

ЛАБОРАТОРНАЯ РАБОТА № 1 (2)*

**ИССЛЕДОВАНИЕ НЕРАЗВЕТВЛЕННОЙ ЭЛЕКТРИЧЕСКОЙ ЦЕПИ СИНУСОИДАЛЬНОГО ТОКА.
РЕЗОНАНС НАПРЯЖЕНИЙ**

Цель работы

1. Исследовать электрическое состояние линейной неразветвленной цепи синусоидального тока при различных потребителях электрической энергии.

2. Приобрести навыки расчета параметров отдельных элементов электрической цепи при последовательном соединении R , L - и C -элементов.

3. Экспериментально подтвердить теоретические знания, полученные на лекциях и самостоятельных занятиях по неразветвленным электрическим цепям синусоидального тока.

Общие сведения

Резонанс напряжений наблюдается в электрической цепи одиночного переменного тока при последовательном соединении катушки индуктивности (с сопротивлениями активным R_L и индуктивным X_L) и конденсатора (с емкостным сопротивлением X_C , активным же сопротивлением R_C за него малостью пренебрегаем). В такой цепи резонанс напряжений может наступить при условии равенства индуктивного сопротивления катушки и емкостного сопротивления конденсатора, т. е. при $X_L = X_C$. Это выражение является **условием резонанса напряжений**.

В цепях переменного тока существует два вида нагрузок:

– Активная (сопротивление обозначается R)

– Реактивная, которая может быть индуктивной (с сопротивлением X_L) и емкостной (с сопротивлением X_C).

* Здесь и далее: в скобках указаны номера тех же работ, выполняемых студентами дневных факультетов

Активной нагрузкой являются все те потребители, на которых происходит преобразование электрической энергии в другие виды энергии – тепловую, световую, лучистую, механическую и т. д. На реактивных нагрузках происходит обмен энергией между катушкой индуктивности и конденсатором, причем индуктивность забирает из сети реактивную составляющую, а емкость отдает ее в сеть.

Изменением емкости конденсатора или индуктивности катушки можно добиться равенства реактивных составляющих $X_L = X_C$, тогда в цепи остается одна активная составляющая и вся электрическая цепь ведет себя как цепь с чисто активной нагрузкой. Это явление и происходит при резонансе напряжений.

Полное сопротивление цепи переменного тока при последовательном соединении нагрузок, указанных выше, обозначается Z . В комплексном виде: $Z = R + j(X_L - X_C)$.

Действующее значение полного сопротивления – это модуль комплексного числа, т. е. $Z = |Z| = \sqrt{R^2 + (X_L - X_C)^2}$.

Закон Ома для такой цепи определяется выражением:

$$I = \frac{U}{Z} = \frac{U}{\sqrt{R^2 + (X_L - X_C)^2}}$$

Отсюда следует, что при резонансе напряжений ток в цепи максимальный. Действительно, если $X_L = X_C$, то $Z = R$; $I = \frac{U}{R}$.

В данной лабораторной работе резонанс добиваемся изменением емкости конденсатора. Для трех характерных точек (до резонанса, резонанс и после резонанса) необходимо построить векторные диаграммы.

При построении векторных диаграмм необходимо выбрать основной (базисный) вектор. В данном случае за базисный берется вектор тока i , так как при последовательном соединении нагрузок в каждый момент времени он одинаков. Этот вектор откладывается в произвольном направлении, причем конец вектора, обозначенный стрелкой, определяет не только его направление, но и его величину в выбранном масштабе. Все остальные векторы, а именно \dot{U}_K и \dot{U}_C , откладываются строго определенно относительно вектора тока: вектор

6

7

тор \dot{U}_K опережает вектор тока на угол ϕ_K (угол между током и напряжением катушки), а вектор \dot{U}_C отстает от вектора тока на угол $\phi_C = 90^\circ$ с учетом того, что активным сопротивлением конденсатора пренебрегаем.

Необходимо помнить, что положительным направлением вращения векторов считается направление против часовой стрелки

Угол ϕ определяется через $\cos \phi_K = \frac{R_K}{Z_K} = \frac{R_K}{\sqrt{R_K^2 + X_L^2}}$.

Значения R_K и X_L определяются по измеренным данным, как указано далее в расчетной части. Этот угол для всех трех точек на векторных диаграммах будет оставаться одним и тем же, так как значения X_L и R_K не меняются.

Далее, согласно второму закону Кирхгофа ($\dot{U} = \dot{U}_K + \dot{U}_C$) надо векторно (по правилу параллелограмма) сложить ранее построенные вектора \dot{U}_K и \dot{U}_C , чтобы найти вектор полного напряжения \dot{U} .

Угол между этим вектором и вектором тока называется углом сдвига фаз – угол ϕ . Если векторную диаграмму построить в масштабе, то значение полного напряжения должно получиться равным подсчитенному к схеме напряжению, а угол ϕ должен быть равен расчитанному.

Коэффициент мощности ($\cos \phi = \frac{R}{Z}$), рассчитанный или полученный из векторной диаграммы, является важным энергетическим параметром и показывает, какая часть электрической энергии может быть превращена в другой вид энергии. При резонансе напряжений $\cos \phi = 1$, а это значит, что в случае резонанса вся электрическая энергия превращается в другой вид энергии, которая может быть полезно использована.

Пример построения векторной диаграммы для случая, когда $\dot{U}_C > \dot{U}_K$, приведен на рис. 1.

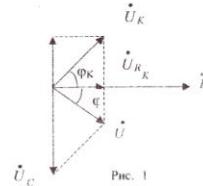


Рис. 1

Схема лабораторной установки

Лабораторная установка по исследованию неразветвленной электрической цепи включает контрольно-измерительные приборы, коммутационно-защитные аппараты и потребители электрической энергии.

Питание установки осуществляется от сети переменного тока через регулирующий автотрансформатор ЛАТР.

На рис. 2 приведена электрическая схема лабораторной установки для исследования линейной неразветвленной электрической цепи синусоидального тока.

Порядок выполнения работы

1. Собрать электрическую схему экспериментальной установки (рис. 2) для проведения исследований резонанса напряжений и предъявить для проверки инженеру.

2. С разрешения преподавателя установить с помощью регулирующего автотрансформатора ЛАТР требуемую величину напряжения и в процессе опыта поддерживать ее постоянной ($U = 20$ В).

3. Изменяя емкость магазина от 5 до 30 мкФ, измерять с помощью вольтметров PV_2 и PV_3 величины напряжения U_K , U_C , а также ток I с помощью амперметра PA .

8

9

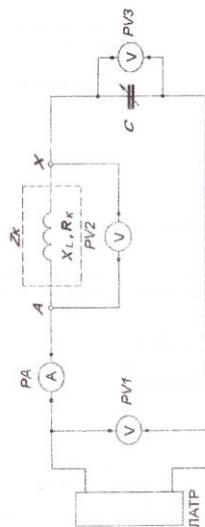


Рис. 2. Электрическая схема израильской цепи:
ЛАТР – лабораторный альтиметр; $P1/1$ – вольтметр на 30 В;
 $P1/2$ – вольтметр на 75 В; PA – амперметр на 500 мА;
 Z_K – катушка индуктивности; C – магнит емкости

10

Данные наблюдений занести в табл. 1.

Таблица 1

№ опыта	Измеряемые величины				Вычисляемые величины		
	C , мкФ	I , мА	U_K , В	U_C , В	X_C , Ом	Z , Ом	$\cos \phi$
1							
2							
3							
4							
5							

$$Z = \frac{U}{I}; \quad \cos \phi = \frac{R_K}{Z}; \quad \cos \phi_K = \frac{R_K}{Z_K}.$$

Значения емкостного сопротивления X_C для различных значений емкости определяются по формуле:

$$X_C = \frac{1}{2\pi fC},$$

где f – стандартная частота тока в сети ($f = 50$ Гц), C – значение емкости берется в фардах ($1 \text{ мкФ} = 10^{-6}$ Ф).

4. Для определения угла сдвига фаз между током и напряжением катушки, необходимо знать значения X_L и R_K . Эти значения определяются из точки резонанса.

Действительно, если учесть, что при резонансе $X_L = X_C$, то значение X_L надо взять равным вычисленному значению X_C для точки резонанса. Кроме того, в точке резонанса $Z = R_K$,

$$Z_r = \sqrt{R_K^2 + (X_L - X_C)^2}.$$

По опытным данным подсчитываются $Z_r \cos \phi$ и строятся:

– график зависимостей

$$U_L = f_1(C), U_C = f_2(C), I = f_3(C);$$

– три векторные диаграммы исследуемой последовательной цепи при

$$X_L < X_C; \quad X_L = X_C; \quad X_L > X_C$$

11

Содержание отчета

- Электрическая схема экспериментальной установки.
- Таблицы с вычисленными и измеренными величинами.
- Теоретические и экспериментальные характеристики.
- Векторные диаграммы.
- Использованные формулы.
- Краткие выводы. Сопоставление теоретических и экспериментальных характеристик с известными характеристиками из теории.

Контрольные вопросы

При допуске к лабораторной работе:

- Что называется резонансом напряжений?
- Почему при резонансе напряжений ток в цепи достигает своего наибольшего значения?
- При каком условии в цепи наступает резонанс напряжений?
- Как рассчитывать действующий ток в неравнозаделенной цепи синусоидального тока с потребителями электрической энергии, характеризуемыми со средоточенными параметрами R , L и C ?
- От каких величин зависит полное сопротивление электрической цепи при последовательном соединении R , L и C элементов?
- Как записывается закон Ома для цепи с последовательным соединением разных по характеру нагрузок?
- При защите лабораторной работы студент должен ответить на вопросы, проработанные при допуске к лабораторной работе, а также должен знать:
- Как определить коэффициент мощности цепи и чему он равен при резонансе напряжений?
- От каких параметров зависит значение угла сдвига фаз между напряжением и током?
- По какой формуле рассчитывают активную, реактивную и полную мощность в линейной электрической цепи синусоидального тока?
- Как строятся векторные диаграммы для цепи с последовательным соединением катушки индуктивности и емкости?
- Чему равно полное сопротивление цепи при резонансе напряжений?
- Какой характер (по нагрузке) имеет цепь с последовательным соединением катушки индуктивности и емкости при резонансе напряжений?

12

ЛАБОРАТОРНАЯ РАБОТА № 2 (4)

ИССЛЕДОВАНИЕ ТРЕХФАЗНОЙ ЦЕПИ ПЕРЕМЕННОГО ТОКА ПРИ СОЕДИНЕНИИ ПРИЁМНИКОВ ЗВЕЗДОЙ

Цель работы

1. Опытным путем найти соотношение между действующими фазовыми и линейными напряжениями и токами при равномерной и неравномерной нагрузке.

2. Установить роль нулевого провода в работе трехфазной установки при различных нагрузках.

3. Экспериментально подтвердить теоретические знания, полученные на лекциях и самостоятельных занятиях по трехфазным электрическим цепям при соединении звездой.

Общие сведения

Соединение звездой в трёхфазной цепи переменного тока – это такое соединение, при котором концы фаз приёмников соединяются в одну точку, называемую нейтральной или нулевой, а начала фаз выводятся из источника питания – трёхфазный генератор.

Трёхфазный генератор всегда соединяется звездой и всегда симметричен. Фазы генератора обозначаются заглавными буквами A , B , C , нейтральная точка – заглавной буквой N . Начала фаз приёмника обозначаются строчными буквами a , b , c , концы фаз – x , y , z , а нулевая точка – строчной буквой n .

Преимущество трёхфазной цепи при соединении звездой является наличие двух напряжений – линейного и фазного.

Линейным проводом называется провод, соединяющий начало каждой фазы генератора с началом соответствующей фазы приёмника.

Линейные напряжения обозначаются U_{AB} , U_{BC} , U_{CA} – для генератора и U_{ab} , U_{bc} , U_{ca} – для приёмника. Они измеряются между двумя линейными проводами. Поскольку генератор всегда симметричен, то при любой нагрузке (симметричной и несимметричной) линейное напряжение $U_x = U_{AB} = U_{BC} = U_{CA} = U_{ab} = U_{bc} = U_{ca} = U_{ab}$.

Провода, соединяющие концы фаз приёмника с нейтральной (нулевой) точкой называются фазными проводами, а напряжение, измеренное между началом и концом каждой фазы, называется фаз-

13

ным напряжением, соответственно они обозначаются U_A , U_B , U_C для генератора и U_a , U_b , U_c – для приемника. При симметричной нагрузке фаз приемника они равны между собой, при несимметричной – не равны.

Провод, соединяющий нейтральную точку генератора N с нейтральной точкой приемника n , называется нейтральным (нулевым) проводом, а напряжение, измеренное на нем при его размыкании, называется напряжением смещения нейтрали и обозначается U_{Nn} . Это напряжение может быть измерено только в случае несимметричной нагрузки. Его значение можно определить по формуле межзузлового напряжения

$$U_{Nn} = \frac{U_A Y_a + U_B Y_b + U_C Y_c}{Y_a + Y_b + Y_c},$$

где \dot{U}_A , \dot{U}_B , \dot{U}_C – комплексные значения фазных напряжений генератора; Y_a , Y_b , Y_c – комплексные значения полных проводимостей фаз приемника, при этом надо помнить, что полная проводимость каждой фазы – это величина, обратная полному сопротивлению (Z) той же фазы. Тогда при несимметричной нагрузке фаз комплексные значения фазных напряжений приемника равны (согласно второму закону Кирхгофа)

$$\dot{U}_a = \dot{U}_A - \dot{U}_{Nn}; \quad \dot{U}_b = \dot{U}_B - \dot{U}_{Nn}; \quad \dot{U}_c = \dot{U}_C - \dot{U}_{Nn}.$$

При построении векторной диаграммы фазных и линейных напряжений для симметричной нагрузки надо учесть, что согласно второму закону Кирхгофа для каждого из трех контуров (включавшего две фазы, например: a и b или a и c или b и c) можно записать

$$\dot{U}_{ab} = \dot{U}_a - \dot{U}_b; \quad \dot{U}_{bc} = \dot{U}_b - \dot{U}_c; \quad \dot{U}_{ca} = \dot{U}_c - \dot{U}_a.$$

Если потенциал нейтральной точки принять за начало отсчета, то фазные напряжения строятся от этой точки под углом 120° друг относительно друга, тогда (на основании вышеуказанных уравне-

ний) линейные напряжения равны векторной разности фазных напряжений и образуют замкнутый равносторонний треугольник. При активной нагрузке (как в данной работе) фазные токи также равны и направлены по фазным напряжениям ($\varphi_a = \varphi_b = \varphi_c$). Ток в нулевом проводе даже при его включении равен нулю и диаграмма представлена на рис. 1.

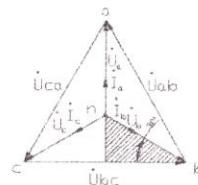


Рис. 1

При несимметричной нагрузке и отсутствии нулевого провода, когда фазные напряжения и токи не равны, напряжение смещения нейтрали $U_{Nn} \neq 0$ поэтому потенциал нейтральной точки приемника φ_n смещается относительно потенциала нейтральной точки генератора φ_N , т. е. из центра треугольника линейных напряжений. Векторная диаграмма в этом случае представлена на рис. 2.

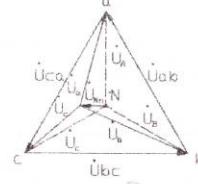


Рис. 2

15

При несимметричной нагрузке фаз и включенном нулевом проводе происходит выравнивание фазных напряжений приемника за счет перераспределения токов в фазах, но появляется ток в нулевом проводе, равный векторной сумме фазных токов $I_{Nn} = I_a + I_b + I_c$.

В этом случае векторная диаграмма представлена на рис. 3.

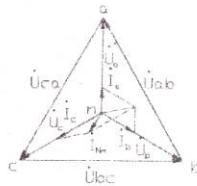


Рис. 3

Схема лабораторной установки

Лабораторная работа по исследованию трехфазных электрических цепей включает контрольно-измерительные приборы, коммутационно-защитные аппараты и потребители электрической энергии.

Питание установки осуществляется от сети переменного трехфазного тока.

На рис. 4 приведена электрическая схема лабораторной установки для исследования трехфазной цепи при соединении приемников звездой. В качестве приемников в этой схеме используются три ламповых реостата.

Порядок выполнения работы

1. Ознакомиться с электрической схемой, приборами, аппаратами, элементами экспериментальной установки для проведения опыта и записать их технические характеристики в отчет.

16

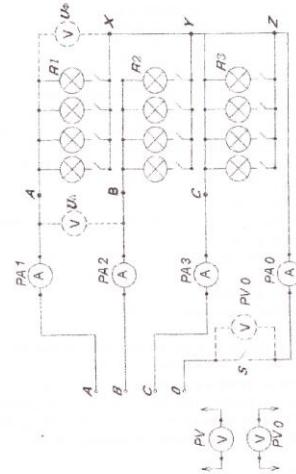


Рис. 4. Электрическая схема при соединении приемников звездой:
амперметры $P4.1$, $P4.2$, $P4.3$ на 300 мА; амперметр $P4.0$ на 0,25 А; вольтметр PV 150 - 300 В; вольтметр $PV0$ – цифровой мультиметр.
 S – наключенный

17

2. Собрать электрическую схему экспериментальной установки (рис. 4) и предъявить для проверки лаборанту. С разрешения преподавателя провести опыты.

Причины. Действующие значения линейных токов, равные фазным токам, определяются по амперметрам P_{11} , P_{12} , P_{21} , а ток в нулевом проводе – по амперметру P_0 . Линейные и фазные напряжения измеряются одним вольтметром путем касания его щупами начала и конца фазы при измерении фазных напряжений, а также начал двух фаз при измерении линейных напряжений. Напряжение U_0 измеряется на выключателе X .

3. При всех отключенных лампах в фазах (проверяется по состоянию их выключателей) и разомкнутом выключателе S в нулевом проводе подать напряжение на схему нажатием кнопки «ВКЛ».

Последовательно устанавливать различные режимы работы приемников, соединенных звездой, изменяя количество включенных в фазе ламп.

Режимы работы, подлежащие рассмотрению

- максимальная равномерная нагрузка трех фаз ($R1 = R2 = R3$) без нулевого провода;
 - то же с нулевым проводом;
 - неравномерная нагрузка фаз ($R1 \neq R2 \neq R3$) без нулевого провода;
 - то же с нулевым проводом;
 - неравномерная нагрузка фаз ($R1 = R2; R3 \neq \infty$), без нулевого провода.

— то же с нулевым проводом;

Показания приборов записываются в табл. I.
Следует иметь в виду, чтоvoltметр P_1 , будет давать показания, отличные от нуля, только в случае неравномерной нагрузки фаз и отключением выпрямителя S . Амперметр P_0 будет давать показания, отличные от нуля, в случае неравномерной нагрузки фаз и включением выпрямителя S . Соотношение между линейными и фазовыми напряжениями определяется только при равномерной нагрузке фаз.

Мощности и сопротивления фаз рассчитываются по формулам:

$$P_a = U_a I_a; \quad P_b = U_b I_b; \quad P_c = U_c I_c$$

$$P = P_a + P_b + P_c.$$

$$R_a = \frac{U}{I_a}; \quad R_b = \frac{U}{I_b}; \quad R_c = \frac{U}{I_c}.$$

18

Результаты вычислений записать в табл. 2.

Таблица 2

№ опыта	$\frac{U_d}{U\Phi}$	P_{in} Вт	P_{bs} Вт	P_{rs} Вт	R_{av} Ом	R_{bs} Ом	R_{rs} Ом
1							
2							
3							
4							
5							
6							

4. Предъявить данные опытов для проверки преподавателю и с его разрешения схему разобрать. Рабочее место привести в исходное состояние и предъявить лаборанту.

5. Построить векторные диаграммы напряжений и токов для исследованных режимов работы.

Содержание отчета

1. Электрическая схема лабораторной установки.
 2. Таблицы с измеренными и вычисленными величинами.
 3. Использованные формулы.
 4. Векторные диаграммы напряжений и токов.
 5. Краткие выводы. Сопоставление опытных и расчетных данных с известными положениями из теории.

Контрольные вопросы

При допуске к лабораторной работе:

1. Какое соединение трехфазной цепи называется соединением звездой?
 2. Как называются провода, отходящие от трехфазного генератора?

Таблица 1

1

3. Какая нагрузка фаз называется симметричной?
 4. Какие соотношения между действующими фазовыми и линейными напряжениями можно получить, и для каких режимов работы они справедливы?
 - 5. Для какой нагрузки целесообразно включение нулевого провода?
 6. При какой нагрузке фаз применяется четырехпроводная система?
 7. В каком соотношении находятся линейные и фазовые токи при соединении звездой?
 8. Как находятся активная мощность каждой фазы и всей сети?

При **зашите** лабораторной работы студент должен ответить на вопросы, проработанные при допуске к лабораторной работе, а также должен знать:

- должен знать:

 1. Что произойдет, если нагрузка фаз будет неравномерной, а нулевой провод не подключен?
 2. Как оказывается обрывом нейтрального провода на работе трехфазной установки при различных режимах?
 3. К чему приводят обрывы линейного провода в трехфазной установке?
 4. Чему равен ток в нулевом проводе?
 5. Как построить векторные диаграммы токов и напряжений соединения звездой для всех указанных режимов?
 6. В каком соотношении находятся линейные напряжения при несимметричной нагрузке?

30

При допуске к лабораторной работе:

2. Как называются провода, отходящие от трехфазного генератора?