

МЕЖГОСУДАРСТВЕННОЕ ОБРАЗОВАТЕЛЬНОЕ УЧРЕЖДЕНИЕ
ВЫСШЕГО ОБРАЗОВАНИЯ
«БЕЛОРУССКО-РОССИЙСКИЙ УНИВЕРСИТЕТ»

Кафедра «Транспортные и технологические машины»

ТЕОРИЯ АВТОМАТИЧЕСКИХ СИСТЕМ АВТОМОБИЛЯ

*Методические рекомендации к лабораторным работам
для студентов специальности 1-37 01 02 «Автомобилестроение
(по направлениям)» очной формы обучения*



Могилев 2023

УДК 629.33
ББК 39.33-04
Т33

Рекомендовано к изданию
учебно-методическим отделом
Белорусско-Российского университета

Одобрено кафедрой «Транспортные и технологические машины»
«28» февраля 2023 г., протокол № 7

Составитель ст. преподаватель Е. В. Заровчатская

Рецензент канд. техн. наук, доц. А. Е. Науменко

Методические рекомендации к лабораторным работам по курсу «Теория автоматических систем автомобиля» предназначены для студентов специальности 1-37 01 02 «Автомобилестроение (по направлениям)» очной формы обучения.

Учебное издание

ТЕОРИЯ АВТОМАТИЧЕСКИХ СИСТЕМ АВТОМОБИЛЯ

Ответственный за выпуск	И. В. Лесковец
Корректор	И. В. Голубцова
Компьютерная верстка	Н. П. Полевничая

Подписано в печать . Формат 60×84/16. Бумага офсетная. Гарнитура Таймс.
Печать трафаретная. Усл. печ. л. . Уч.-изд. л. . Тираж 26 экз. Заказ №

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

1 Лабораторная работа № 1. Исследование характеристик следящего привода	4
2 Лабораторная работа № 2. Исследование релейной системы автоматического регулирования.....	10
3 Лабораторная работа № 3. Исследование характеристик датчиков положения и давления автоматических систем	16
4 Лабораторная работа № 4. Исследование характеристик датчиков угловой скорости автоматических систем.....	21
5 Лабораторная работа № 5. Определение амплитудно-частотной характеристики двухмассовой колебательной системы	25
6 Лабораторная работа № 6. Определение переходных характеристик типовых динамических звеньев САУ.....	29
7 Лабораторная работа № 7. Определение частотных характеристик типовых динамических звеньев САУ.....	35
Список литературы	40

1 Лабораторная работа № 1. Исследование характеристик следящего привода

Цель работы:

- изучить устройство и принцип действия следящего привода сцепления;
- снять статические характеристики привода;
- определить выходные параметры и показатели точности работы привода.

1.1 Необходимые теоретические сведения

При ручном и автоматическом управлении механизмами и системами автомобиля часто возникает необходимость в контролируемом перемещении некоторых конструктивных элементов с возможностью их позиционирования в любом промежуточном положении с требуемой точностью. Эту задачу успешно решают посредством приводов, обладающих следящим действием. Под следящим действием привода понимают его способность передавать движение руки человека или управляющего воздействия автоматического устройства некоторому элементу механизма или системы с заданным соотношением и многократным усилением по мощности. Например, в приводе рулевого управления обеспечивается слежение угла поворота управляемых колес за углом поворота водителем рулевого колеса (следящее действие по перемещению). В тормозном приводе осуществляется следящее действие как по силе, так и по перемещению. Названные функциональные свойства следящих приводов математически выражаются следующими зависимостями:

$$y = k_x x; \quad (1.1)$$

$$N_y = k_N N_x, \quad (1.2)$$

где y – перемещение выходного звена привода;

k_x – коэффициент передачи следящего привода;

x – входное задающее воздействие;

N_y, N_x – мощность выходного и входного воздействий;

k_N – коэффициент усиления привода по мощности.

Входной величиной x может быть перемещение, давление рабочей среды или напряжение. Следящие приводы соответственно называют с механическим, гидравлическим, пневматическим или электрическим управлением.

Следящие приводы можно построить на основе любого из фундаментальных принципов управления, однако чаще используются принципы замкнутого и комбинированного управления.

Основными выходными параметрами следящих приводов являются передаточный коэффициент следящего привода k_x и коэффициент усиления по мощности k_N . Физический смысл коэффициента передачи k_x состоит в том, что он показывает отношение перемещения выходного звена привода к величине

входного воздействия в установившемся режиме работы привода. Коэффициент усиления по мощности показывает, во сколько раз мощность на выходном звене привода больше мощности входного воздействия.

Коэффициент усиления следящего привода по мощности

$$k_N = \frac{N_y}{N_x} = \frac{F_y \dot{y}}{F_x \dot{x}} = k_F k_x, \quad (1.3)$$

где k_F – коэффициент увеличения силового воздействия, $k_F = F_y / F_x$.

Качество работы следящего привода определяется точностью слежения выходного звена за изменениями входного звена. Ошибка слежения

$$\varepsilon(t) = x(t) - y(t). \quad (1.4)$$

В статическом режиме ошибку слежения оценивают по минимальному значению входного воздействия, при котором выходное звено привода начинает трогаться, а также параметром

$$\delta_{ст} = \frac{y_{ш.р} - y_{ш.н}}{x_{п.ном}}, \quad (1.5)$$

где $x_{п.ном}$ – номинальное значение входной величины;

$y_{ш.р}$, $y_{ш.н}$ – перемещение выходного звена привода соответственно при работающем и неработающем усилителе при $x_{п.ном}$.

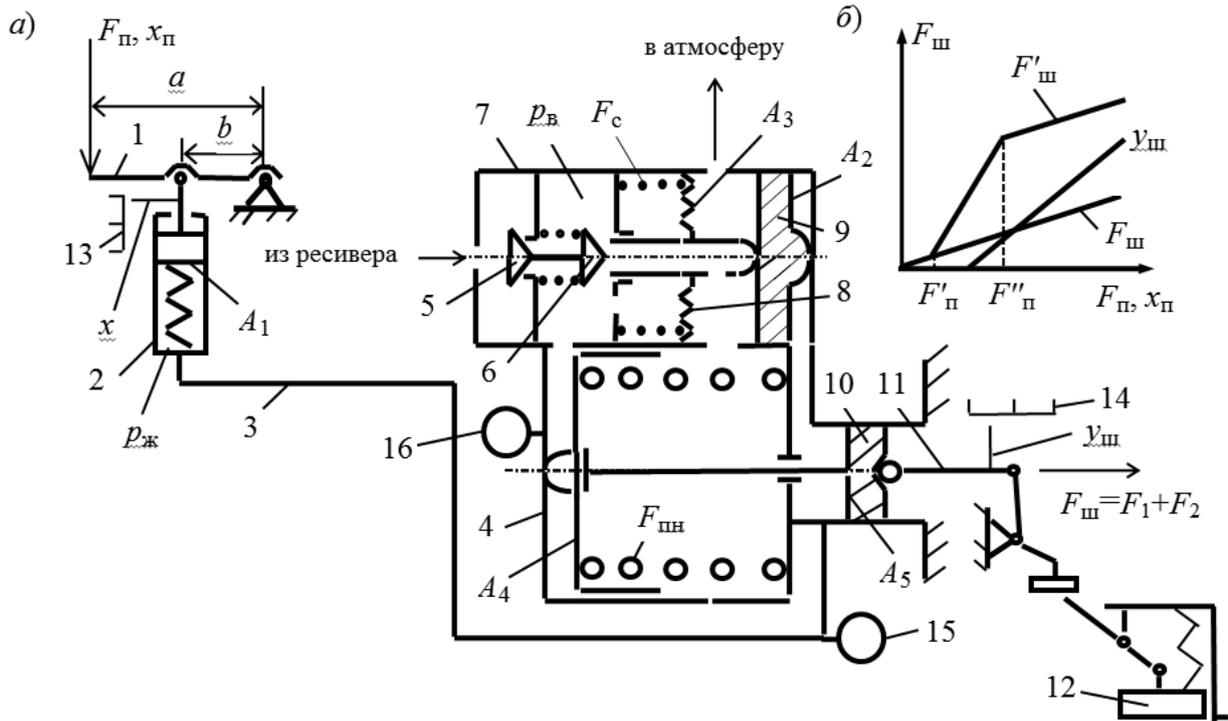
Считается, что качество привода удовлетворительное, если $\delta_{ст} \leq 3\%$.

Статической характеристикой следящего привода называется зависимость выходной величины привода от величины входного воздействия, полученная при статическом режиме работы привода.

1.2 Описание экспериментальной установки

Принципиальная схема установки показана на рисунке 1.1. Педаль привода 1, связанная с главным цилиндром 2 гидролинией 3 соединяется с пневмоусилителем. Пневмоусилитель включает в себя пневмоцилиндр 4, гидроцилиндр 10 выключения сцепления и мембранное следящее устройство 7, объединенные в одном агрегате. Рассмотрим наиболее характерные режимы работы привода.

1 Усилие на педали отсутствует – сцепление включено. Давление в главном цилиндре 2 и в гидролинии 3 отсутствует. Мембрана 8 пружиной отжата вправо, а вместе с мембраной отжат связанный с ней патрубком – седло атмосферного клапана 6. Впускной клапан 5 сжатого воздуха закрыт, а атмосферный клапан 6 открыт, сообщая левую полость пневмоцилиндра 4 с атмосферой. Поршень пневмоцилиндра 4 под действием пружины отжат в крайнее левое положение. Усилие на штоке 11 привода отсутствует.



a – принципиальная схема: 1 – педаль сцепления; 2 – главный гидроцилиндр; 3 – гидролиния; 4 – силовой пневмоцилиндр; 5 – клапан сжатого воздуха; 6 – атмосферный клапан; 7 – корпус следящего устройства; 8 – мембрана; 9 – следящий механизм; 10 – гидроцилиндр выключения сцепления; 11 – шток; 12 – нажимной диск сцепления; 13 – измеритель перемещения педали привода; 14 – измеритель перемещения штока; 15 – манометр для измерения давления в гидроцилиндре выключения сцепления; 16 – манометр для измерения давления в пневмоцилиндре; *б* – статическая характеристика привода

Рисунок 1.1 – Привод сцепления автомобиля КамАЗ-5320

2 Усилие на педали повышается – сцепление выключается. Если в ресивере сжатый воздух отсутствует, то усилие на штоке 11 привода, сцепления зависит только от давления в гидролинии:

$$F_1 = p_{\text{ж}} A_5 = \frac{a F_{\text{п}} A_5}{b A_1}, \quad (1.6)$$

где $p_{\text{ж}}$ – давление жидкости в гидролинии;

A_1 – площадь поршня главного гидроцилиндра;

A_5 – площадь поршня гидроцилиндра 10 выключения сцепления.

Если в ресивере имеется сжатый воздух, то давление жидкости в гидролинии, воздействуя на поршень 9 следящего устройства перемещает его влево. При этом мембрана 8 выгибается, преодолевает усилие пружины F_c и своим седлом закрывает выпускной клапан 6 и открывает клапан 5 сжатого воздуха. Сжатый воздух поступает в левую полость пневмоцилиндра 4 и воздействует на его поршень. Усилие, создаваемое поршнем пневмоцилиндра 4,

$$F_2 = p_b A_4 - F_{\text{пн}}, \quad (1.7)$$

где p_b – давление сжатого воздуха в левой полости гидроцилиндра;
 A_4 – площадь поршня пневмоцилиндра;
 $F_{\text{пн}}$ – усилие пружины поршня.

3 Усилие на педали уменьшается – сцепление включается. Давление в гидролинии 3 падает. При этом уменьшается сила, с которой следящий поршень 9 действует на мембрану 8; последняя выгибается вправо, открывая атмосферный клапан 6 и закрывая клапан 5 сжатого воздуха. Усилие на штоке 11 падает.

4 Усилие на педали постоянно – сцепление выключено. Усилие, создаваемое пневмоцилиндром 4, должно быть также постоянным. Это возможно только в том случае, когда оба клапана 5 и 6 закрыты, что соответствует равновесному положению мембраны 8. Уравнение равновесия сил, действующих на мембрану,

$$p_b A_3 + F_c - p_{\text{ж}} A_2 = 0, \quad (1.8)$$

где A_3 – площадь мембраны;
 F_c – усилие пружины мембраны;
 A_2 – площадь поршня следящего устройства.

Подставив значения $p_{\text{ж}}$ из уравнения (1.6) в уравнение (1.8), получим, что

$$p_b = \frac{aF_{\text{п}} A_2}{bA_1 A_3} - \frac{F_c}{A_3}. \quad (1.9)$$

Отсюда следует, что давление воздуха на мембрану, а следовательно, и на поршень гидроцилиндра прямо пропорционально усилию на педали, что и требуется от следящего механизма.

Полное усилие на штоке привода сцепления

$$F_{\text{ш}} = F_1 + F_2 = \frac{aF_{\text{п}} A_5}{bA_1} + p_b A_4 - F_{\text{пн}}. \quad (1.10)$$

Подставив из (1.9) значение p_b , получим

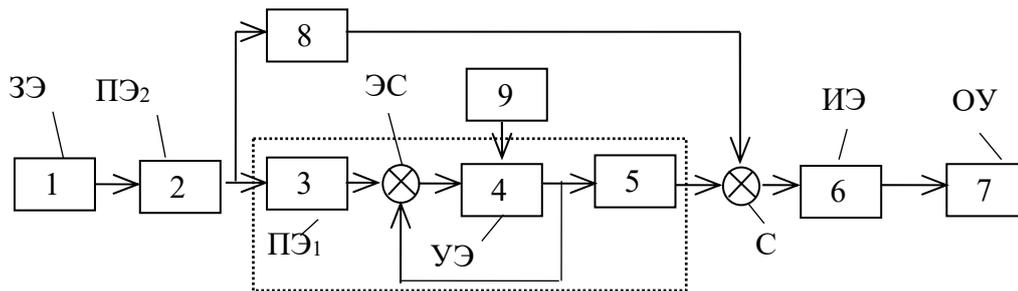
$$F_{\text{ш}} = F_{\text{п}} \frac{aA_5}{bA_1} + \left(\frac{aF_{\text{п}} A_2}{bA_1 A_3} - \frac{F_c}{A_3} \right) A_4 - F_{\text{пн}}. \quad (1.11)$$

Пневмоусилитель вступает в работу при $F_{\text{п}} = F_{\text{п}}'$ (см. рисунок 1.1, б), когда выражение в скобках формулы (1.11) станет больше нуля. При $F_{\text{п}} = F_{\text{п}}''$ усилие F_2 достигает максимально возможного значения, т. к. давление сжатого воздуха в пневмоцилиндре будет равно давлению в ресивере. Поэтому дальнейшее повышение усилия $F_{\text{ш}}'$ может быть достигнуто только за счет повышения усилия на педали.

Исследуемый привод обеспечивает следящее действие как по усилию на педали сцепления, так и по ее перемещению.

Функциональная схема привода показана на рисунке 1.2. Из нее видно, что усилие от педали к нажимному диску сцепления передается двумя параллельными потоками: через гидроцилиндр выключения сцепления и пневмоусилитель. Оба потока суммируются на сумматоре. В качестве сумматора используется шток пневмоусилителя (см. рисунок 1.1, а). Распределитель следящего устройства охвачен отрицательной обратной связью. Благодаря этому давление на выходе распределителя, а значит, и усилие F_2 , создаваемое поршнем пневмоцилиндра, будет прямо пропорционально усилию, действующему на следящий поршень.

Конструктивные параметры привода приведены в таблице 1.1.



ЗЭ – задающий элемент; ПЭ₁, ПЭ₂ – преобразующие элементы; ИЭ – исполнительный элемент; УЭ – усилительный элемент; ЭС – элемент сравнения; С – сумматор; ОУ – объект управления; 1 – педаль сцепления; 2 – главный гидроцилиндр; 3 – следящий поршень; 4 – распределитель следящего устройства; 5 – пневмоцилиндр; 6 – привод сцепления; 7 – нажимной диск сцепления; 8 – гидроцилиндр выключения сцепления; 9 – источник сжатого воздуха

Рисунок 1.2 – Функциональная схема следящего привода

Таблица 1.1 – Параметры привода

Наименование параметра	Обозначение	Размерность	Значение
Площадь поршня главного цилиндра	A_1	м^2	$2,8353 \cdot 10^{-4}$
Площадь поршня следящего устройства	A_2	м^2	$6,1575 \cdot 10^{-4}$
Площадь мембраны	A_3	м^2	$1,7349 \cdot 10^{-3}$
Площадь поршня пневмоцилиндра	A_4	м^2	$6,3617 \cdot 10^{-3}$
Площадь поршня гидроцилиндра выключения сцепления	A_5	м^2	$1,7671 \cdot 10^{-4}$
Плечо приложения силы $F_{\text{п}}$	a	м	0,09
Плечо приложения силы к поршню главного гидроцилиндра	b	м	0,05

1.3 Последовательность выполнения работы

1 Изучите устройство и принцип действия лабораторной установки.

2 Снимите статические характеристики привода при неработающем усилителе: $F_{ш} = f(F_{п})$, $y_{ш} = f(x_{п})$ и $k_N = f(F_{п})$, где $F_{ш}$ – усилие на штоке пневмоусилителя; $y_{ш}$ – перемещение штока; $F_{п}$ – усилие на педали сцепления; $x_{п}$ – перемещение педали; k_N – коэффициент усиления привода по мощности. Для этого ступенчато изменяйте усилие на педали сцепления от нуля до значения, при котором давление в главном гидроцилиндре станет равным 3,5 МПа (35 кгс/см²). При каждом фиксированном значении усилия $F_{п}$ определяйте: давление $p_{ж}$ в гидроцилиндре выключения сцепления по манометру 15; перемещение x штока главного гидроцилиндра по измерителю 13 и перемещение штока пневмоусилителя $y_{ш}$ по измерителю 14. Результаты измерений занесите в таблицу 1.2.

Таблица 1.2 – Результаты измерений

Номер	x , м	$y_{ш}$, м	$p_{ж}$, Н/м ²	$x_{п} = x a/b$, м	$F_{ш} = p_{ж}A_5$, Н	$F_{п} = p_{ж}A_1 b/a$, Н	k_x	k_F	k_N
1									

По результатам измерений определите $x_{п}$, $F_{ш}$, $F_{п}$, k_x , k_F и k_N . Результаты расчетов занесите в таблицу 1.2. По данным таблицы 1.2 постройте статические характеристики привода: $F_{ш} = f(F_{п})$, $y_{ш} = f(x_{п})$ и $k_N = f(F_{п})$.

3 Включите компрессор и заполните сжатым воздухом ресивер. Откройте кран для подвода сжатого воздуха из ресивера к пневмоусилителю.

4 Снимите статические характеристики привода при работающем усилителе: $F_{ш} = f(F_{п})$, $y_{ш} = f(x_{п})$ и $k_N = f(F_{п})$. Для этого ступенчато изменяйте положение педали сцепления от нуля до номинального значения $x_{п,ном}$. В качестве номинального принять положение педали сцепления, соответствующее давлению в гидроцилиндре выключения сцепления, равному 3,5 МПа (35 кгс/см²) при неработающем усилителе. При каждом фиксированном значении $x_{п}$ определяйте: давление $p_{ж}$ в гидроцилиндре выключения сцепления по манометру 15; давление $p_{в}$ в пневмоусилителе по манометру 16; перемещение x штока главного гидроцилиндра по измерителю 13 и перемещение штока пневмоусилителя $y_{ш}$ по измерителю 14. Результаты измерений занесите в таблицу 1.3.

Внимание! Во избежание поломки манометра 15 категорически запрещается создавать на педали сцепления усилие, вызывающее появление давления в гидроцилиндре выключения сцепления больше 3,5 МПа (35 кгс/см²).

5 Определите показатели статической точности работы следящего привода. Для определения минимальной ошибки слежения плавно нажимайте на педаль сцепления и следите за состоянием штока пневмоцилиндра. Значение $x_{п0}$, при котором шток начнет движение, и будет минимальной ошибкой слежения. По формуле (1.5) и результатам измерений, выполненных в пп. 2 и 4, определите $\delta_{ст}$.

Таблица 1.3 – Результаты измерений

Но- мер	x , м	$y_{ш}$, м	$p_{ж}$, Н/м ²	$p_{в}$, Н/м ²	$x_{п} = xa/b$, м	$F_1 =$ $= p_{ж}A_5$, Н	$F_2 =$ $= p_{в}A_4$, Н	$F_{ш} =$ $= F_1 + F_2$, Н	$F_{п} =$ $= p_{ж}A_1b/a$, Н	k_x	k_F	k_N
1												

1.4 Содержание отчета

- 1 Принципиальная схема лабораторной установки.
- 2 Таблицы 1.2 и 1.3.
- 3 Статические характеристики привода $F_{ш} = f(F_{п})$, $y_{ш} = f(x_{п})$ и $k_N = f(F_{п})$ при неработающем и работающем усилителе.
- 4 Определение показателей статической точности работы привода $x_{п0}$ и $\delta_{ст}$.
- 5 Выводы.

Контрольные вопросы

- 1 Дайте определение следящей системы.
- 2 Какой фундаментальный принцип управления реализует исследуемый привод?
- 3 Объясните принцип действия исследуемого привода сцепления.
- 4 Какие устройства используются в приводе сцепления в качестве сравнивающего и суммирующего элементов?
- 5 Что понимается под точностью работы следящего привода и как ее можно оценить в статическом режиме работы?
- 6 Дайте определение статической характеристики следящей системы.
- 7 Используя формулы (1.6)–(1.11), выведите формулу, устанавливающую связь между k_N и конструктивными параметрами привода.

2 Лабораторная работа № 2. Исследование релейной системы автоматического регулирования

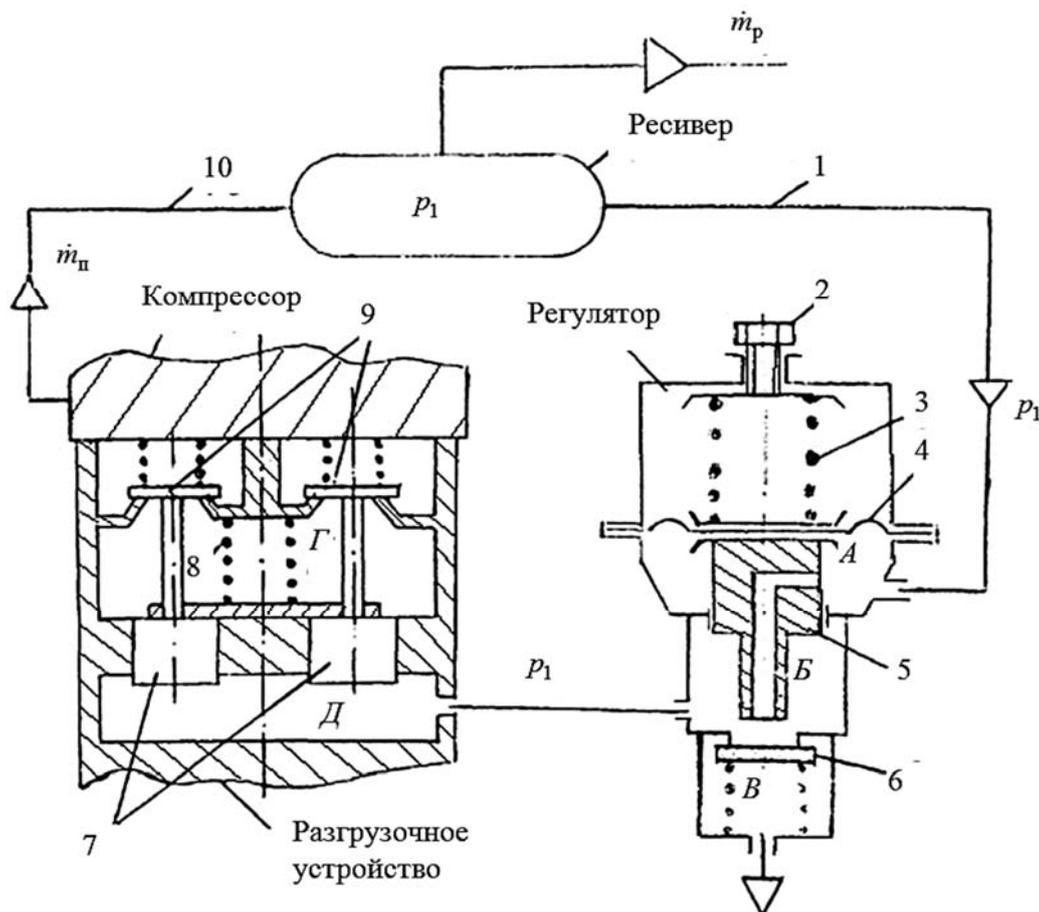
Цель работы:

- изучить устройство и принцип действия САР давления воздуха в ресивере;
- снять статическую характеристику регулирования давления в ресивере;
- определить параметры настройки регулятора давления.

2.1 Необходимые теоретические сведения

На рисунке 2.1 изображена принципиальная схема САР давления с автономным релейным регулятором и разгрузочным устройством выполненным в корпусе компрессора. В поддиафрагменную полость A регулятора поступает из ресивера по магистрали 1 сжатый воздух, который воздействует на диафрагму 4 ,

поджимаемую с другой стороны пружиной 3. Усилие пружины 3 можно регулировать с помощью винта 2. При достижении в ресивере и в полости *A* регулятора давления p_{\max} диафрагма начнет перемещаться вверх вследствие того, что $p_{\max} S_4 > F_3$ (S_4 – рабочая площадь диафрагмы 4; F_3 – усилие пружины 3). При этом будет перемещаться вверх также и жестко связанный с диафрагмой поршень 5. В процессе его перемещения закроется клапан *б* (прижмется к седлу корпуса пружиной) и шток поршня 5 отойдет от клапана *б*, что позволит сжатому воздуху поступать из полости *A* через сверление в поршне в полость *Б* и далее в полость *Д* разгрузочного устройства компрессора.



1 – магистраль; 2 – регулировочный винт; 3 – пружина; 4 – диафрагма; 5 – поршень; 6 – клапан; 7 – поршень; 8 – пружина; 9 – впускные клапаны

Рисунок 2.1 – Принципиальная схема САР давления с автоматическим регулятором и разгрузочным устройством

Под давлением p_1 поступившего в полость *Д* воздуха поршни 7 переместятся вверх, сжимая пружину 8, и откроют на полную величину впускные клапаны 9 компрессора. В результате компрессор начнет работать вхолостую, перекачивая порцию воздуха через полость *Г* и открытые клапаны 9 из одного цилиндра в другой. При этом будет мгновенный массовый расход воздуха в ресивер $\dot{m}_n = 0$. Скачкообразное перемещение диафрагмы 4 и поршня 5 вверх достигается за счет того, что при появлении сжатого воздуха в полости *Б* возникает дополнительная

движущая сила, равная $p_1 S_5$, где S_5 – площадь поршня 5. Этим (положительная обратная связь) обеспечивается релейное переключение регулятора.

Когда давление в ресивере снизится до p_{\min} , сила $p_{\min} (S_4 + S_5)$ станет меньше силы пружины F_3 и, следовательно, начнется перемещение диафрагмы 4 и поршня 5 вниз. В результате шток поршня 5 упрется в клапан 6 и откроет последний – сжатый воздух из полостей *Б* и *Д* через полость *В* выйдет в атмосферу. Под действием пружины 8 поршни 7 опустятся вниз и впускные клапаны 9 сядут на свое седло, после чего компрессор станет работать под нагрузкой, подавая сжатый воздух в ресивер.

Релейное переключение регулятора при перемещении поршня вниз и исключение тем самым «щелевого эффекта» обеспечивается за счет того, что при открытии клапана 6 исчезает дополнительная сила (сигнал обратной связи), равная $p_1 (S_5 - S_6)$.

Условие срабатывания (включения) регулятора определяется из условия равновесия диафрагмы 4 и поршней 5 в момент отрыва штока поршня 5 от клапана 6, т. е.

$$p_{\max} S_4 \geq F_3 + F_{\text{тр}}, \quad (2.1)$$

где $F_{\text{тр}}$ – сила трения поршня.

Условием выключения регулятора (ход поршня вниз) является

$$F_3 \geq p_{\min} (S_4 + S_5 - S_6) + F_6 + F_{\text{тр}}, \quad (2.2)$$

где S_6 – площадь клапана 6;

F_6 – сила пружины, действующей на клапан 6.

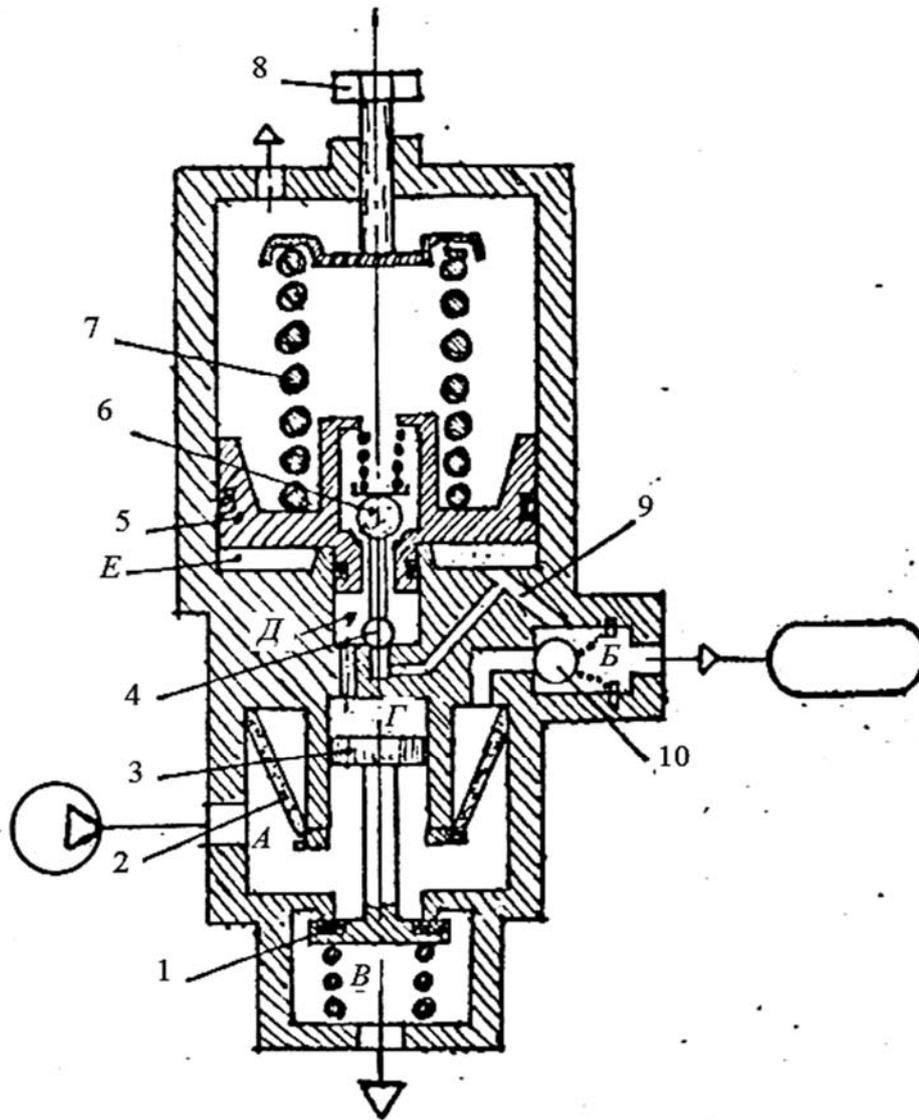
Зона нечувствительности регулятора определяется из уравнений (2.1) и (2.2) как разность $\Delta p = p_{\max} - p_{\min}$. Анализ этих уравнений показывает, что зона нечувствительности (диапазон регулирования) обуславливается главным образом силой трения, силой F_6 и рабочей площадью диафрагмы 4. Площадь S_5 должна быть больше площади S_6 , чтобы обеспечивалось скачкообразное открытие клапана 6.

Имеется ряд конструкций релейных регуляторов, размещенных в одном корпусе с разгрузочным устройством, причем такие регуляторы выполняются отдельно от компрессора и могут устанавливаться в пневмосистемы с различными компрессорами. Один из таких регуляторов показан на рисунке 2.2.

Сжатый воздух поступает от компрессора в полость *А* и далее, проникая через фильтр 2, проходит через обратный клапан 10 в полость *Б*, постоянно соединенную с ресивером. Одновременно сжатый воздух имеет возможность проходить по каналу 9 в подпоршневую полость *Е*. Когда давление в полостях *Б* и *Е* достигает верхнего предела регулирования, поршень 5 перемещается вверх, при этом сначала закрывается клапан 6 и затем открывается клапан 4. Сжатый воздух по каналу 9 проходит через полость *Д* в полость *Г* и заставляет поршень 3 переместиться вниз и открыть выпускной клапан 1. Тогда нагнетательная магистраль

компрессора соединяется через полости *A* и *B* с выходом в атмосферу – компрессор переводится на холостой режим работы и давление в ресивере снижается.

Когда давление в ресивере и в полости *E* уменьшится до нижнего уровня регулирования, под действием пружины *7* поршень *5* опустится вниз, закроется клапан *4* и откроется клапан *6*, в результате чего сжатый воздух из полости *Г* через полость *Д* и открытый клапан *6* выйдет в атмосферу и клапан *1* под действием пружины закроется. После этого компрессор снова начнет работать под нагрузкой, нагнетая сжатый воздух в ресивер.



1 – выпускной клапан; *2* – фильтр; *3* – поршень; *4* – клапан; *5* – поршень; *6* – клапан; *7* – пружина; *8* – винт; *9* – канал; *10* – обратный клапан

Рисунок 2.2 – Принципиальная схема регулятора давления, выполненная в одном корпусе с разгрузочным клапаном

Скачкообразное перемещение поршня *5* из нижнего положения в верхнее обеспечивается тем, что при открытии клапана *4* возникает дополнительная движущая сила, равная произведению давления в полости *Д* на площадь поршенька, размещаемого в этой полости. Сила пружины *7* может регулироваться с

помощью винта 8. Если площадь клапана l выбрать несколько большей площади поршня 3, то клапан l может служить также и предохранительным клапаном.

В рассматриваемых САР объектом управления является ресивер, управляющим устройством – регулятор давления, регулирующим органом – компрессор, а управляемой величиной – давление в ресивере. Управляющее воздействие u , формируемое регулятором давления на объект управления, имеет два постоянных уровня: $u_H = 0$ – регулятор давления выключен и $u_B = 1$ – регулятор давления включен. На рисунке 2.3 приведены графики изменения давления p в ресивере и управляющего воздействия u в САР.

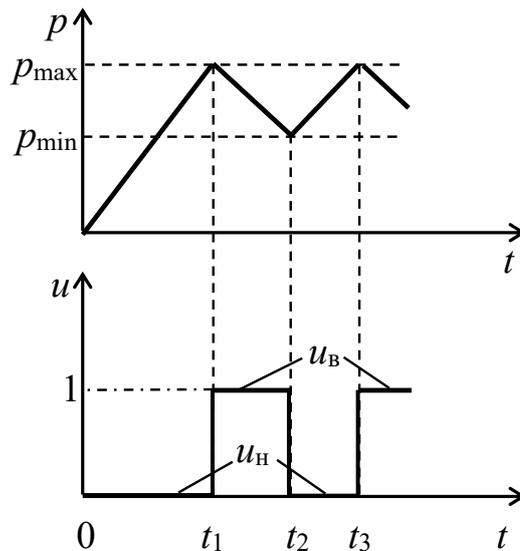


Рисунок 2.3 – Изменение давления p в ресивере и управляющего воздействия u в САР

Период времени $[0, t_1]$ соответствует росту давления в ресивере. В течение этого промежутка времени регулятор давления находится в выключенном состоянии и управляющее воздействие, формируемое регулятором, $u_H = 0$. При $t = t_1$ давление в ресивере достигает верхнего предела регулирования p_{\max} , регулятор давления включается ($u_B = 1$) и переводит компрессор в режим холостого хода. В период времени $[t_1, t_2]$ компрессор не подает воздух в ресивер. При этом питание пневмоаппаратов тормозной системы осуществляется за счет энергии сжатого воздуха, находящегося в ресивере. С течением времени давление в ресивере падает. При $t = t_2$ оно достигает нижнего предела регулирования p_{\min} , что приводит к выключению регулятора давления ($u_H = 0$) и переводу компрессора в режим накопления воздуха в ресивере. Далее описанный порядок работы САР повторяется.

Оценочными параметрами релейной САР давления являются верхний p_{\max} и нижний p_{\min} пределы регулирования давления, а также зона нечувствительности регулятора $\Delta p = p_{\max} - p_{\min}$.

2.2 Описание экспериментальной установки

Схема экспериментальной установки показана на рисунке 2.4. Она включает в себя компрессор 1 с приводом от электродвигателя, ресиверы 2, регулятор давления 3 в одном корпусе с разгрузочным клапаном, тормозной кран 5 с рычагом управления 6 и тормозную камеру 7.

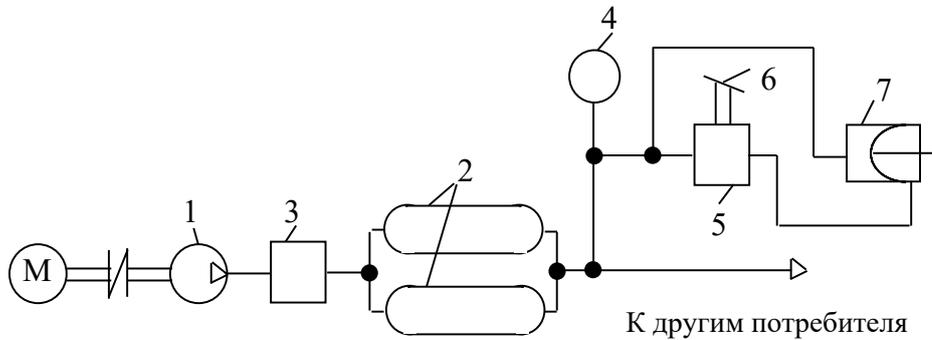


Рисунок 2.4 – Схема экспериментальной установки

2.3 Последовательность выполнения работы

1 Изучите устройство и принцип действия САР давления воздуха в ресивере. Нарисуйте функциональную схему САР.

2 Ознакомьтесь с устройством лабораторной установки.

3 Снимите характеристику регулирования давления воздуха в ресивере $p = f(t)$. Для этого одновременно включите компрессор и секундомер и, наблюдая за показаниями манометра 4 (см. рисунок 2.4), прислушивайтесь к работе компрессора. На этапе накопления воздуха в ресивере компрессор имеет жесткий режим работы, а на этапе холостого хода – мягкий. Момент перехода работы компрессора с жесткого режима на мягкий соответствует точке с координатами (t_1, p_{\max}) на рисунке 2.3. Зафиксируйте с помощью секундомера и манометра параметры t_1 и p_{\max} характеристики.

4 Включите секундомер. Затем путем нажатия на педаль 6 (см. рисунок 2.4) тормозного крана сбрасывайте давление в ресивере до тех пор, пока компрессор не перейдет с мягкого режима работы на жесткий. Момент перехода соответствует точке с координатами $(t_1 + t_2, p_{\min})$. Значение параметра t_2 определите с помощью секундомера, а p_{\min} – по манометру.

5 Используя аналогичный подход, определите параметры t_3 и p_{\max} характеристики.

6 По полученным данным постройте характеристики изменения во времени давления в ресивере и управляющего воздействия в САР. Определите зону нечувствительности регулятора давления.

2.4 Содержание отчета

- 1 Функциональная схема САР.
- 2 Описание фундаментального принципа управления реализуемого САР давления воздуха.
- 3 Описание алгоритма функционирования САР.
- 4 Характеристики изменения во времени давления в ресивере и управляющего воздействия в САР.
- 5 Определение параметров настройки регулятора давления.

Контрольные вопросы

- 1 Какой фундаментальный принцип управления реализует исследуемая САР?
- 2 Исследуемая САР является статической или астатической системой управления?
- 3 Объясните устройство и принцип действия САР давления воздуха в ресивере.
- 4 Почему исследуемая САР является релейной системой управления?
- 5 Дайте определение функциональной схемы САР.
- 6 Назовите типовые функциональные элементы в исследуемой САР.

3 Лабораторная работа № 3. Исследование характеристик датчиков положения и давления автоматических систем

Цель работы:

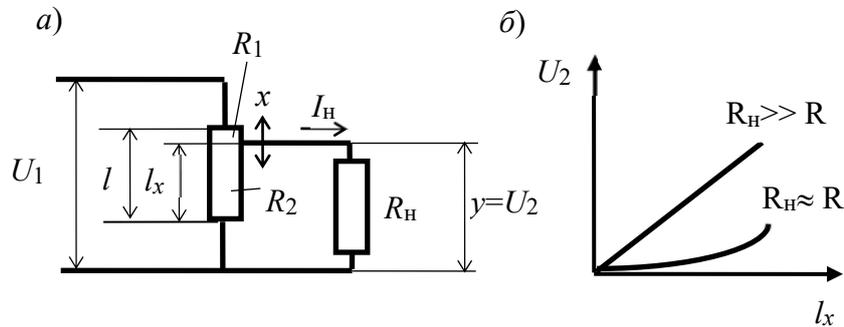
- изучить устройство, принцип действия датчиков положения и давления;
- изучить методику экспериментального определения статической характеристики датчиков;
- определить опытным путем статические характеристики и параметры датчиков положения и давления.

3.1 Необходимые теоретические сведения

При создании автоматических систем возникает необходимость в измерении уровней жидкостей в емкостях различных узлов и механизмов машин, измерении линейных и угловых перемещений конструктивных элементов объектов управления, определении отклонения траектории движения от заданной и т. п. Для решения подобных задач широко применяются датчики положения потенциометрического типа.

Проволочный потенциометр содержит каркас, на который намотано большое число витков проволоки с высоким удельным сопротивлением, и подвижный контакт, перемещаемый вдоль обмотки. Обмотку подключают к источнику постоянного тока, а подвижный контакт потенциометра связывают с контролируемым перемещением (рисунок 3.1). При изменении положения подвижного

контакта x меняется напряжение U_2 на выходе потенциометра из-за изменения сопротивления участка потенциометра длиной l_x . Таким образом, между контролируемым параметром и напряжением на выходе потенциометра существует пропорциональная зависимость.



a – схема; *б* – статическая характеристика

Рисунок 3.1 – Потенциометрический датчик линейного перемещения

В реальных измерительных схемах потенциометрический датчик работает на нагрузку, имеющую конечное сопротивление R_n . Используя первый и второй законы Кирхгофа, можно получить уравнение, устанавливающее связь между выходным напряжением U_2 и сочетанием параметров датчика с параметрами нагрузки,

$$U_2 = U_1 \frac{l_x}{l} \cdot \frac{1}{1 + \frac{l_x R}{l R_n} \left(1 - \frac{l_x}{l}\right)}, \quad (3.1)$$

где l_x – длина плеча потенциометра, соответствующая измеряемой величине x ;

R_n – сопротивление нагрузки;

R, l – полное сопротивление и длина катушки потенциометра;

U_1 – напряжение питания датчика.

Из (3.1) следует, что при $R_n \approx R$ статическая характеристика датчика $U_2 = f(l_x)$ будет нелинейной (см. рисунок 3.1, б). Если же $R_n \gg R$, то

$$U_2 \approx U_1 l_x / l, \quad (3.2)$$

т. е. статическая характеристика датчика будет близка к линейной (см. рисунок 3.1, а).

На рисунке 3.2 показано устройство датчика давления потенциометрического типа, используемого для измерения давления рабочих тел в гидро- и пневмосистемах автомобилей. В корпусе 1 датчика расположен чувствительный элемент, выполненный в виде металлической мембраны 2 , с которой связан движок 3 потенциометра 4 . Входным сигналом датчика является давление p , а выходным – напряжение U_2 . Принцип действия датчика заключается в том, что под действием давления p мембрана деформируется, вызывая соответствующее перемещение движка потенциометра и изменение напряжения U_2 на нагрузке R_n .

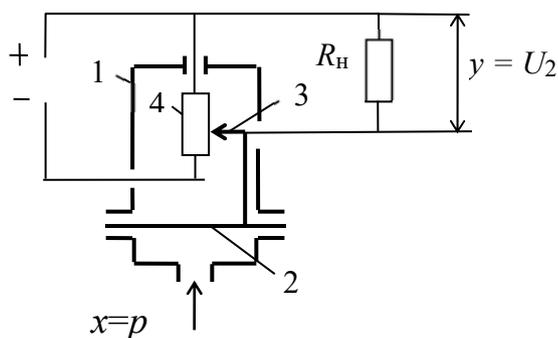


Рисунок 3.2 – Принципиальная схема датчика давления

3.2 Описание экспериментальной установки

Лабораторная установка для определения статической характеристики датчика перемещения изображена на рисунке 3.3. Она включает в себя потенциометр линейных перемещений 1 с полным сопротивлением $R = 530$ Ом и длиной катушки проволоки $l = 60$ мм, блок сопротивлений 2 , имитирующий нагрузку датчика, индикатор напряжения 3 и источник питания 4 . Текущее положение движка потенциометра определяется 6 с помощью линейки 5 , закрепленной на индикаторе напряжения. Напряжение U источника питания подается на вход датчика перемещений через делитель напряжения, собранный на двух сопротивлениях: $R_1 = 200$ Ом и $R_2 = 100$ Ом. Это необходимо для согласования характеристик источника питания и вольтметра.

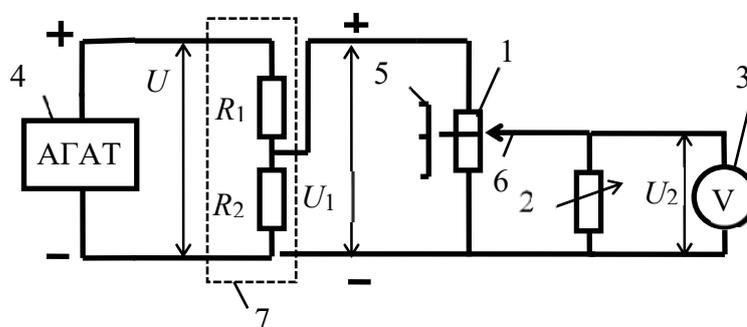


Рисунок 3.3 – Схема лабораторной установки для определения статической характеристики датчика линейного перемещения

Лабораторная установка для определения статической характеристики датчика давления (рисунок 3.4) включает в себя ресивер 1 , тормозной кран 2 , датчик давления потенциометрического типа 3 , манометр 4 , тормозную камеру 5 , источник стабилизированного напряжения 6 и цифровой вольтметр 7 . Датчик давления имеет клемную колодку с тремя выводами: красным, желтым и коричневым проводами. Для нормальной работы датчика желтый провод должен быть соединен с плюсовой, а коричневый – с минусовой клеммой источника напряжения. Съем выходного сигнала датчика $y = U_2$ осуществляется цифровым вольтметром ЦАТ-4800, присоединенным к желтому и красному проводам датчика.

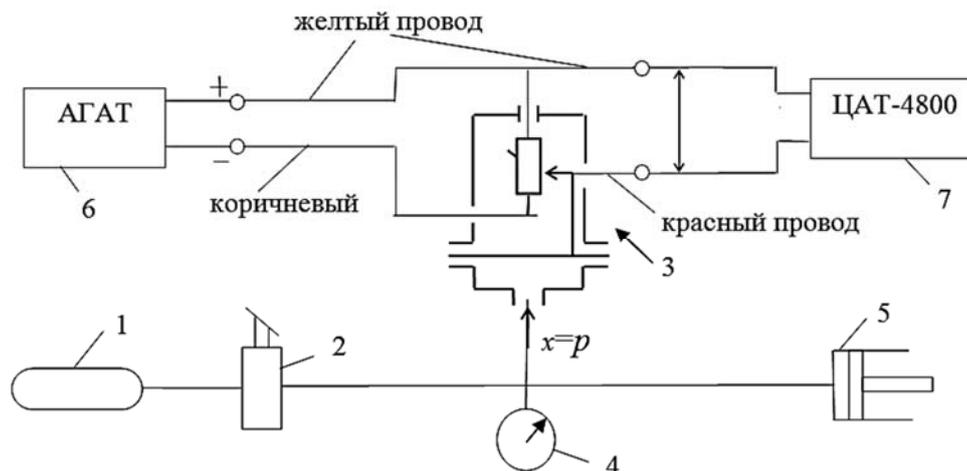


Рисунок 3.4 – Схема лабораторной установки для исследования характеристик датчика давления

3.3 Последовательность выполнения работы

1 Изучите устройство, принцип действия датчиков положения и давления потенциометрического типа.

2 Изучите устройство экспериментальной установки для исследования характеристик датчика линейного перемещения.

3 Определите зависимость статической характеристики датчика линейного перемещения от величины сопротивления нагрузки.

Для этого необходимо:

- поставить переключатель работ в положение II;
- перевести движок потенциометра в положение $l_x = 0$;
- установить напряжение источника питания $U = 9$ В;
- меняя положение движка потенциометра l_x в пределах от 0 до 60 мм с шагом 10 мм, снять зависимость $U_2 = f(l_x)$ для пяти значений нагрузки: $R_{н1} = 12,4$ Ом; $R_{н2} = 225$ Ом; $R_{н3} = 5000$ Ом; $R_{н4} = 22000$ Ом; $R_{н5} = \infty$. Различные значения нагрузок устанавливаются переключателем, расположенным на индикаторе напряжения. Данные замеров занести в таблицу 3.1;

- пользуясь формулой (3.1), определить расчетным путем зависимость $U_2 = f(l_x)$ для двух значений нагрузки, указанных преподавателем. Данные расчетов занести в таблицу 3.1;

- по данным таблицы 3.1 построить статические характеристики датчика при различных нагрузках;

- определить коэффициенты чувствительности датчика при разных сопротивлениях нагрузки.

4 Определите статическую характеристику датчика давления потенциометрического типа.

Для чего:

- руководствуясь рисунком 3.4 и п. 3, собрать электрическую схему экспериментальной установки;

– включить компрессор и заполнить воздухом ресивер до давления $p_{\max} = 0,6$ МПа;

– снять статическую характеристику датчика давления $U_2 = f(p)$. Для этого, воздействуя на рычаг тормозного крана, ступенчато повышать давление в тормозной камере от нуля до максимального значения $p_{\max} = 0,6$ МПа с шагом 0,1 МПа. При каждом фиксированном значении давления определять по цифровому вольтметру напряжение U_2 на выходе датчика. После достижения максимального давления ступенчато уменьшать давление от $p_{\max} = 0,6$ МПа, а до нуля с шагом 0,1 МПа, определяя напряжение U_2 . Результаты эксперимента занести в таблицу;

– построить статическую характеристику датчика давления;

– определить величину гистерезиса статической характеристики датчика по формуле

$$\delta_r = \frac{\max \Delta y_r}{y_{\max} - y_{\min}} 100 \%, \quad (3.3)$$

где $\max \Delta y_r$ – максимальная ширина петли гистерезиса;

y_{\max} , y_{\min} – пределы изменения выходной величины в рабочем диапазоне измерений.

Таблица 3.1 – Результаты экспериментов

Но- мер	l_x мм	$R_{н1} = 12,4, \text{ Ом}$		$R_{н2} = 225, \text{ Ом}$		$R_{н3} = 5000, \text{ Ом}$		$R_{н4} = 22 \cdot 10^3, \text{ Ом}$		$R_{н5} = \infty, \text{ Ом}$	
		эксп.	теор.	эксп.	теор.	эксп.	теор.	эксп.	теор.	эксп.	теор.
$U_2, \text{ В}$											
1											

3.4 Содержание отчета

1 Принципиальные схемы исследуемых датчиков и лабораторных установок.

2 Таблица 3.1.

3 Статические характеристики датчика линейного перемещения при различных нагрузках.

4 Значения коэффициентов чувствительности датчика линейного перемещения при различных нагрузках.

5 Анализ влияния сопротивления нагрузки на коэффициент чувствительности и характер протекания статической характеристики датчика линейного перемещения.

6 Статическая характеристика датчика давления.

7 Значение коэффициента чувствительности датчика давления.

8 Вычисление гистерезиса датчика давления.

Контрольные вопросы

- 1 Принцип работы датчиков положения и давления потенциометрического типа.
- 2 Что называется статической характеристикой датчика?
- 3 В чем заключается методика экспериментального определения статической характеристики датчиков?
- 4 Как определить чувствительность датчика по линейной и нелинейной статической характеристике?

4 Лабораторная работа № 4. Исследование характеристик датчиков угловой скорости автоматических систем

Цель работы:

- изучить схему и принцип действия датчиков угловой скорости;
- изучить методику экспериментального определения статической характеристики датчиков;
- определить опытным путем статические характеристики и параметры датчиков угловой скорости.

4.1 Необходимые теоретические сведения

Датчики угловой скорости предназначены для измерения скорости вращения валов объектов управления. На автомобилях для регистрации угловых скоростей валов используются тахогенераторы переменного и постоянного тока, индукционные преобразователи.

Тахогенераторы переменного тока имеют ротор в виде постоянного магнита и трехфазную обмотку статора (рисунок 4.1, *a*). При вращении ротора в обмотках статора наводится ЭДС, частота и амплитуда которой пропорциональна скорости вращения ротора.

ЭДС, индуцируемая в одной фазной обмотке тахогенератора на холостом ходу, определяется по формуле

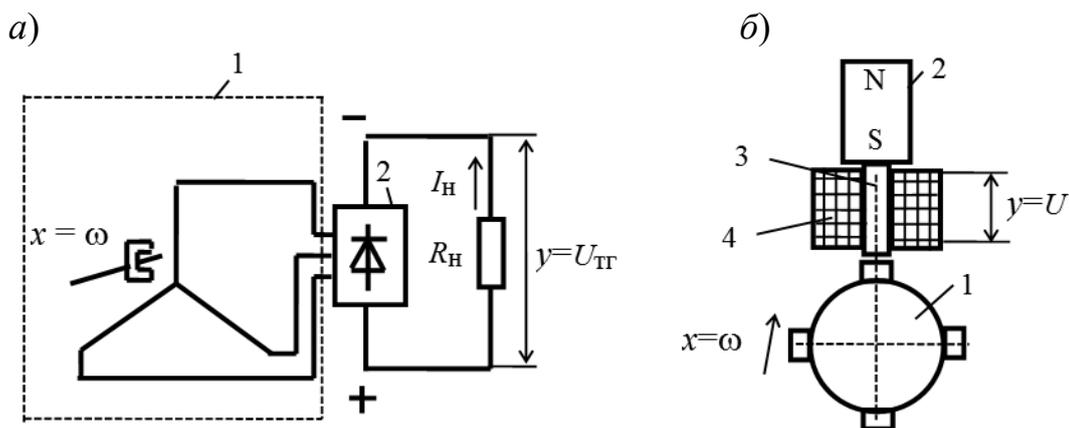
$$E = c_e \Phi_{\max} \omega, \quad (4.1)$$

где c_e – коэффициент пропорциональности, зависящий от конструктивных параметров генератора;

Φ_{\max} – максимальное значение магнитного потока;

ω – угловая скорость ротора.

Отсюда следует, что между ЭДС тахогенератора и угловой скоростью ротора имеет место линейная зависимость, т. е. тахогенератор может быть использован для измерения числа оборотов вала, если к его выходным клеммам подключить вольтметр, шкала которого проградуирована в оборотах в минуту.



a – тахогенератор переменного тока: 1 – тахогенератор; 2 – выпрямительный блок;
б – индукционный: 1 – зубчатый ротор; 2 – постоянный магнит; 3 – магнитопровод; 4 – катушка
 Рисунок 4.1 – Схемы датчиков угловой скорости

В реальных схемах тахогенератор работает на нагрузку (усилитель, вольтметр и т. д.), имеющую конечное сопротивление R_n . При протекании тока нагрузки I_n напряжение на выходных клеммах тахогенератора уменьшится и будет

$$U_{тр} = E - I_n Z, \quad (4.2)$$

где Z – полное сопротивление обмоток статора, включающее в себя активное сопротивление нагрузки R_n , обмоток статора $R_{ст}$ и индуктивное сопротивление обмоток статора ωL , $Z = \sqrt{(R_n + R_{ст})^2 + (\omega L)^2}$.

Если сопротивление нагрузки $R_n \rightarrow \infty$, то ток $I_n \rightarrow 0$. В этом случае статическая характеристика тахогенератора $U_{тр} = f(\omega)$ (рисунок 4.2) будет приближаться к характеристике холостого хода, поскольку $U_{тр} \approx E$. Чем больше I_n , тем больше падение напряжения на активном и индуктивном сопротивлении обмотки статора, тем больше будет статическая характеристика датчика отклоняться от характеристики холостого хода.

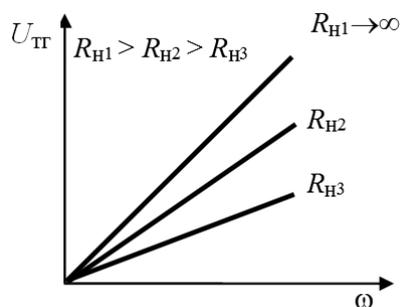


Рисунок 4.2 – Статическая характеристика тахогенератора переменного тока при различных сопротивлениях нагрузки

Индукционный датчик (см. рисунок 4.1, *б*) состоит из вращающегося зубчатого ротора 1 и неподвижного постоянного магнита 2 с магнитопроводом 3, на котором намотана обмотка 4. При вращении ротора к магнитопроводу

попеременно подходит то выступ, то впадина ротора. Это приводит к изменению магнитного потока Φ в магнитопроводе и появлению в обмотке напряжения, амплитуда и частота которого пропорциональны угловой скорости ротора. Между частотой пульсаций напряжения f , Гц, и угловой скоростью ω , рад/с, ротора существует следующая зависимость:

$$f = z\omega / 2\pi, \quad (4.3)$$

где z – число зубьев ротора.

4.2 Описание экспериментальной установки

Лабораторная установка для определения статических характеристик датчиков угловой скорости изображена на рисунке 4.3. Она включает в себя индукционный датчик с зубчатым ротором 3, тахогенератор переменного тока 4, приводной электродвигатель постоянного тока 1, источник напряжения 2, выпрямительный блок 5, электроннолучевой осциллограф 9, блок сопротивлений 6 и вольтметры: аналоговый 7 и цифровой 8.

Зубчатый ротор индукционного датчика установлен на выходном валу приводного электродвигателя. Он выполнен в виде шестерни с числом зубьев $z = 37$. Характер измерения напряжения в обмотке индукционного датчика при его работе регистрируется электроннолучевым осциллографом С1-54, а частота пульсаций напряжения – цифровым вольтметром ЦАТ-4800.

Вал тахогенератора 4 кинематически связан с выходным валом приводного электродвигателя 1. Путем изменения напряжения источника питания 2 можно в широких пределах варьировать скорость вращения приводного электродвигателя, а значит, и тахогенератора.

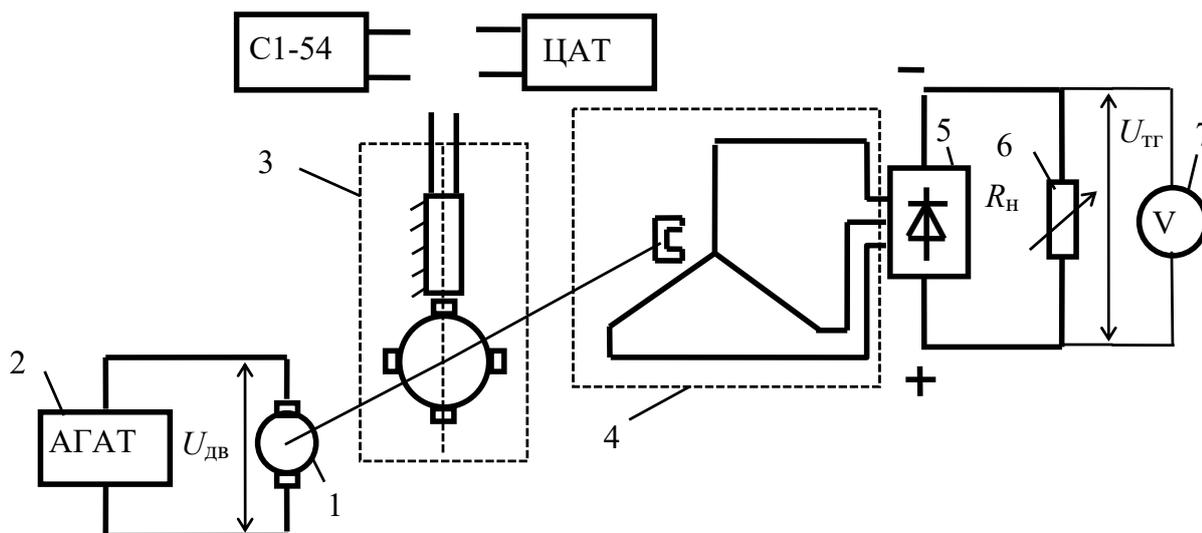


Рисунок 4.3 – Схема лабораторной установки для определения статических характеристик датчиков скорости вращения

4.4 Содержание отчета

- 1 Принципиальные схемы исследуемых датчиков и лабораторных установок.
- 2 Таблица 4.1.
- 3 Статические характеристики тахогенератора при различных нагрузках.
- 4 Анализ влияния сопротивления нагрузки на коэффициент чувствительности протекания статической характеристики тахогенератора.
- 5 Значения коэффициентов чувствительности тахогенератора.
- 6 Графики изменения напряжения в обмотке индуктивного датчика, расчет амплитуды и частоты импульсов датчика.

Контрольные вопросы

- 1 Принцип работы тахогенератора переменного тока, индукционного датчика.
- 2 Что называется статической характеристикой датчика?
- 3 В чем заключается методика экспериментального определения статической характеристики датчиков?
- 4 Как определить чувствительность датчика по линейной и нелинейной статической характеристике?
- 5 Перечислите основные параметры датчиков.

5 Лабораторная работа № 5. Определение амплитудно-частотной характеристики двухмассовой колебательной системы

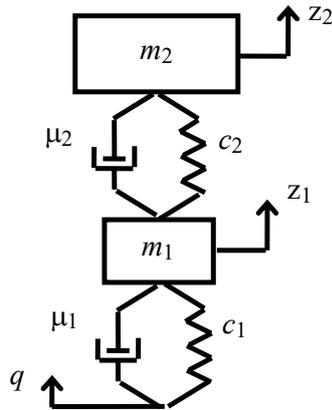
Цель работы: определить экспериментальным и теоретическим путем амплитудно-частотную характеристику двухмассовой колебательной системы.

5.1 Необходимые теоретические сведения

При гармоническом входном воздействии $q(t)$ в двухмассовой колебательной системе (рисунок 5.1) возникают вынужденные колебания. При этом массы m_1 и m_2 будут совершать вертикальные колебания с частотой, равной частоте входного воздействия. Для оценки влияния параметров колебательной системы ($m_1, m_2, c_1, c_2, \mu_1$ и μ_2) на амплитуды перемещений, скоростей и ускорений сосредоточенных масс можно использовать амплитудно-частотные характеристики (АЧХ). Амплитудно-частотной характеристикой называется зависимость отношения амплитуд колебаний сигналов на выходе и входе системы от частоты входного воздействия:

$$A(\omega) = A_{\text{вых}} / A_{\text{вх}}. \quad (5.1)$$

Для рассматриваемой системы $A_{\text{вх}} = q$. АЧХ может быть построена теоретически или определена экспериментально.



m_1, m_2 – сосредоточенные массы; c_1, c_2 – коэффициент жесткости упругих элементов; μ_1, μ_2 – коэффициент вязкого трения

Рисунок 5.1 – Динамическая модель двухмассовой колебательной системы

5.2 Экспериментальные исследования

Принципиальная схема экспериментальной установки показана на рисунке 5.2.

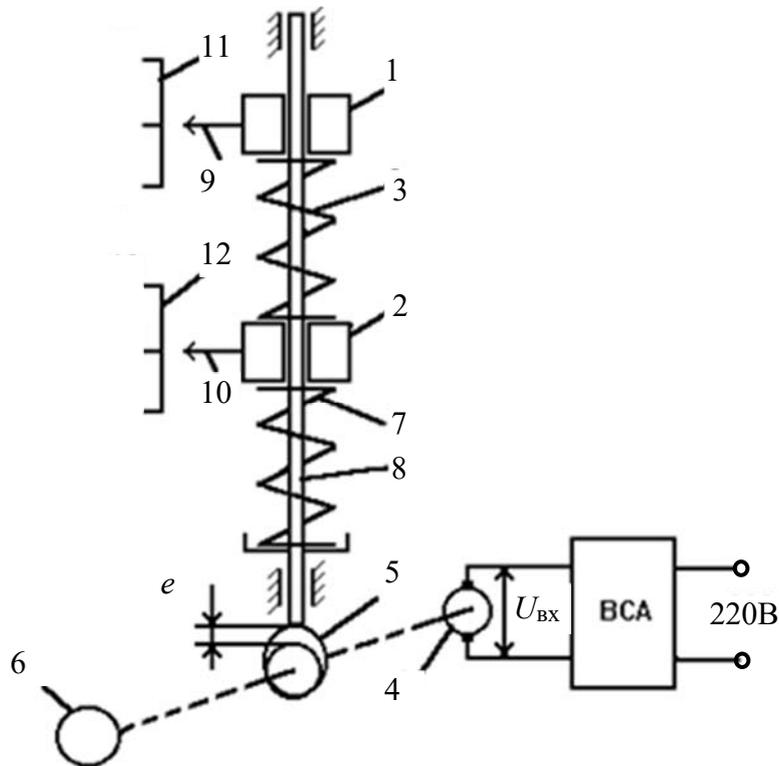


Рисунок 5.2 – Схема экспериментальной установки

Она состоит из двухмассовой колебательной системы, выполненной в виде грузиков 1, 2, соединенных пружиной 3, и генератора гармонических колебаний, состоящего из электродвигателя постоянного тока 4, на валу которого установлен эксцентрик 5 с эксцентриситетом $e = 6$ мм. Для измерения угловой скорости эксцентрика служит тахометр 6. Взаимодействие грузиков с генератором колебаний осуществляется посредством пружины 7, один конец которой соединен с грузом 2, а второй – с толкателем 8.

При включении электродвигателя эксцентрик начинает вращаться, вызывая колебания толкателя по гармоническому закону:

$$y = A_{\text{вх}} \sin(\omega t), \quad (5.2)$$

где $A_{\text{вх}}$, ω – амплитуда и частота колебаний толкателя, причем $A_{\text{вх}} = 0,5e$.

Частоту колебаний толкателя можно варьировать в широких пределах путем изменения напряжения источника питания ВСА-24М. Для регистрации амплитуды колебаний грузиков служат указатели 9, 10 и измерители линейных перемещений 11, 12.

Экспериментальное определение амплитудно-частотных характеристик

1 Установите переключатель режимов работы электродвигателя в положение «Выкл».

2 Включите источник питания ВСА-24М и установите напряжение $U_{\text{вх}} = 1,5 \dots 2,0$ В.

3 Переведите переключатель режимов работы электродвигателя в положение «Вкл».

4 Регулируя напряжение $U_{\text{вх}}$, добейтесь минимально возможной устойчивой скорости вращения вала электродвигателя ω_{min} .

5 Определите амплитуды колебаний грузиков A_1 и A_2 и угловую скорость вала электродвигателя ω_{min} . Результаты замеров занесите в таблицу 5.1.

6 Повторите п. 5 не менее семи раз при различных скоростях вращения вала электродвигателя из интервала $\omega_{\text{min}}, \dots, \omega_{\text{max}}$, где $\omega_{\text{max}} = 700$ об/мин.

7 По результатам испытаний постройте амплитудно-частотные характеристики исследуемой системы по каналам: входное воздействие-перемещение первого груза и входное воздействие-перемещение второго груза.

8 Используя АЧХ, определите показатели качества функционирования исследуемой системы.

Таблица 5.1 – Результаты испытаний

Номер	Угловая скорость вала электродвигателя ω , рад/с	Амплитуда колебаний первого груза A_1 , мм	Амплитуда колебаний второго груза A_2 , мм	$A_1(\omega) = A_1/A_{\text{вх}}$	$A_2(\omega) = A_2/A_{\text{вх}}$
1					

5.3 Теоретические исследования

Для одного из вариантов построения двухмассовой колебательной системы (таблица 5.2) выполните следующее:

- используя принцип Даламбера [2, 3] или структурно-матричный метод [4], составьте дифференциальные уравнения движения системы;
- представьте уравнения динамики системы в стандартной форме. Для этого члены дифференциального уравнения, содержащие выходную величину и ее производные, запишите в левой части уравнения, а все остальные члены – в правой. После этого разделите все члены уравнения на коэффициент, стоящий при выходной величине. Если в правой части уравнения содержатся производные, то члены с входной величиной и ее производными объедините в одну группу, а коэффициент при соответствующей входной величине вынесите за скобки;
- выполните прямое преобразование Лапласа над уравнениями динамики;
- исключите из уравнений лишнюю координату (только для вариантов 1–4 и 6);
- найдите передаточную функцию системы по заданному каналу передачи воздействий. Для этого разделите изображение по Лапласу выходной величины на изображение по Лапласу входной величины. Полученное соотношение и будет являться передаточной функцией;
- используя передаточную функцию, получите уравнение АЧХ;
- постройте АЧХ системы. Результаты расчетов занесите в таблицу 5.3;
- используя АЧХ, определите показатели качества функционирования исследуемой системы.

Таблица 5.2 – Параметры двухмассовой колебательной системы

Номер варианта	m_1 , кг	m_2 , кг	c_1 , кН/м	c_2 , кН/м	μ_1 , кН·с/м	μ_2 , кН·с/м	Канал передачи воздействий	
							Вход	Выход
1	500	150	310	42	1	5	$q(t)$	$z_1(t)$
2	400	400	500	160	0	15	$q(t)$	$z_2(t)$
3	8500	1400	1000	554	2	20	$q(t)$	$z_1(t)$
4	500	150	310	42	0	5	$q(t)$	$z_2(t)$
5	2500	0	120	0	15	0	$q(t)$	$z_1(t)$
6	8500	1400	1000	554	0	20	$q(t)$	$z_2(t)$

Таблица 5.3 – Результаты расчётов

Частота входного воздействия ω , рад/с	Значение числителя передаточной функции Z_1	Значение знаменателя передаточной функции Z_2	$A(\omega) = Z_1/Z_2$
0			
10			
20			
...			

5.4 Содержание отчета

- 1 Схема лабораторной установки.
- 2 Таблица 5.1.
- 3 Графики АЧХ системы, построенные экспериментальным путем, и их анализ.
- 4 Таблица 5.3.
- 5 Вывод передаточной функции и уравнения АЧХ.
- 6 Графики АЧХ системы, построенные теоретическим путем, и их анализ.

Контрольные вопросы

- 1 Что такое АЧХ?
- 2 Расскажите о способах получения АЧХ.
- 3 Какие показатели качества функционирования системы можно определить по ее АЧХ?

6 Лабораторная работа № 6. Определение переходных характеристик типовых динамических звеньев САУ

Цель работы:

- определить опытным и расчетным путем переходные характеристики типовых звеньев и по ним найти параметры звеньев;
- сравнить результаты экспериментальных и теоретических исследований;
- переходные характеристики типовых динамических звеньев.

6.1 Необходимые теоретические сведения

Для упрощения математического описания работы САУ ее разбивают на типовые динамические звенья. Типовым динамическим звеном называется устройство любого физического вида и конструктивного оформления, обладающее одной степенью свободы и описываемое линейным дифференциальным уравнением не выше второго порядка. Основными видами типовых звеньев являются пропорциональные, апериодические, колебательные, дифференцирующие и интегрирующие звенья.

Типовое звено осуществляет преобразование входного воздействия $x(t)$ в выходной сигнал $y(t)$. Характер этого преобразования зависит от динамических свойств звена. Динамические свойства звеньев можно описать с помощью переходных характеристик.

Переходная характеристика $h(t)$ описывает закон изменения выходной величины звена во времени после того, как на вход звена, находящегося в состоянии покоя, подано единичное ступенчатое воздействие (рисунок 6.1).

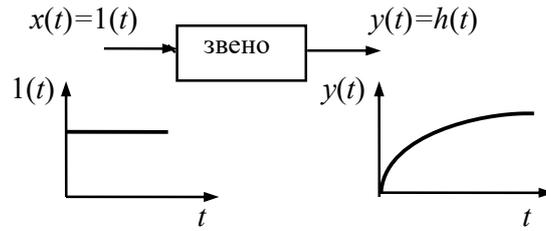


Рисунок 6.1 – К определению переходной характеристики звена

Если работа звена описывается линейным дифференциальным уравнением вида

$$a_3 \frac{d^3 y(t)}{dt^3} + a_2 \frac{d^2 y(t)}{dt^2} + a_1 \frac{dy(t)}{dt} + a_0 y(t) = b_0 x(t), \quad (6.1)$$

то для теоретического определения $h(t)$ необходимо найти решение уравнения (6.1) при $x(t) = 1(t)$ и нулевых начальных условиях $y(0) = \dot{y}(0) = \ddot{y}(0) = \ddot{y}(0)$.

Переходная характеристика может быть определена с помощью передаточной функции. В основу этого способа положено операционное преобразование Лапласа.

Прямое преобразование Лапласа заключается в переходе от функции действительного переменного $x(t)$ к функции $X(s)$ комплексного переменного $s = \alpha + j\omega$ в соответствии с соотношением

$$X(s) = L[x(t)] = \int_0^{\infty} x(t) e^{-st} dt, \quad (6.2)$$

где L – оператор Лапласа.

При нулевых начальных условиях

$$L\left[\frac{dx(t)}{dt}\right] = sX(s), \quad L\left[\frac{d^2 x(t)}{dt^2}\right] = s^2 X(s), \dots, L\left[\frac{d^n x(t)}{dt^n}\right] = s^n X(s). \quad (6.3)$$

Используя преобразование Лапласа к уравнению (6.1), с учетом соотношений (6.3), получим линейное дифференциальное уравнение относительно $Y(s)$

$$a_3 s^3 Y(s) + a_2 s^2 Y(s) + a_1 s Y(s) + Y(s) = b_0 X(s). \quad (6.4)$$

Передаточной функцией звена $W(s)$ называют отношение изображения Лапласа выходной величины к изображению Лапласа входной величины при нулевых начальных условиях

$$W(s) = \frac{Y(s)}{X(s)} = \frac{b_0}{a_3 s^3 + a_2 s^2 + a_1 s + a_0}. \quad (6.5)$$

Переходную характеристику звена находят, используя обратное преобразование Лапласа:

$$y(t) = L^{-1}[Y(s)] = L^{-1}[X(s)W(s)] = L^{-1}\left[\frac{1}{s}W(s)\right]. \quad (6.6)$$

Здесь учтено, что $x(t) = 1(t)$ и $L^{-1}[X(s)] = \frac{1}{s}$.

Прямое и обратное преобразование Лапласа выполняют, как правило, с помощью таблиц преобразования Лапласа.

Пример – Определим переходные характеристики апериодического звена (рисунок 6.2).

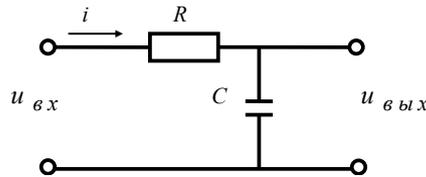


Рисунок 6.2 – Схема апериодического звена первого порядка

Для этого составим уравнение динамики звена. На основании второго закона Кирхгофа

$$u_{\text{вх}} = iR + u_{\text{вых}}, \quad (6.7)$$

где i – ток, протекающий в контуре.

Напряжение на конденсаторе

$$u_{\text{вых}} = \frac{1}{C} \int i dt, \quad (6.8)$$

Продифференцировав уравнение (6.8), найдем, что

$$i = C \frac{du_{\text{вых}}}{dt}. \quad (6.9)$$

Подставив (6.9) в (6.7), получаем

$$RC \frac{du_{\text{вых}}}{dt} + u_{\text{вых}} = u_{\text{вх}}. \quad (6.10)$$

Используя прямое преобразование Лапласа к уравнению (6.10), находим

$$RCsU_{\text{вых}}(s) + U_{\text{вых}}(s) = U_{\text{вх}}(s), \quad (6.11)$$

или

$$(Ts + 1)U_{\text{вых}}(s) = U_{\text{вх}}(s), \quad (6.12)$$

где T – постоянная времени звена, $T = RC$.

Тогда передаточная функция звена

$$W(s) = \frac{U_{\text{вых}}(s)}{U_{\text{вх}}(s)} = \frac{1}{Ts + 1}. \quad (6.13)$$

Переходная характеристика звена

$$U_{\text{ВЫХ}}(t) = L^{-1} \left[\frac{1}{s} \frac{1}{Ts + 1} \right] = 1 - e^{-\frac{t}{T}}. \quad (6.14)$$

График переходной характеристики показан на рисунке 6.3.

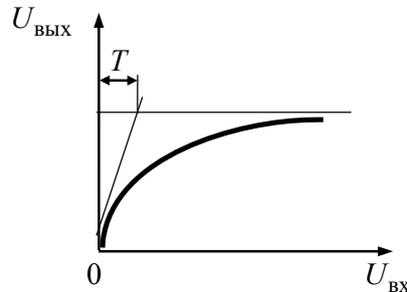


Рисунок 6.3 – График переходной характеристики апериодического звена

6.2 Описание лабораторной установки

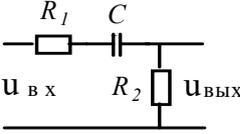
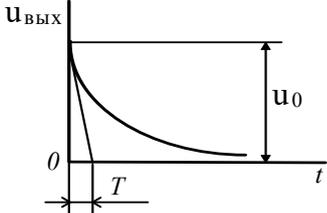
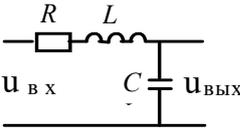
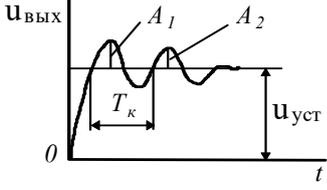
Лабораторная установка для экспериментального определения переходных характеристик типовых динамических звеньев включает в себя генератор сигналов ГЗ-112, электроннолучевой осциллограф С1-54 и панель с набранными на ней электрическими схемами исследуемых звеньев. Электрические схемы звеньев и их параметры приведены в таблице 6.1.

Генератор сигналов является источником прямоугольных сигналов, подаваемых на входы исследуемых звеньев. Осциллограф служит для визуального наблюдения и измерения электрических сигналов на выходе звеньев.

Таблица 6.1 – Схемы и параметры электрических звеньев

Название звена	Электрическая модель	Параметры модели	Переходная характеристика
Пропорциональное		$R_1 = 68 \text{ кОм}$ $R_2 = 68 \text{ кОм}$	
Апериодическое		$R = 20 \text{ кОм}$ $C = 0,05 \text{ мкФ}$	

Окончание таблицы 6.1

Название звена	Электрическая модель	Параметры модели	Переходная характеристика
Реальное дифференцирующее		$R_1 = 490 \text{ Ом}$ $R_2 = 5,1 \text{ кОм}$ $C = 0,05 \text{ мкФ}$	
Колебательное		$R = 270 \text{ Ом}$ $L = 0,2 \text{ Гн}$ $C = 0,161 \text{ мкФ}$	

6.3 Экспериментальные исследования

1 С помощью преподавателя освоить основные приемы работы с электронно-лучевым осциллографом и генератором сигналов.

2 Включить осциллограф и генератор сигналов.

3 Перевести тумблер переключения режима работы генератора в режим прямоугольного сигнала.

4 Сигнал с выхода генератора подать на вход осциллографа. Зарисовать форму сигнала и измерить его величину.

5 Сигнал с выхода генератора подать на вход звена, а сигнал с выхода звена – на вход осциллографа.

6 Используя органы управления осциллографом «ДЛИТ/СМ», «МНОЖИТЕЛЬ» и органы управления генератором «ЧАСТОТА Н», «МНОЖИТЕЛЬ», подобрать такую длительность следования прямоугольных импульсов, чтобы за время их действия переходный процесс в звене успел закончиться. Это дает право рассматривать каждый прямоугольный импульс как ступенчатый сигнал, поданный на вход звена.

7 Зарисовать форму сигнала на выходе звена, действующую в течение одного прямоугольного импульса, и измерить необходимые параметры (см. таблицу 6.1).

8 Выполнить пп. 5–7 для каждого из четырех звеньев, представленных на панели.

9 По параметрам входного и выходного сигналов в установившемся режиме определить коэффициент передачи звена k . По параметрам выходного сигнала в переходном режиме определить: постоянную времени T для инерционного, реального дифференцирующего и колебательного звена; относительный коэффициент затухания ξ для колебательного звена. Параметры T и ξ колебательного звена определять по формулам

$$T = \frac{T_k}{\sqrt{4\pi^2 + \left(\ln \frac{A_1}{A_2}\right)^2}}; \quad \xi = \frac{\ln \frac{A_1}{A_2}}{\sqrt{4\pi^2 + \left(\ln \frac{A_1}{A_2}\right)^2}}. \quad (6.15)$$

6.4 Теоретические исследования

Для каждого из четырех звеньев, принципиальные схемы и параметры электрических моделей которых представлены в таблице 6.1, выполнить следующее:

- по принципиальной схеме модели вывести дифференциальное уравнение звена и привести его к стандартной форме;
- построить теоретическую переходную характеристику звена и определить числовые значения основных параметров, характеризующих его статические и динамические свойства: для пропорционального – k ; для апериодического и реального дифференцирующего – k , T ; для колебательного – k , T , ξ .

Результаты экспериментальных и теоретических исследований представить в виде таблицы 6.2 и сравнить их.

Таблица 6.2 – Результаты экспериментальных и теоретических исследований

Данные	Тип звена							
	Пропорциональное	Апериодическое		Дифференцирующее		Колебательное		
	k	k	T	k	T	k	T	ξ
Теоретические								
Экспериментальные								

6.5 Содержание отчета

Для каждого звена должно быть приведено следующее:

- наименование звена и принципиальная схема электрической модели;
- вывод уравнения динамики звена;
- вывод передаточной функции и определение параметров звена;
- теоретическая переходная характеристика звена;
- экспериментально снятые входной сигнал и переходная характеристика звена с необходимыми параметрами;
- определение параметров звена по переходной характеристике, полученной теоретическим и экспериментальным путем;
- таблица 6.2;
- результаты сравнения экспериментальных и теоретических исследований.

Контрольные вопросы

- 1 Что такое типовое динамическое звено?
- 2 Назовите способы описания динамических свойств звеньев.
- 3 Что такое передаточная функция звена?
- 4 Что такое переходная характеристика звена?
- 5 В чем физический смысл постоянной времени звена?
- 6 Нарисуйте переходные характеристики типовых звеньев.
- 7 Изложите методику экспериментального определения переходной характеристики динамических звеньев.
- 8 Изложите методику теоретического определения переходной характеристики динамических звеньев.

7 Лабораторная работа № 7. Определение частотных характеристик типовых динамических звеньев САУ

Цель работы:

- определить опытным и расчетным путем частотные характеристики типовых звеньев и по ним найти параметры звеньев;
- сравнить результаты экспериментальных и теоретических исследований.

7.1 Необходимые теоретические сведения

Частотные характеристики устанавливают связь параметров установившихся вынужденных колебаний на выходе звена с параметрами входного гармонического воздействия.

Пусть на вход звена (рисунок 7.1) подано гармоническое воздействие вида

$$x(t) = A_1 \sin(\omega t + \varphi_1), \quad (7.1)$$

где A_1 – амплитуда;

ω – угловая частота воздействия;

φ_1 – начальная фаза колебаний.

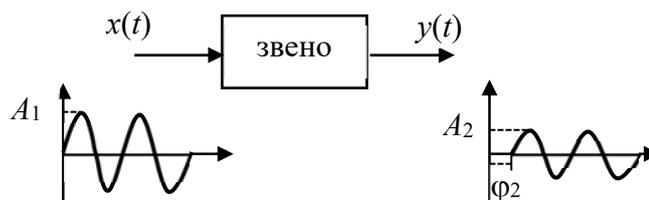


Рисунок 7.1 – К определению частотных характеристик

По окончании переходного процесса на выходе звена будут существовать гармонические колебания с той же частотой, что и входные колебания, но отличающиеся в общем случае по амплитуде и фазе, т. е.

$$y(t) = A_2 \sin(\omega t + \varphi_2), \quad (7.2)$$

где A_2 – амплитуда выходного сигнала;

φ_2 – начальная фаза колебаний выходного сигнала.

Если изменять частоту $\omega \in [0, \dots, \infty]$ и определять установившееся значения A_2 и φ_2 выходных колебаний для различных частот, то можно получить зависимость отношения амплитуд колебаний выходного и входного сигнала от частоты

$$A(\omega) = \frac{A_2}{A_1}, \quad (7.3)$$

которую называют амплитудно-частотной характеристикой (АЧХ) звена, и зависимость разности фаз между выходным и входным сигналами от частоты

$$\varphi(\omega) = \varphi_2 - \varphi_1, \quad (7.4)$$

которую называют фазово-частотной характеристикой (ФЧХ) звена.

АЧХ показывает, с каким усилением или ослаблением пропускает звено гармонические сигналы различной частоты. Если $A(\omega) > 1$, то звено усиливает входной сигнал, а при $A(\omega) < 1$ – ослабляет. ФЧХ показывает, какое отставание или опережение выходного сигнала по фазе создает звено при различных частотах.

АЧХ и ФЧХ можно объединить в одну амплитудно-фазово-частотную характеристику (АФЧХ) звена. Аналитическое выражение для АФЧХ можно получить из передаточной функции звена $W(s)$. Для этого надо в $W(s)$ заменить s на $j\omega$. Если полученное комплексное выражение $W(j\omega)$ представить в показательной форме, то модуль его будет являться амплитудно-частотной характеристикой $A(\omega)$, а аргумент – фазово-частотной характеристикой $\varphi(\omega)$, т. е.

$$W(j\omega) = A(\omega)e^{j\varphi(\omega)}. \quad (7.5)$$

АФЧХ можно представить также в алгебраической форме как

$$W(j\omega) = U(j\omega) + jV(j\omega), \quad (7.6)$$

где $U(j\omega)$ – вещественная частотная характеристика;

$V(j\omega)$ – мнимая частотная характеристика.

Тогда

$$A(\omega) = \sqrt{U^2(\omega) + V^2(\omega)}; \quad (7.7)$$

$$\varphi(\omega) = \operatorname{arctg} \frac{V(\omega)}{U(\omega)}. \quad (7.8)$$

Пример – Определим частотные характеристики аperiodического звена (см. рисунок 6.2). Для этого перейдем от передаточной функции (6.13) к АФЧХ, заменив в $W(s)$ s на $j\omega$. Получим

$$W(\omega) = \frac{1}{1 + Tj\omega} = \frac{1(1 - Tj\omega)}{(1 + Tj\omega)(1 - Tj\omega)} = \frac{1}{1 + T^2\omega^2} - j \frac{\omega T}{1 + T^2\omega^2}. \quad (7.9)$$

Сравнивая (7.9) с (7.6), находим уравнения вещественной

$$U(\omega) = \frac{1}{1 + T^2\omega^2} \quad (7.10)$$

и мнимой

$$V(\omega) = \frac{-\omega T}{1 + T^2\omega^2} \quad (7.11)$$

частотной характеристик.

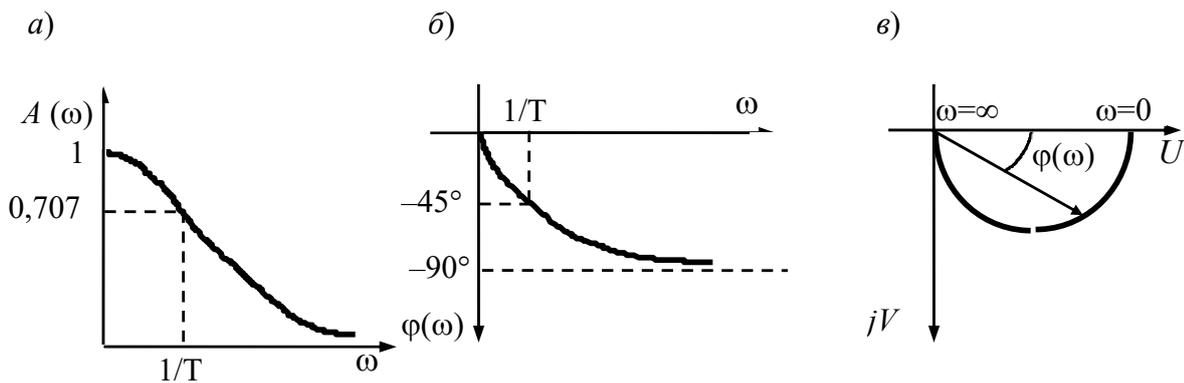
Используя зависимости (7.7) и (7.8), находим АЧХ как

$$A(\omega) = \frac{1}{\sqrt{1 + T^2\omega^2}} \quad (7.12)$$

и ФЧХ как

$$\varphi(\omega) = -\text{arctg}(T\omega). \quad (7.13)$$

Графики АЧХ, ФЧХ и АФЧХ звена, построенные по уравнениям (7.10)–(7.13), показаны на рисунке 7.2.



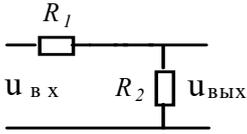
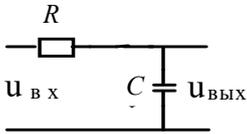
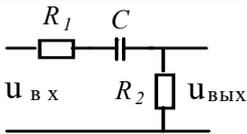
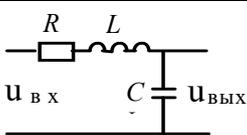
a – АЧХ; $б$ – ФЧХ; $в$ – АФЧХ

Рисунок 7.2 – Частотные характеристики аperiodического звена

7.2 Описание лабораторной установки

Лабораторная установка для экспериментального определения частотных характеристик типовых динамических звеньев включает в себя генератор сигналов ГЗ-112, электронно-лучевой осциллограф С1-54 и панель с набранными на ней электрическими схемами исследуемых звеньев. Электрические схемы звеньев и их параметры приведены в таблице 7.1.

Таблица 7.1 – Схемы и параметры звеньев

Название звена	Электрическая модель	Параметры модели
Пропорциональное		$R_1 = 68 \text{ кОм}$ $R_2 = 68 \text{ кОм}$
Апериодическое		$R = 20 \text{ кОм}$ $C = 0,05 \text{ мкФ}$
Реальное дифференцирующее		$R_1 = 490 \text{ Ом}$ $R_2 = 5,1 \text{ кОм}$ $C = 0,05 \text{ мкФ}$
Колебательное		$R = 270 \text{ Ом}$ $L = 0,2 \text{ Гн}$ $C = 0,161 \text{ мкФ}$

Генератор сигналов является источником синусоидальных сигналов подаваемых на входы исследуемых звеньев. Осциллограф служит для визуального наблюдения и измерения электрических сигналов на выходе звеньев.

7.3 Экспериментальные исследования

1 С помощью преподавателя освоить основные приемы работы с электронно-лучевым осциллографом и генератором сигналов.

2 Включить осциллограф и генератор сигналов.

3 Перевести тумблер переключения режима работы генератора в режим гармонического сигнала.

4 Сигнал с выхода генератора подать на вход осциллографа. Установить амплитуду гармонического сигнала равной 1...2 В. Визуально определить, как меняется форма сигнала при изменении его частоты. Регулировку амплитуды и частоты производить с помощью соответствующих органов управления генератором.

Зарисовать форму сигнала при двух различных частотах и одинаковой амплитуде.

5 Сигнал с выхода генератора подать на вход звена, а сигнал с выхода звена – на вход осциллографа. Изменяя частоту входного сигнала от 20 до 2000 Гц при постоянной амплитуде, замерять амплитуду выходного сигнала. Убедиться, что частота выходного сигнала соответствует частоте входного сигнала. Результаты эксперимента свести в таблицу 7.2.

6 По данным таблицы 7.2 построить АЧХ звена, учитывая, что $\omega = 2\pi f$.

Таблица 7.2 – Результаты испытаний

Но-мер	Частота входного сигнала f , Гц	Амплитуда входного сигнала A_1 , В	Амплитуда выходного сигнала A_2 , В	$A(\omega) = \frac{A_2}{A_1}$
1	20			
2	200			
3	400			

7 Повторить п. 5 для каждого звена.

8 По построенным характеристикам $A(\omega)$ определить основные параметры звеньев: коэффициент передачи k – для каждого звена; постоянную времени T – для инерционного, дифференцирующего и колебательного звеньев; коэффициент затухания ξ – для колебательного звена.

7.4 Теоретические исследования

Для каждого из четырех звеньев, принципиальные схемы и параметры электрических моделей которых представлены в таблице 7.1, выполнить следующее

1 По принципиальной схеме модели вывести дифференциальное уравнение звена и привести его к стандартной форме.

2 Результаты экспериментальных и теоретических исследований представить в виде таблицы 7.3 и сравнить их.

Таблица 7.3 – Результаты экспериментальных и теоретических исследований

Данные	Тип звена							
	Пропорциональное	Апериодическое		Дифференцирующее		Колебательное		
		k	k	T	k	T	k	T
Теоретические								
Экспериментальные								

7.5 Содержание отчета

Для каждого звена должно быть приведено следующее:

- наименование звена и принципиальная схема электрической модели;
- вывод уравнения динамики звена;
- вывод передаточной функции и определение параметров звена;

- вывод уравнений АФЧХ, АЧХ и ФЧХ;
- построение в общем виде АФЧХ, АЧХ и ФЧХ;
- экспериментально снятые входной сигнал и переходная характеристика с необходимыми параметрами;
- вид входного сигнала при снятии АЧХ;
- таблица 7.2;
- АЧХ, построенная по результатам экспериментальных исследований;
- определение параметров звена по АЧХ;
- таблица 7.3;
- результаты сравнения экспериментальных и теоретических исследований.

Контрольные вопросы

- 1 Что такое типовое динамическое звено?
- 2 Назовите способы описания динамических свойств звеньев.
- 3 Что такое передаточная функция звена?
- 4 Что такое частотная характеристика звена?
- 5 Перечислите виды частотных характеристик звеньев.
- 6 Нарисуйте переходные характеристики типовых звеньев.
- 7 Опишите устройство экспериментальной установки.
- 8 Изложите методику экспериментального определения частотных характеристик динамических звеньев.
- 9 Изложите методику теоретического определения частотных характеристик динамических звеньев.

Список литературы

- 1 **Ксенович, И. П.** Теория и проектирование автоматических систем: учебник / И. П. Ксенович, В. П. Тарасик. – Москва: Машиностроение, 1996. – 480 с.
- 2 **Гайдук, А. Р.** Теория автоматического управления в примерах и задачах с решениями в MATLAB: учебное пособие / А. Р. Гайдук, В. Е. Беляев, Т. А. Пьявченко. – Санкт-Петербург: Лань, 2016. – 464 с.