**Министерство науки и высшего образования РФ**



Кафедра **ТЕОРЕТИЧЕСКИХ ОСНОВ ЭЛЕКТРОТЕХНИКИ**

**Лабораторная работа № 1-8**

**по дисциплине «Теоретические основы электротехники»**

«Исследование линейной электрической цепи несинусоидального периодического тока»

|  |  |
| --- | --- |
| **Студент:** |  |
| **Группа:** |  |
| **Бригада:** |  |
| **Подпись студента:** |  |
| **Дата выполнения:** |  |
| **Дата защиты:** |  |
| **Оценка:** |  |
| **Преподаватель:** |  |
| **Подпись преподавателя:** |  |

**Москва 2022**

Лабораторная работа № 1-8

# «Исследование линейной электрической цепи несинусоидального периодического тока»

**Целью работы** является исследование гармонического состава кривых напряжения и тока в линейных электрических цепях с источником несинусоидального напряжения. Экспериментально определяется влияние индуктивной катушки и конденсатора на форму кривой тока в цепи с источником несинусоидального напряжения.

**Ключевые слова:** несинусоидальный ток, несинусоидальное напряжение; ряд Фурье; меандр; мгновенное, среднее, действующее значения периодического напряжения (тока); мощность; гармоника; метод расчета; измерение; системы приборов; дискретные значения.

**1. Теоретическая справка**

**Представление несинусоидального напряжения (тока) в виде суммы напряжений (токов) постоянной составляющей и гармоник**

Периодическое несинусоидальное напряжение источника питания, напряжения на элементах или ток в них могут быть представлены в виде суммы составляющих, получаемых на основе разложения в ряд Фурье в виде:

 , В (1)

где *U*0 – постоянная составляющая, равная среднему за период значению ,

*Ukm*, φ*k* – амплитуда и начальная фаза *k*-ой гармоники, определяемые формулами Эйлера-Фурье.

График напряжения разнополярных импульсов *u*(*t*) в виде **меандра** показан на рис. 1 (жирной линией).

Это напряжение можно представить в аналитическом виде:

Меандр (рис. 1) относится к частному случаю периодических кривых симметричных относительно оси абсцисс, т.е. *u*(*t*)*=–u*(*t+Т/*2), поэтому раскладываются в ряд, который не содержит постоянной составляющей и четных гармоник. Кроме того, представленная функция *u*(*t*) симметрична относительно начала координат, т.е. *u*(*t*)=*–u*(*–t*)*.* Гармонические составляющие ряда (1) в этом случае определяются синусными составляющими.

Таким образом, разложение в ряд Фурье для меандра выглядит следующим образом:

 , (2)

здесь – амплитуда основной гармоники (*k*=1),

*Ukm*=*U*1*m*/*k* – амплитуды высших гармоник меандра (*k*=3, 5, 7…).



Рис. 1

На рис. 1 помимо графика напряжения меандра *u*(*t*) показаны графики гармоник *u*(1), *u*(3), *u*(5), *u*(7) и сумма разного числа составляющих разложения в ряд Фурье. В работе для меандра ограничимся тремя гармониками, т.е. примем .

Напряжение при однополупериодном выпрямлении *u*(*t*) (рис. 2), может быть представлено разложением в ряд Фурье, содержащий постоянную составляющую и косинусные составляющие:

 . (3)



Рис. 2

**Расчет электрической цепи несинусоидального тока**

В основе расчета линейной электрической цепи несинусоидального тока лежит принцип наложения: производится расчет искомых величин на постоянной составляющей и на частотах соответствующих *k*-ых гармоник, при расчете гармонических составляющих применяется комплексный метод. Для *k*-ой гармоники индуктивные и емкостные сопротивления , .

Действующие значения напряжения (тока) вычисляются по найденным постоянной составляющей и действующим значениям отдельных гармоник:

 . (4)

Мгновенные значения несинусоидальных напряжений или токов равны сумме мгновенных значений всех составляющих, найденных при рассмотрении постоянной составляющей и каждой гармоники в отдельности:

.

Активная мощность равна сумме активных мощностей, рассчитанных на постоянной и гармонических составляющих (равенство Парсеваля):

,

где , – действующие значения *k*-ой гармоники напряжения и тока, – сдвиг фаз между *k*-ой гармоники напряжения и *k*-ой гармоники тока.

**Расчет постоянной составляющей, действующих значений напряжений (токов) и активной мощности по дискретным значениям несинусоидальных напряжений (токов)**

Основные величины, определяющие режим в электрической цепи, наряду с рассмотрением отдельных гармоник, могут быть вычислены приближенно по дискретным значениям мгновенных величин. Так при рассмотрении периодического напряжения произвольной формы период *Т* разбивается на *М* равных интервалов (отрезков). В данной работе рекомендуется принять *M*=16. Точки в начале каждого интервала, определяющие положение узлов, обозначаются *n*=0, 1, 2, ..., (*M*–1). В таком случае:

а) постоянная составляющая напряжения (тока), равная среднему значению в (1), находится заменой интеграла конечной суммой:

 , (5)

где – алгебраическая сумма всех значений напряжения в узлах,

*n* – номер узла.

б) действующее значение напряжения (тока), может быть найдено аналитически в интегральной форме как среднеквадратичное значение за период , или приближенно с применением дискретных значений с учетом масштабного коэффициента:

 ; (6)

в) активная мощность *Р,* равная среднему значению от мгновенной мощности *р*(*t*)за период , также может быть определена приближенно через дискретные значения:

 . (7)

Расчеты по дискретным значениям могут быть реализованы в вычислительной среде MathCAD, в таком случае дискретные значения на интервале периода *Т* представляются в виде таблицы.

**2. Подготовка к работе**

1. Осуществить разложение заданного напряжения *u*(*t*) прямоугольной формы (меандра) в ряд Фурье, ограничиваясь тремя членами ряда, 

Найти действующее значение напряжения *U*:

* путем интегрирования заданной функции *u*(*t*);
* используя формулу (4) с учетом трех членов ряда Фурье.

Сравнить результаты расчета.



1. Для схемы на рис. 1П при заданных параметрах *R*, *R*к, *L* и *C* (см. таблицу исходных данных):
* найти мгновенные значения тока и напряжения на конденсаторе с учетом разложения входного напряжения (меандра) до трех членов (*U*max=7 В);
* рассчитать действующие значения тока и напряжения на конденсаторе;
* построить на одном графике кривые мгновенных значений отдельных гармоник и их сумму (соответственно для тока и напряжения на конденсаторе);
* составить баланс активной мощности.

|  |  |  |  |  |
| --- | --- | --- | --- | --- |
| № бригады | *R*, Ом | *L*, мГн | *R*к, Ом | *C*, мкФ |
| 1, 13, 25 | 10 | 50 | 50 | 56 |
| 2, 14, 26 | 10 | 60 | 60 | 56 |
| 3, 15, 27 | 10 | 70 | 70 | 56 |
| 4, 16, 28 | 10 | 80 | 80 | 56 |
| 5, 17, 29 | 10 | 50 | 50 | 68 |
| 6, 18, 30 | 10 | 60 | 60 | 68 |
| 7, 19, 31 | 10 | 70 | 70 | 68 |
| 8, 20, 32 | 10 | 80 | 80 | 68 |
| 9, 21, 33 | 10 | 50 | 50 | 82 |
| 10, 22, 34 | 10 | 60 | 60 | 82 |
| 11, 23, 35 | 10 | 70 | 70 | 82 |
| 12, 24, 36 | 10 | 80 | 80 | 82 |

### **3. Содержание и порядок выполнения работы**

Источником несинусоидального напряжения в форме знакопеременных импульсов является модуль **ФУНКЦИОНАЛЬНЫЙ ГЕНЕРАТОР**. Этот модуль также позволяет получить необходимые синусоидальные напряжения соответствующих разложению в ряд Фурье гармоник.

Пассивные элементы электрической схемы выбирают из блоков **МОДУЛЬ РЕАКТИВНЫХ ЭЛЕМЕНТОВ, МОДУЛЬ РЕЗИСТОРОВ и МОДУЛЬ ДОПОЛНИТЕЛЬНЫЙ**. Активное сопротивление *R*к катушки измеряют мультиметром. Измерения действующих значений входного напряжения *U* и тока *I*, активной мощности *Р* и угла сдвига фаз φ выполняют встроенные в модуль **ИЗМЕРИТЕЛЬ ФАЗЫ** приборы. Для измерения действующего значения напряжения на конденсаторе *UC* и служит мультиметр **РР** блока **МОДУЛЬ МУЛЬТИМЕТРОВ**. Для получения кривых тока и напряжения используют **осциллограф**.

* Собрать электрическую цепь по схеме, приведенной на рис. 1П протокола измерений. Тумблер **SA2** модуля **ИЗМЕРИТЕЛЬ ФАЗЫ** установить в положение **I2**.
* Проверить собранную электрическую цепь в присутствии преподавателя.
* Установить в модуле **РЕАКТИВНЫЕ ЭЛЕМЕНТЫ** заданные преподавателем величины индуктивности *L* катушки и емкости *С* конденсатора. Измерить мультиметром активное сопротивление *R*к катушки. Записать эти значения в протокол измерений.

### **Опыт №1**

* Включить автоматический выключатель **QF** блока **модуль питания**, тумблеры **Сеть** модуля **ФУНКЦИОНАЛЬНЫЙ ГЕНЕРАТОР** и **SA1** блока **модуль ИЗМЕРИТЕЛЬ ФАЗЫ**.Переключатель **Форма** модуля **ФУНКЦИОНАЛЬНЫЙ ГЕНЕРАТОР** установить в положение . Регулятором **Частота** установить частоту *f*=50 Гц. Регулятором **Амплитуда** установить значение амплитудного значения напряжения *U*max=7 В.
* Включить **осциллограф**. Настроить нулевое значение сигнала, повернуть ручку регулятора вертикальной развертки до упора по ходу часовой стрелки.
* Подключить **Вход 1** осциллографа к источнику. Настроить ручки горизонтальной развертки осциллографа таким образом, чтобы на экране полностью укладывался один период колебаний. Установить переключатель усиления по напряжению таким образом, чтобы максимально использовалась площадь экрана. Используя масштаб *mU* на переключателе усиления по напряжению, убедиться, что амплитуда входного напряжения составляет *U*max=7 В. *В остальных опытах использовать указанный порядок настройки осциллографа.*
* Подключить **Вход 1** осциллографа к резистору с сопротивлением *R*. Сфотографировать с экрана **осциллографа** кривую зависимости  и перенести ее на миллиметровую бумагу. На рисунке обозначить оси, указать масштаб *mU*, подписать номер опыта и кривую.
* Подключить **Вход 1** осциллографа к конденсатору емкостью *С*. Сфотографировать с экрана **осциллографа** кривую зависимости . На рисунке обозначить оси, указать масштаб *mU*, подписать номер опыта и кривую.
* Измерить приборами модуля **ИЗМЕРИТЕЛЬ ФАЗЫ** действующие значения напряжения входного напряжения *U* и тока *I*, активную мощность *Р*. Вольтметром **РР** блока **МОДУЛЬ МУЛЬТИМЕТРОВ** измерить действующее значение напряжения *UC* на конденсаторе *С*. Измеренные значения занести в табл. 1П протокола измерений.

### **Опыт №2**

* Занести в табл. 1П протокола измерений действующие значения гармонических составляющих входного напряжения.
* Переключатель **Форма** модуля **ФУНКЦИОНАЛЬНЫЙ ГЕНЕРАТОР** установить в положение .
* Регулятором **Амплитуда** установить величину действующего значения основной гармоники *U*(1) входного напряжения.
* Измерить приборами модуля **ИЗМЕРИТЕЛЬ ФАЗЫ** действующие значения напряжения *U* и тока *I*, активную мощность *Р*. Вольтметром **РР** блока **МОДУЛЬ МУЛЬТИМЕТРОВ** измерить напряжение на конденсаторе емкостью *С*. Измеренные значения занести в табл. 1П. *Указанный порядок измерений использовать в следующих опытах.*
* Регулятором **Частота** установить на выходе модуля **ФУНКЦИОНАЛЬНЫЙ ГЕНЕРАТОР** частоту *f*=150 Гц. Регулятором **Амплитуда** установить величину действующего значения третьей гармоники *U*(3) входного напряжения.
* Выполнить измерения. Измеренные значения занести в табл. 1П.
* Регулятором **Частота** установить на выходе модуля **ФУНКЦИОНАЛЬНЫЙ ГЕНЕРАТОР** частоту *f*=250 Гц. Регулятором **Амплитуда** установить величину действующего значения пятой гармоники *U*(5) входного напряжения.
* Выполнить измерения, измеренные значения занести в табл. 1П.
* Выполнить указанные в протоколе измерений расчеты.
* Прикрепить осциллограммы сигналов к протоколу измерений.
* Протокол измерений утвердить у преподавателя.
* Выключить тумблеры **Сеть** модуля **ФУНКЦИОНАЛЬНЫЙ ГЕНЕРАТОР** и **SA1** блока **модуль ИЗМЕРИТЕЛЬ ФАЗЫ.** Выключить **осциллограф**.
* Выключить автоматический выключатель **QF** блока **модуль питания**.

### **Опыт №3**

***RL*-цепь**

* Собрать цепь в соответствии с рис. 2П с катушкой индуктивностью  из блока **МОДУЛЬ ДОПОЛНИТЕЛЬНЫЙ** и резистором с сопротивлением *R*=10 Ом.
* Включить автоматический выключатель **QF** блока **модуль питания**, тумблеры **Сеть** модуля **ФУНКЦИОНАЛЬНЫЙ ГЕНЕРАТОР** и **SA1** блока **модуль ИЗМЕРИТЕЛЬ ФАЗЫ**.Переключатель **Форма** модуля **ФУНКЦИОНАЛЬНЫЙ ГЕНЕРАТОР** установить в положение . Регулятором **Частота** установить частоту *f*=250 Гц. Регулятором **Амплитуда** установить значение амплитудного значения напряжения *U*max=7 В.
* Включить **осциллограф**. Настроить нулевое значение сигнала, повернуть ручку регулятора вертикальной развертки до упора по ходу часовой стрелки.
* Подключить **Вход 1** осциллографа к источнику. Настроить ручки горизонтальной развертки осциллографа таким образом, чтобы на экране полностью укладывался один период колебаний. Установить переключатель усиления по напряжению таким образом, чтобы максимально использовалась площадь экрана. Используя масштаб *mU* на переключателе усиления по напряжению убедиться, что амплитуда входного напряжения составляет *U*max=7 В. *В остальных опытах использовать указанный порядок настройки осциллографа.*
* Подключить **Вход 1** осциллографа к резистору с сопротивлением *R*. Сфотографировать с экрана **осциллографа** кривую зависимости  и перенести ее на миллиметровую бумагу. На рисунке обозначить оси, указать масштаб *mU*, подписать номер опыта и кривую.

***RC*-цепь**

* Собрать цепь в соответствии с рис. 3П с конденсатором емкостью *С*=3,3 мкФ и резистором с сопротивлением *R*=10 Ом.
* Подключить **Вход 1** осциллографа к резистору с сопротивлением *R*. Сфотографировать с экрана **осциллографа** кривую зависимости  и перенести ее на миллиметровую бумагу. На рисунке обозначить оси, указать масштаб *mU*, подписать номер опыта и кривую.

### **ПРОТОКОЛ ИЗМЕРЕНИЙ К ЛАБОРАТОРНОЙ РАБОТЕ № 1-8**

**Опыты №1 и №2**

###

Рис. 1П

Параметры элементов цепи: *С*=\_\_\_\_\_\_ мкФ; *L*=\_\_\_\_\_\_\_ мГн; *R*к=\_\_\_\_\_ Ом, *R*=10 Ом. Амплитуда несинусоидального напряжения *U*max=7 В.

Таблица 1П

|  |  |  |  |
| --- | --- | --- | --- |
| № опыта | Теория |  | Эксперимент |
| Действующеезначение, В | Вид входного напряжения | *U*, В | *I*, мА | *UC*, В | *P*, Вт | ϕ, ° |
| 1 | *U*=7 В | Несинусоидальное напряжение *u*(*t*) |  |  |  |  | −− |
| 2 | *U*(1)= | Синусоидальное напряжение *u*(1) |  |  |  |  |  |
| 2 | *U*(3)= | Синусоидальное напряжение *u*(3) |  |  |  |  |  |
| 2 | *U*(5)= | Синусоидальное напряжение *u*(5) |  |  |  |  |  |

**Опыт №3**



Рис. 2П



Рис. 3П

### 4. Содержание и оформление отчета

1. Корректно оформленная подготовка в полном объеме.
2. К отчету должны быть приложены аккуратно оформленные экспериментальные осциллограммы для всех трех опытов. На каждой представляемой осциллограмме должны быть написаны номер опыта и наименование изображенной кривой, обозначены оси, указан масштаб *mU* и *mt*.
3. Опыт №1:
* вычислить действующие значения несинусоидального тока и напряжения на конденсаторе по дискретным значениям (см. Теоретическую справку);
* сравнить полученные значения с результатами расчета из подготовки (пункт 2 подготовки) и с результатами измерений (табл. 1П).
1. Опыт №2:
* записать мгновенные значения тока и напряжения на конденсаторе как суммы первой и высших гармоник;
* построить на одном графике кривые мгновенных значений отдельных гармоник и их сумму на основе полученных экспериментальных данных (соответственно для тока и напряжения на конденсаторе);
* определить действующие значения тока и напряжения на конденсаторе;
* рассчитать активную мощность по гармоническим составляющим;
* сравнить результаты эксперимента с расчетными данными из подготовки к работе.
1. Опыт №3:
* вычислить действующее значение несинусоидального тока в катушке и конденсаторе (опыт №3) по дискретным значениям (см. Теоретическую справку);
* сравнить полученное значение с результатом расчета, используя разложение в ряд Фурье.

**6. Контрольные вопросы и задания**

Все ответы на вопросы должны сопровождаться необходимыми схемами, формулами, численными результатами расчетов, графическими иллюстрациями (графиками, диаграммами и т.д.) и содержать однозначный ответ на поставленные вопросы.

1. Записать аналитическое выражение для несинусоидального напряжения (меандра) *u*(*t*) при его разложении в ряд Фурье при условии, что кривая *u*(*t*) на рис. 1 сдвинута относительно начала координат на:

а) Т/4 вправо; б) Т/2 влево; в) Т/4 влево; б) Т/2 вправо.

Изменятся ли амплитудные значения гармоник при этом?

2. Записать аналитическое выражение разложения в ряд Фурье длянапряжения в форме однополярных импульсов. При записи учесть постоянную составляющую и выражение (2), приведенное для меандра в Теоретической справке.



3. Определить коэффициенты амплитуды для следующих форм напряжения:

а) меандр;

б) однополупериодное выпрямление;

в) однополярный импульс.

Сравнить полученные коэффициенты с коэффициентом амплитуды синусоидальной функции.

4. Определить коэффициенты формы для следующих форм напряжения:

а) меандр;

б) однополупериодное выпрямление;

в) однополярный импульс.

Сравнить полученные коэффициенты с коэффициентом формы синусоидальной функции.

5. По результатам полученных экспериментальных данных (опыт №2) произвести расчет следующих коэффициентов для тока:

* суммарный коэффициент гармонических составляющих;
* коэффициенты гармонических составляющих (*k*=3; *k*=5);
* коэффициент искажения;
* коэффициент амплитуды;
* коэффициент формы.

6. Как изменятся кривые мгновенных значений несинусоидального тока и напряжения на конденсаторе в *RC*-цепи, если напряжение на входе имеет форму однополярных импульсов?

7. Как изменятся действующие значения несинусоидального тока и напряжения на индуктивной катушке в *RL*-цепи, если напряжение на входе имеет форму однополярных импульсов?

8. На практическом примере для электрической цепи несинусоидального тока продемонстрируйте отличия в результатах измерений напряжений и токов приборами электромагнитной, магнитоэлектрической и индукционной систем.