**Лабораторная работа № 11  
Цепи несинусоидального тока**

**1. Цель работы**

Приобретение навыков исследования периодических несинусоидальных напряжений и токов в линейных цепях. Разложение в ряд Фурье некоторых типичных кривых напряжения с помощью аналитического и экспериментального исследования. Совершенствование методов вычислений и измерений действующих, средних значений токов, напряжений и активной мощности. Освоение специфики измерения несинусоидальных напряжений приборами различных систем. Экспериментальное подтверждение результатов расчета цепи несинусоидального тока. Получение навыков построения и анализа графиков мгновенных значений несинусоидального напряжения, тока и их составляющих.

**2. Ключевые слова**

Несинусоидальный ток, напряжение; ряд Фурье; мгновенное, среднее, действующее значения; мощность; гармоника; метод расчёта; обоснование; эксперимент; измерение; системы измерительных приборов; узел; дискретные значения.

**3. Теоретическая справка**

***3.1* *Представление несинусоидального напряжения в виде суммы напряжений 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:

, (1)

где *U0* - постоянная составляющая, равная среднему значению *U0* = *Uср*  Амплитуда и начальная фаза *k*-ой гармоники *Ukm*, *ψk* определяются формулами Эйлера – Фурье.

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



Рис.1

Это напряжение можно представить в виде: 

Меандр относится к частному случаю периодических кривых симметричных относительно оси абсцисс, т.е. *u(t) = – u(t+Т/2,* поэтому в разложении в ряд Фурье для него присутствуют гармоники только нечетных номеров и отсутствует постоянная составляющая. Изображение *u(t)* на рис.1 обладает еще симметрией относительно оси ординат, т. е. *u(t)*= *–u(–t).* Гармонические составляющие ряда (1) в этом случае определяются синусоидами. Таким образом, ограничиваясь тремя гармониками, напряжение меандра имеет вид:

, (2)

здесь  - амплитуда основной гармоники (*k* =1). Амплитуды высших гармоник меандра уменьшаются в *k* раз по сравнению с основной; 

На рис. 1, помимо графика напряжения меандра *u(t),* показаны пунктиром напряжения трех гармоник *u(1), u(3), u(5)* и их сумма более жирной линией.

Напряжение однополупериодного выпрямления *u(t)* на рис. 2 может быть представлено рядом

 . (3)

В основе расчета линейной цепи несинусоидального тока лежит принцип наложения, который применим только для мгновенных значений. При расчете гармонических составляющих обычно применяется символический метод. Реактивные сопротивления для *k*-ой гармоники , .



Рис. 2

***3.2* *Расчет цепи несинусоидального тока***

Действующие значения напряжения или 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

 .

В результате вычислений постоянной и гармонических составляющих активная мощность равна сумме

.

Полная мощность *S=UI.* Коэффициент мощности λ= cosφ *=P/S=P/UI.*

**3.3 *Расчет постоянной составляющей, действующего значения и активной мощности по дискретным значениям несинусоидальных напряжений и токов***

Основные величины, определяющие режим в цепи, наряду с рассмотрением отдельных гармоник, могут быть вычислены приближенно по дискретнымзначениям мгновенных величин. Так, при рассмотрении периодического напряжения произвольной формы, период *Т* разбивается на *М* равных интервалов (отрезков). Точки в начале каждого интервала, определяющие положение узлов, обозначаются *n* = 0, 1, 2, ..., (*M* -1).

**а)** Постоянная составляющая, равная среднему значению в (1), находится заменой интеграла конечной суммой

, (5)

где  - алгебраическая сумма всех значений напряжения в узлах, *n*  - номер узла; в данной работе рекомендуется принять *M* = 16.

**б)** Действующее значение напряжения, подобно и тока, может быть найдено аналитически, как среднеквадратичное путём интегрирования, и приближённо, используя дискретные значения, соответственно

 ;  или  . (6)

При рассмотрении мгновенных значений, активная мощность *Р,* равна среднему значению мгновенной мощности *р(t)*

 или . (7)

Расчёты по дискретным значениям могут быть выполнены на ПК в вычислительной среде MATHCAD. Значения дискрет на интервале периода *Т* представляются в виде таблицы.

**4. Описание установки**

Источником питания служит генератор (см. рис. 3, 4), называемый на стенде « функциональный генератор». Меняя положение тумблера «форма» «» или «  », на выходе генератора устанавливается напряжение синусоидальной формы или в виде импульсов, называемых меандром. В эксперименте меандр заменяется тремя гармониками. Частота и действующее значение выходного напряжения генератора устанавливаются соответственно с помощью регуляторов «частота» и «амплитуда».

В работе используется многофункциональный цифровой измерительный прибор – полиметр (*П*), называемый на стенде « измеритель фазы». Полиметр содержит (см. рис.3, рис.4) токовую ветвь 01, I2, включаемую последовательно как амперметр, и ветвь напряжения 02 , U1, включаемую параллельно как вольтметр. Результаты измерений получаются на основе дискретного представления *u*(*t*), *i*(*t*). На табло прибора *П* выводятся действующие значения напряжения *U*, тока *I*, значение активной мощности *P* и угол *ϕ*. Причём, если напряжение *u*(*t*) и ток *i*(*t*) синусоидальные, то угол ϕ равен разности начальных фаз *u*(*t*) и *i*(*t*), т. е. *ϕ* = . Если *u*(*t*) и (или) *i*(*t*) несинусоидальные, то в этом случае угол ϕ соответствуют эквивалентным синусоидам и может быть вычислен по формуле  Здесь *U* и *I* - соответственно действующие значения напряжения и тока*, P* – активная мощность.

Цифровым вольтметром В7-38 в положении переключателя V≈измеряется действующее значение только синусоидального напряжения, в положении  V**=** измеряется постоянная составляющая напряжения с учётом её знака.

Полиметром *П* измеряются действующие значения периодических напряжений, токов произвольной формы и активной мощности.

Для измерения действующего значения синусоидальной формы напряжения, тока, постоянного напряжения, активного сопротивления служат мультиметры блока «модуль мультиметров».

Стрелочный вольтметр магнитоэлектрической системы, обозначаемый VМЭ , предназначен для измерения постоянной составляющей. Форма кривой напряжения или тока наблюдается на экране осциллографа. Для наблюдения формы кривой тока *i(t)* необходимо подавать на вход осциллографа напряжение на резисторе *R (рис.4)*. Напряжение на резисторе, подаваемое на вход осциллографа, повторяет форму тока; *(t)*=*R i(t)*. Фиксированные значения параметров элементов *R, L, C* устанавливаются с помощью переключателей.

1. **Подготовка к работе**

Протокол подготовки должен содержать схемы рабочего задания (рис.3, рис.4) и соответствующие им таблицы (табл.2, табл.3). На схеме рис.4 записать значения параметров элементов цепи, выписав их из табл.1 в соответствии с номером бригады. Для всех бригад *R*=10 Ом.

Внимательно ознакомиться с содержанием и порядком выполнения рабочего задания Ч.1, Ч.2, Ч.3.

***Вычисления значений напряжений, определение показаний приборов.***

**5.1** Для каждого из вариантов формы напряжения *a, b, c* табл.2 получить аналитическое выражение зависимости действующего значения *U* этого напряжения от максимального *um.* Воспользоваться интегральной формой его определения . Для заданного действующего значения *U* =4 В вариантов  *a, b, c* , вычислить значения *um* и вписать их в табл.2.

**5.2.** На основе определения среднего значения , для вариантов  *a, b, c* , получить аналитические выражения ****. Используя значения *um*  п.5.1, для каждого из вариантов вычислить . Вписать в табл.2 эти значения как расчётные показания вольтметра В7-38 ( V**=** ), вольтметра VМЭ.

При измерении вольтметром В7-38 переменного несинусоидального напряжения, его показание не равно действующему значению. При этом показание его определяется выражением V≈ = 1,11 , т.е. оно пропорционально среднему значению от модуля напряжения  , полученного после вычитания постоянной составляющей напряжения на входе вольтметра

****.

***Расчёт цепи при питании от генератора с напряжением в форме меандра***

**5.3.** В цепи рис. 4 напряжение на входе  в форме меандра определяется тремя гармониками ряда Фурье (2); В,  *f*=50 Гц. Вычислить действующие значения напряжений каждой гармоники. При заданных параметрах *R*к, *L* и *C* (табл.1), рассчитать ток в цепи  и напряжение на конденсаторе , вычислить действующие значения тока и напряжения на конденсаторе. Составить баланс активной мощности. Полученные результаты расчёта, соответствующие напряжению питания в форме меандра, вписать в табл. 3.

Таблица 1

|  |  |  |  |
| --- | --- | --- | --- |
| № бригады | *L*, мГн | *R*к, Ом | *C*, мкФ |
| 1 | 50 | 50 | 56 |
| 2 | 60 | 60 | 56 |
| 3 | 70 | 70 | 56 |
| 4 | 80 | 80 | 56 |
| 5 | 50 | 50 | 68 |
| 6 | 60 | 60 | 68 |
| 7 | 70 | 70 | 68 |
| 8 | 80 | 80 | 68 |
| 9 | 50 | 50 | 82 |
| 10 | 60 | 60 | 82 |
| 11 | 70 | 70 | 82 |
| 12 | 80 | 80 | 82 |

Уделить внимание рекомендуемой литературе по теме работы, подготовить ответы на вопросы допуска к работе.

**6. Вопросы для допуска студентов к работе**

**6.1** Показать и привести обоснование, что коэффициенты амплитуды *ка* =  /  для вариантов напряжений табл. 2 равны:

 *ка* = √2 ;  *ка* =1 ;  *ка* =2.

**6.2** Показать и привести обоснование, что коэффициенты формы *кф* =  /  для вариантов напряжений табл. 2 равны:

 *кф* = 1,11;  *кф* = 1;  *кф* =1,57.

**6.3** Показать и привести обоснование, что коэффициенты гармоник

*кг*= для вариантов напряжений табл. 2 равны:

 *кг* = 0;  *кг* = 0,483;  *кг* =0,707.

**6.4** Какой характер имеет цепь рис.4 на частоте по каждой из гармоник *k* =1, *k* =3, *k* =5 ?. Привести обоснование.

**6.5** По результатам расчёта гармоник п.5.3 Подготовки к работе, вычислить и сравнить значения коэффициентов гармоник *кг* ( см. п.6.3) для напряжения на конденсаторе, тока в цепи. Объяснить расхождение результатов.

**7. Рабочее задание**

**Часть 1. Измерение напряжений приборами различных систем**

Для различных форм измеряемых напряжений *u*(*t*) на входе цепи рис. 3 устанавливается одно и то же действующее значение *U* = 7 В. Максимальное значение его *um* определяется по осциллограмме.



Таблица 2

|  |  |  |  |  |  |  |  |  |  |
| --- | --- | --- | --- | --- | --- | --- | --- | --- | --- |
| Форма напряжения | Полиметр П | Вольтметр В7-38, В | | | | VМЭ  (0…15), В | | Осциллограф  *um*, B | |
| Устанавливаемое действующее  значение  *U*, B |  | |  | | расчёт | опыт |
| расчёт | опыт | расчёт | опыт | расчёт | опыт |
|  | 4 |  |  |  |  |  |  |  |  |
|  | 4 |  |  |  |  |  |  |  |  |
|  | 4 |  |  |  |  |  |  |  |  |

**1.1** Для измерения напряжений *u*(*t*) синусоидальной формы и в форме меандра собрать цепь по схеме рис.3, заменив выделенный пунктиром диод *VD3* – проводом, а резистор *R3* - обрывом. Проверить в присутствии преподавателя правильность выполненных соединений.

**1.2 *a)***Для синусоидального напряжения, как тестового, установить переключатель формы напряжения генератора в положение . ТумблерSA2 модуля «измеритель фазы» установить в положение I2.

Включить тумблеры «Сеть» модуля «функциональный генератор» иSA1блока «модуль измеритель фазы», последним включается автоматический выключатель QF блока «модуль питания**»**.Регулятором «Частота» установить частоту *f* =50 Гц. Регулятором «Амплитуда» на табло полиметра *П* установить величину действующего значения синусоидального напряжения  В.

Включить «осциллограф». Добиться устойчивого изображения одного периода колебаний, максимально использовав площадь экрана (см. Методическое указание).

Записать значение масштаба по времени *mt* горизонтальной развёртки осциллографа. Определить длительность периода *Т* и убедиться, что он соответствует частоте *f* = 50 Гц. Записав масштаб напряжения *mU*  по вертикали, определить *um* , как амплитуду синусоиды *Um*. Значение *um* и показания вольтметров схемы занести в табл.2, сравнить их с расчётными.

***b)***Для получения *u(t)* в форме меандра, перевести переключатель формы напряжения в положение . На табло полиметра *П* установить величину действующего значения напряжения меандра  В. Показания вольтметров, максимальное значение напряжения *um* , найденное по осциллограмме, как и в варианте *a)*, занести в табл.2. Сравнить результаты расчётов и опыта. Показать полученные данные преподавателю.

Выключить автоматический выключатель QF блока «модуль питания**»**, тумблеры «Сеть» модуля «функциональный генератор» иSA1блока «модуль измерителя фазы».

***с)***Для получения напряжения *u(t)* на входе цепи в виде однополупериодного выпрямления, дополнить цепь п. *b)*  диодом *VD3* и резистором *R3*. Проверить правильность выполненных соединений по схеме рис.3. Перевести переключатель «Форма» напряжения в положение .

Восстановить питание цепи. Установить на табло полиметра *П* величину действующего значения напряжения  В.

Максимальное значение напряжения *um* , найденное по осциллограмме, как и в вариантах *a)* и *b)*, показания вольтметров занести в табл.2. Показать полученные данные преподавателю.

***d)*** Факультативно; выполнить измерения, подобно в п. *с)*, но при напряжении на выходе генератора в форме меандра . Табл.2 дополнить строкой с результатами расчёта и опыта.

**Часть 2. Измерения в цепи при напряжении генератора в форме меандра**

**2.1** Измерить мультиметром активное сопротивление *R*к катушки *L* из блоков «модуль реактивных элементов». Записать его значение на схеме рис. 4.

Собрать цепь рис.4. Установить значения параметров элементов, указанных на схеме. Установить тумблер «Форма» напряжения генератора в положение .

Проверить, в присутствии преподавателя, выполненные соединения и параметры элементов цепи.

**2.2** Включить тумблеры «Сеть» модуля «функциональный генератор» иSA1блока «модуль измеритель фазы» и автоматический выключатель QF блока «модуль питания**»**. Регулятором генератора «Амплитуда» установить на табло полиметра *П* действующее значение напряжения *U* = 7,0 В, установить частоту *f*=50 Гц. Занести опытные данные показаний на табло  *I*, *P* в табл.3.

Мультиметром измерить переменное напряжение на конденсаторе *UC***,** вписать значение его в табл. 3.

Сравнить данные опыта и расчёта, показать результаты преподавателю.

**2.3** Зарисовать (сфотографировать) с экрана осциллографа графики зависимостей *u(t)* , *uR(t)* , *uC(t)*. Выбрать на каждом графике центр координат, направив по оси Х время *t,* а по оси Y – измеренные напряжения. Дополнить оси графиков масштабами *mU* , В/см; *mt* , мс/см. Обозначить точки на осциллограммах для момента времени *tm*, когда *uC(tm)* = mах, а

*uR(tm)* =0.

Пояснить совпадение этих значений по времени *tm*  .

Показать осциллограммы преподавателю.

Выключить автоматический выключатель QF блока «модуль питания**»**, тумблеры «Сеть» модуля «функциональный генератор» иSA1блока «модуль измерителя фазы».

****

Таблица 3

|  |  |  |  |  |  |  |  |  |  |
| --- | --- | --- | --- | --- | --- | --- | --- | --- | --- |
| Напряжение питания, частота | | | | I, мА | | *UC*, В | | *P*, Вт |  |
| Часть 2 –*напряжение питания в форме меандра* | | | | | | | | | |
| *U* = 7,0 В; *f*=50Гц | | расчёт |  | |  | |  | |  |  |  |  |
| опыт |  | |  | |  | | \_ |
| Часть 3 – *синусоидальное напряжение питания соответствующее*  *отдельным гармоникам* | | | | | | | | | |
| *U(1)* = 6,3 В;  *f (1)* = 50 Гц | расчёт | | |  | |  | |  |  |
| опыт | | |  | |  | |  |  |
| *U(3)* = 2,1 В; *f (3)* =150 Гц | расчёт | | |  | |  | |  |  |
| опыт | | |  | |  | |  |  |
| *U(5)* =1,26 В; *f (5)* = 250Гц | расчёт | | |  | |  | |  |  |
| опыт | | |  | |  | |  |  |

По данным опытов Части 3:

ток  мА;

напряжение  В;

мощность  Вт.

Коэффициент мощности  

**Часть 3. Измерения в цепи при питании с синусоидальным напряжением в режиме каждой гармоники меандра**

**3.1** Для обеспечения синусоидального режима цепи рис.4 на основной гармонике (К=1), переключить тумблер «Форма» напряжения генератора в положении . Включить тумблеры «Сеть» модуля «функциональный генератор» иSA1блока «модуль измерителя фазы» и автоматический выключатель QF блока «модуль питания**»**

Установить на табло полиметра *П* действующее значение напряжения первой гармоники *U(1)* = 6,3 В;  *f (1)* = 50 Гц. Занести показания табло  *I*, *P*, *ϕ.o* и измеренное мультиметром напряжение *UC* в табл.3.

**3.2** Установить на табло полиметра *П* действующее значение напряжения третьей гармоники (К=3) *U(3)* = 2,1 В; *f (3)* =150 Гц. Занести показания полиметра *П*  *I*, *P*, *ϕ.o* и измеренное мультиметром напряжение *UC* в табл.3.

**3.3** Установить на табло полиметра *П* действующее значение напряжения пятой гармоники (К=5) *U(5)* =1,26 В; *f (5)* = 250 Гц. Занести показания табло  *I*, *P*, *ϕ.o* и измеренное мультиметром напряжение *UC* в табл.3.

**3.4** Выполнить вычисления по прилагаемым к табл.3 выражениям. В присутствии преподавателя сравнить результаты с данными измерений.

**3.5** Выключить автоматический выключатель QF блока «модуль питания**»**, тумблеры «Сеть» модуля «функциональный генератор» иSA1блока «модуль измерителя фазы».