФРА-М, 2021. – 160 с.

7 **Ткаченко, Ф. А.** Электронные приборы и устройства: учебник / Ф. А. Ткаченко. – Минск : Новое знание ; Москва : ИНФРА-М, 2023. – 682 с.