

ФЕДЕРАЛЬНОЕ ГОСУДАРСТВЕННОЕ БЮДЖЕТНОЕ ОБРАЗОВАТЕЛЬНОЕ  
УЧРЕЖДЕНИЕ ВЫСШЕГО ОБРАЗОВАНИЯ  
«РЫБИНСКИЙ ГОСУДАРСТВЕННЫЙ АВИАЦИОННЫЙ ТЕХНИЧЕСКИЙ  
УНИВЕРСИТЕТ ИМЕНИ П. А. СОЛОВЬЕВА»  
(РГАТУ имени П.А. Соловьева)

## ОБРАЗОВАТЕЛЬНАЯ ПРОГРАММА ПОДГОТОВКИ АСПИРАНТОВ

направление подготовки 09.06.01 Информатика и вычислитель-  
ная техника

профиль подготовки 05.13.05 «Элементы и устройства вычислительной тех-  
ники и систем управления»

# ПРАКТИКУМ

по дисциплине

Способы и устройства регулирования и стабилизации  
переменного напряжения

Разработал: д.т.н. Юдин В. В.

Рыбинск, 2014 г.

## 1. Регулировочные характеристики потенциметрического регулятора

Для схемы регулятора, приведенной на рисунке 1, получить зависимость напряжения  $U$  на нагрузке  $R$  от положения подвижного токосъемного контакта  $x \in [0,1]$ , считая линейной зависимость сопротивления  $\rho(x) = x / \rho_{\max}$ , где  $\rho_{\max}$  - максимальное значение переменного сопротивления.

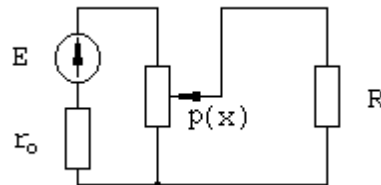


Рисунок 1

Построить семейство зависимостей  $U(x)$  при различных значениях параметров схемы.

## 2. Методы включения переменных резисторов

Дано переменное сопротивление с линейной регулировочной характеристикой  $\rho(x) = x / \rho_{\max}$ , где  $\rho_{\max}$  - максимальное значение переменного сопротивления. Его изображение приведено на рисунке 2.

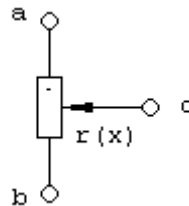


Рисунок 2

Определить зависимость  $r(x)$  сопротивления от положения подвижного токосъемного контакта в диапазоне  $x \in [0,1]$  для трех вариантов схем включения, приведенных на рисунке 3

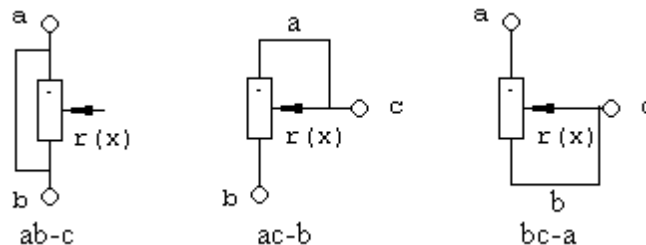


Рисунок 3

Построить эти зависимости.

### 3. Спектральный состав импульсного напряжения

Для симметричной периодической (с периодом  $T$ ) последовательности импульсов длительностью  $\tau$  имеет место разложение в комплексный ряд Фурье

$$r(t, T, \tau) = \sum_{n=-\infty}^{\infty} r_n e^{jn \frac{2\pi}{T} t},$$

где

$$r_n = \frac{2\tau}{T} \frac{\sin\left(n\pi \frac{\tau}{T}\right)}{\left(n\pi \frac{\tau}{T}\right)}.$$

Определить компоненты спектра первых девяти гармоник для импульсов различной длительности  $\tau \in \{T/32, T/16, T/8, T/4, T/2\}$ .

Построить зависимости амплитуды гармоник от их порядкового номера.

Построить зависимости фазы гармоник от их порядкового номера.

### 4. Действующее и среднее значения искаженного напряжения

Построить временные диаграммы одного периода изменения напряжения  $u(t)$  для следующих случаев:

$$u_1(t) = \sin(2\pi t),$$

$$u_2(t) = \sin[2\pi(t - \pi/3)],$$

$$u_3(t) = \cos(2\pi t) + \frac{1}{3} \cos(6\pi t),$$

$$u_3(t) = \cos(2\pi t) + \frac{1}{3} \cos(6\pi t) + \frac{1}{5} \cos(10\pi t),$$

$$u_3(t) = 2\pi$$

Определить численным методом действующие значения этих напряжений.

Определить аналитические значения для действующих значений напряжений и сравнить их с расчетными.

### 5. Одностороннее фазовое регулирование сети

Построить диаграммы напряжения на нагрузке при одностороннем тиристорном фазовом регулировании для диапазона изменения фазы включения тиристора  $\alpha \in [0, \pi]$

Построить зависимости амплитуд первых семи гармоник от угла включения.

Построить зависимости коэффициента гармоник от угла включения.

## 6. Двухстороннее симметричное регулирование сети

Построить диаграммы напряжения на нагрузке при двухстороннем тиристорном регулировании для диапазона изменения длительности включения тиристора  $\tau \in [0, \pi/2]$ .

Построить зависимости амплитуд первых семи гармоник от длительности включения тиристора.

Построить зависимости коэффициента гармоник от длительности включения тиристора.

## 7. Регулирование изменением числа полувольт

Получить аналитическое выражение для зависимости амплитуд гармоник напряжения, сформированного при регулировании напряжения гармонической сети

$$e = \sin\left(\frac{2\pi}{T}t\right)$$

путем изменения числа полувольт в периоде длительностью  $T_R = 8T$ .

Построить зависимость первых 12 гармоник от числа полувольт.

## 8. Спектральный состав усеченной синусоиды

Используя аппарат дискретного преобразования Фурье (функция  $fft$ ), получить зависимости комплексных амплитуд спектра для усеченной гармоники при различных значениях моментов открытия и закрытия ключа.

Изобразить графически полученные результаты.

## 9. Спектральный состав модулированного сигнала

Получить аналитически разложение на спектральные составляющие

сигнала с амплитудной модуляцией  $e = E(t) \sin\left(\frac{2\pi}{T}t\right)$  при

$$E(t) = \sin\left(N \frac{2\pi}{T}t\right) \text{ для трех вариантов параметра: } N = \{4, 8, 12\}.$$

Отобразить спектры графически.

## 10. Изменение уровня гармоник при регулировании напряжения сети.

В процессе регулирования напряжения происходит изменение его формы, показанное на рисунке 4. При этом в качестве регулируемого параметра могут выступать уровни амплитуды  $u_q$ ,  $u_{q+1}$  и момент их переключения  $t_l$ .

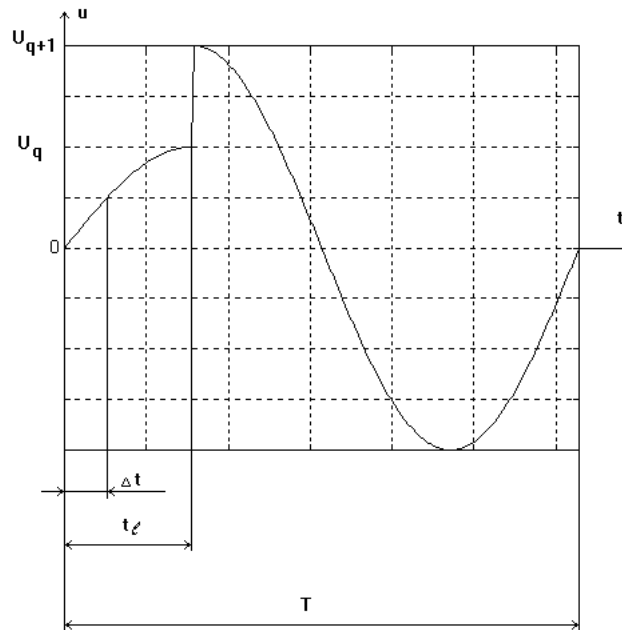


Рисунок 4

Используя аппарат дискретного преобразования Фурье (функция  $fft$ ), исследовать зависимости комплексных амплитуд спектра напряжения при различных значениях параметров регулирования:

- амплитуды  $U_q$ ,
- амплитуды  $U_{q+1}$ ,
- момента переключения  $t_l$ .

### 11. Определение регулировочной характеристики при одностороннем фазовом регулировании

Получить аналитическое выражение для действующего значения напряжения сети  $e = E(t) \sin\left(\frac{2\pi}{T}t\right)$  при его одностороннем фазовом регулировании, длительности периода регулирования  $T_R = 4T$  и изменении угла включения в диапазоне  $\alpha \in [0, T_R]$ .

Построить зависимость действующего значения от угла включения.

### 12. Определение регулировочной характеристики при двухстороннем фазовом регулировании

Получить аналитическое выражение для действующего значения напряжения на нагрузке при двухстороннем несимметричной фазовом регулировании.

Построить диаграммы напряжения на нагрузке для диапазона изменения момента включения тиристора  $t_1 \in [0, \pi]$  и момента его отключения  $t_2 \in [e_1, \pi]$ ,  $t_1 < t_2$ .

Исследовать зависимость действующих значений напряжения от моментов включения и выключения.

Предложить вариант графического отображения результатов.

### 13. Регулирование с широтно-импульсной модуляцией

Последовательность прямоугольных импульсов напряжения различной длительности подается на  $RL$ -цепь. Известно, что при воздействии на такую цепь постоянной э.д.с.  $E$  ток изменяется по следующему закону

$$i(t) = i_0 e^{-\frac{t}{\tau}} + \frac{E}{r} \left( 1 - e^{-\frac{t}{\tau}} \right),$$

где  $i_0$  - начальное значение тока,  $t$  - текущее время.

Используя приведенное соотношение исследовать зависимость тока от времени для нескольких импульсов.

### 14. Формирование напряжения времявариантного регулятора

Напряжение на выходе регулятора может быть представлено в виде

$$u(t) = u_C(t) + u_V(t),$$

где  $u_C(t), u_V(t)$  - соответственно нерегулируемый и регулируемый компоненты.

Для них имеем:

$$u_C(t) = U_C \sin(\omega t) \text{ и } u_V(t) = U_V s(t, T_R, t_N, t_K) \sin(\omega t).$$

Функция  $s(t, T_R, t_N, t_K)$  осуществляет периодическое выделение (с периодом  $T_R$ ) интервалов времени, начинающихся в моменты времени  $t_N$  и заканчивающиеся в моменты времени  $t_K$  относительно начала каждого полупериода. При этом параметры этой функции могут изменяться под действием управляющего кода.

Построить семейство временных диаграмм для регулирования при  $t_N \in [0, T_R]$  при  $T = 0,02, T_R = 2T, t_K \in T_R, U_C = 10, U_V = 2$ .

### 15. Влияние количества уровней регулирования на погрешность стабилизации

Стабилизатор напряжения, выполненный дискретно регулируемом трансформаторе (ДРТ), подключен к сети с э.д.с.  $E \in [199, 253]$  В.

Напряжение на нагрузке стабилизатора должно находиться в диапазоне значений  $U \in [198, 231]$  В.

Определить величины э.д.с. для точек переключений ДРТ и соответствующие им уровни коэффициентов передачи.

Построить зависимость  $U(E)$ .

Повторить исследование для диапазона допустимых напряжений на нагрузке  $U \in [209, 231]$  В.

Сравнить результаты.

### **16. Влияние нагрузки сети на нестабильность напряжения**

Источник э.д.с.  $E=10\text{ В}$  с внутренним сопротивлением  $r = 0,1\text{ Ом}$  подключен к переменной нагрузке  $R \in [1,2]\text{ Ом}$ .

Исследовать влияние нагрузки на сеть.

Построить зависимости тока в сети, напряжения на нагрузке, мощности в нагрузке и к.п.д. сети от сопротивления нагрузки.

### **17. Влияние остаточного сопротивления ключей на регулировочную характеристику цифрового регулятора**

Цифровой регулятор в одном из состояний представлен эквивалентной схемой, содержащей источник э.д.с.  $E=10\text{ В}$  с внутренним сопротивлением  $r = 0,1\text{ Ом}$ , подключенный через ключ  $r_k \in [0,12,015]\text{ Ом}$  к нагрузке  $R = 2\text{ Ом}$ .

Исследовать влияние сопротивления ключа на регулировочную характеристику.

Построить для указанного состояния цифрового регулятора зависимости тока в сети, напряжения на нагрузке, мощности в нагрузке от величины этого сопротивления.

### **18. Влияние частоты сети на регулировочную характеристику цифрового регулятора**

Цифровой регулятор в одном из состояний представлен эквивалентной схемой, содержащей источник э.д.с.  $E=10\text{ В}$  с внутренним сопротивлением  $r = 0,1\text{ Ом}$ , подключенный через ключ  $r_k = 0,15$  к нагрузке  $R = 2\text{ Ом}$ , параллельно которой включена индуктивность первичной обмотки трансформатора  $L_1 = 0,8\text{ Гн}$ .

Исследовать влияние частоты сети на регулировочную характеристику.

Построить для указанного состояния цифрового регулятора зависимость напряжения на нагрузке от частоты в диапазоне  $f \in [50 \pm 0,4]\text{ Гц}$ .

### **19. Влияние искажений сети на регулировочную характеристику цифрового регулятора**

Цифровой регулятор в одном из состояний представлен эквивалентной схемой, содержащей источник э.д.с.  $E=10\text{ В}$  с внутренним сопротивлением  $r = 0,1\text{ Ом}$ , подключенный через ключ  $r_k = 0,15$  к нагрузке  $R = 2\text{ Ом}$ , параллельно которой включена индуктивность первичной обмотки трансформатора  $L_1 = 0,8\text{ Гн}$ . При этом последовательно с внутренним сопротивлением источника включена индуктивность рассеяния  $L_S = 0,1\text{ Гн}$ .

Напряжение сети искажено таким образом, что амплитуды высших гармоник образуют ряд  $E_k = 100/k$ .

Исследовать влияние гармоник на регулировочную характеристику.

Построить для указанного состояния цифрового регулятора зависимость амплитуд гармоник напряжения на нагрузке от их порядкового номера до 41-й включительно.

## **20. Влияние магнитной проницаемости магнитопровода на регулировочную характеристику цифрового регулятора**

Цифровой регулятор в одном из состояний представлен эквивалентной схемой, содержащей источник э.д.с.  $E=10 В$  с внутренним сопротивлением  $r = 0,1$  Ом, подключенный через ключ  $r_k = 0.15$  к нагрузке  $R = 2$  Ом, параллельно которой включена индуктивность первичной обмотки трансформатора

$$L_1 = \frac{\mu\mu_0 S w_1^2}{l},$$

где  $\mu$  - магнитная проницаемость материала магнитопровода,

$\mu_0 = 4\pi \cdot 10^{-7} Гн/м$  - магнитная проницаемость вакуума,  $S$  - площадь поперечного сечения магнитопровода,  $l$  – средняя длина его магнитной силовой линии.

Исследовать влияние магнитной проницаемости магнитопровода на регулировочную характеристику.

Построить для указанного этого состояния цифрового регулятора зависимость напряжения на нагрузке от магнитной проницаемости в диапазоне ее значений  $\mu \in [10, 10000]$ .

## **21. Влияние нагрузки на регулировочную характеристику цифрового регулятора**

Цифровой регулятор в одном из состояний представлен эквивалентной схемой, содержащей источник э.д.с.  $E=10 В$  с внутренним сопротивлением  $r = 0,1$  Ом к нагрузке, которая нестабильна и может изменяться в процессе его работы.

Исследовать влияние нагрузки на регулировочную характеристику для случая, когда ее сопротивление является случайной величиной, подчиненной нормальному закону распределения с математическим ожиданием  $0.6$  Ом и дисперсией  $0.1 Ом^2$ .

Построить для указанного состояния гистограмму распределения напряжения на нагрузке.



## 22. Влияние комплексного характера нагрузки на регулировочную характеристику цифрового регулятора

Цифровой регулятор в одном из состояний представлен эквивалентной схемой, содержащей источник э.д.с.  $E=10\text{ В}$  с внутренним сопротивлением  $r = 0,1\text{ Ом}$  к и нагрузку, которая носит комплексный характер и помимо активной имеет также реактивную составляющую индуктивную  $Z = R + jX$ .

Исследовать влияние реактивной составляющей нагрузки на регулировочную характеристику для случая, когда  $R = 0,6\text{ Ом}$ , а  $X \in [1,2]\text{ Ом}$ .

Построить для указанного состояния регулятора зависимость напряжения на нагрузке и активной мощности в ней от реактивной составляющей сопротивления.

## 23. Влияние разброса параметров ключей на регулировочную характеристику цифрового регулятора

Цифровой регулятор в одном из состояний представлен эквивалентной схемой, содержащей источник э.д.с.  $E=10\text{ В}$  с внутренним сопротивлением  $r = 0,1\text{ Ом}$ , подключенный через ключ  $r_K$  к переменной нагрузке  $R$ .

Исследовать влияние сопротивления ключа на регулировочную характеристику, считая, что оно является случайной величиной, подчиненной нормальному закону распределения с математическим ожиданием  $0,1\text{ Ом}$  и дисперсией  $0,09\text{ Ом}^2$ .

Используя метод статистических испытаний, построить для указанного состояния цифрового регулятора гистограммы распределения сопротивлений ключей и напряжений на нагрузке.

## 24. Влияние температуры на регулировочную характеристику цифрового регулятора

Цифровой регулятор в одном из состояний представлен эквивалентной схемой, содержащей источник э.д.с.  $E=10\text{ В}$  с внутренним сопротивлением  $r = 0,1\text{ Ом}$ , подключенный через ключ  $r_K$  к сопротивлению нагрузки  $R$ .

Исследовать влияние температуры на регулировочную характеристику цифрового регулятора в диапазоне  $t \in [-40, +60]^\circ\text{C}$ , если известно, что температурные коэффициенты источника э.д.с., его внутреннего сопротивления, сопротивления ключа и сопротивления нагрузки соответственно равны  $\alpha_E = -10^{-4}\text{ град}^{-1}$ ,  $\alpha_r = 10^{-3}\text{ град}^{-1}$ ,  $\alpha_K = 4 \cdot 10^{-3}\text{ град}^{-1}$  и  $R = 2 \cdot 10^{-5}\text{ град}^{-1}$ .

Построить зависимости от температуры э.д.с., ее внутреннего сопротивления, сопротивления ключа, сопротивления нагрузки и напряжения на ней.