

МИНИСТЕРСТВО ОБРАЗОВАНИЯ И НАУКИ
РОССИЙСКОЙ ФЕДЕРАЦИИ
Белгородский государственный технологический университет
им. В.Г. Шухова

ЭЛЕКТРОТЕХНИКА И ЭЛЕКТРОНИКА

Методические указания к выполнению лабораторных работ для бакалавров направления 220400.62 – Управление и информатика в технических системах, 220700.62 – Автоматизация технологических процессов и производств, 221000.62 – Мехатроника и робототехника, 221700.62 – Метрология, стандартизация и сертификация, 230100.62 – Автоматизированные системы обработки информации и управления, 280700.62 – Радиационная и электромагнитная безопасность

Белгород
2014

МИНИСТЕРСТВО ОБРАЗОВАНИЯ И НАУКИ
РОССИЙСКОЙ ФЕДЕРАЦИИ
Белгородский государственный технологический университет
им. В.Г. Шухова

Утверждено
научно-методическим
советом
университета

ЭЛЕКТРОТЕХНИКА И ЭЛЕКТРОНИКА

Методические указания к выполнению лабораторных работ для
бакалавров направления 220400.62 – Управление и информатика в
технических системах, 220700.62 – Автоматизация
технологических процессов и производств. 221000.62 –
Мехатроника и робототехника, 221700.62 – Метрология,
стандартизация и сертификация, 230100.62 – Автоматизированные
системы обработки информации и управления, 280700.62 –
Радиационная и электромагнитная безопасность

Белгород
2014

УДК: 621.3(07)

ББК: 31.2я7

Э-45

Составители: стар. преп. А.С. Солдатенков
ассист. О.В. Парашук

Рецензент канд. техн. наук, _____

ЭЛЕКТРОТЕХНИКА И ЭЛЕКТРОНИКА: методические указания к выполнению лабораторных работ для бакалавров направления 220400.62 – Управление и информатика в технических системах, 220700.62 – Автоматизация технологических процессов и производств. 221000.62 –
Э-45 Мехатроника и робототехника, 221700.62 – Метрология, стандартизация и сертификация, 230100.62 – Автоматизированные системы обработки информации и управления, 280700.62 – Радиационная и электромагнитная безопасность/ сост.: А.С. Солдатенков, О.В. Парашук. – Белгород: Изд-во БГТУ, 2012. - ____ с.

Методические указания составлены в соответствии с государственным образовательным стандартом. Содержат требования к проведению лабораторных работ с целью закрепления знаний, полученных студентами на лекционных занятиях.

Предназначены для бакалавров направления 220400.62 – Управление и информатика в технических системах, 220700.62 – Автоматизация технологических процессов и производств. 221000.62 – Мехатроника и робототехника, 221700.66 – Метрология, стандартизация и сертификация, 230100.62 – Автоматизированные системы обработки информации и управления, 280700.62 – Радиационная и электромагнитная безопасность

Данное издание публикуется в авторской редакции.

УДК: 621.3(07)

ББК: 31.2я7

©Белгородский
государственный
технологический
университет
(БГТУ) им. В.Г. Шухова,
2014

Лабораторная работа № 1

ИССЛЕДОВАНИЕ РЕЖИМОВ РАБОТЫ И МЕТОДОВ РАСЧЕТА ЛИНЕЙНЫХ ЦЕПЕЙ ПОСТОЯННОГО ТОКА С ДВУМЯ ИСТОЧНИКАМИ ПИТАНИЯ

Цель работы: Ознакомление с приемами и погрешностями измерения токов, напряжений и сопротивлений с помощью амперметра и вольтметра; закрепление навыков расчета линейных электрических цепей с одним источником питания; исследование мостовой схемы постоянного тока с резистивным датчиком.

Содержание работы

Положительные направления токов, э.д.с. и напряжений. В электротехнике приняты условные положительные направления напряжения U , тока I и э.д.с. E , которые на схемах указываются стрелками.

За положительное направление напряжения принимают направление от точки с большим потенциалом к точке с меньшим потенциалом. Если, например, потенциал точки A больше потенциала точки B ($\varphi_A > \varphi_B$), то напряжение направлено от A к B (рис 1.1).

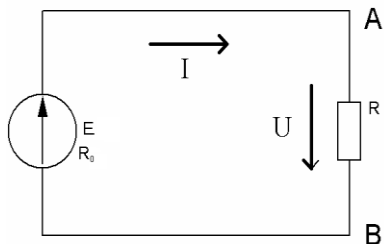


Рис. 1.1. Простая электрическая цепь с источником э.д.с.

За положительное направление тока на участке цепи без источника (см. рис.1.1, участок с резистором R) принято также направление от точки с большим потенциалом к точке с меньшим. На указанном участке цепи положительные направления тока и напряжения совпадают. Положительным направлением э.д.с. источника является направление от точки с меньшим потенциалом к точке с большим внутри источника. Больший потенциал обозначается (+), меньший - (-).

Для того чтобы в электрической цепи (см. рис.1.1) установить положительные направления э.д.с., напряжений и токов, следует воспользоваться вольтметром магнитоэлектрической системы. Как

известно, подвижная часть этого прибора отклоняется вправо, когда зажим прибора, обозначенный знаком (+), присоединен к точке электрической цепи с большим потенциалом, а зажим, обозначенной знаком (-), к точке с меньшим потенциалом. Направление тока легко определить, если учесть, что в резисторе направления тока и напряжения совпадают.

Соотношения между токами, напряжениями и сопротивлениями в электрических цепях определяются законами Ома и Кирхгофа. С помощью этих законов может быть произведен расчет режима работы любой электрической цепи.

Закон Ома. На участке электрической цепи, не содержащем источника э.д.с. (см. рис.1.1), сила тока I цепи прямо пропорциональна напряжению U и обратно пропорциональна сопротивлению данного участка R .

$$I = \frac{U}{R} . \quad (1.1)$$

Величина IR называется также падением напряжения на резисторе R .

По закону Ома для всей цепи (рис. 1.1) сила тока прямо пропорциональна э.д.с. E и обратно пропорциональна полному сопротивлению цепи $(R+R_0)$

$$I = \frac{E}{R + R_0} ,$$

где R_0 - внутреннее сопротивление источника. Это же выражение может быть записано в виде

$$E = IR + IR_0 = U + IR_0 , \quad (1.2)$$

т.е. напряжение источника меньше его э.д.с. на величину падения напряжения на его внутреннем сопротивлении.

Из полученного для U выражения видно, что с увеличением тока напряжение на зажимах источника вследствие большего внутреннего падения напряжения уменьшается. Когда источник отключен от внешней цепи (холостой ход) $I=0$, напряжение на его зажимах равно э.д.с.

Измерение э.д.с. и определение внутреннего сопротивления источника электрической энергии. Так как э.д.с. источника равна разности потенциалов на его зажимах при отсутствии внешней нагрузки, то для её нахождения измеряют вольтметром напряжение на зажимах источника при разомкнутой внешней цепи. Ток, который протекает через вольтметр, обладающий значительно большим сопротивлением по сравнению с сопротивлением источника, весьма мал, и поэтому

измеренное при помощи вольтметра напряжение на зажимах источника, согласно формуле (1.2), практически можно считать равным его э.д.с.

Внутреннее сопротивление источника можно определить из уравнения (1.2) по показаниям вольтметра и амперметра. Для этого при отключенной цепи необходимо измерить э.д.с. Затем при работе источника под нагрузкой измерить напряжение на его зажимах и силу тока в цепи. Тогда

$$R_0 = \frac{E - U}{I}. \quad (1.3)$$

Первый закон Кирхгофа. Алгебраическая сумма силы токов ветвей, сходящихся в узле γ , равна нулю

$$\sum_{k=1}^n I_k = 0$$

где n – число ветвей, подходящих к узлу γ .

Если все втекающие в узел токи условно считать отрицательными, а вытекающие – положительными, то для узла γ (рис.1.2) можно записать

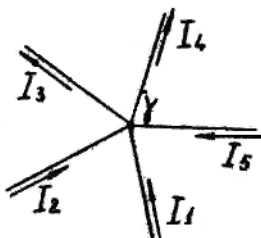
$$-I_1 - I_2 + I_3 + I_4 - I_5 = 0.$$


Рис.1.2. Узел электрической цепи

Второй закон Кирхгофа. Алгебраическая сумма падений напряжения в ветвях любого замкнутого контура электрической цепи равна сумме э.д.с. источников энергии, действующих в этом контуре.

$$\sum_{k=1}^n I_k r_k = \sum_{k=1}^m E_k$$

Перед составлением уравнения по второму закону Кирхгофа необходимо произвольно выбрать направление обхода контура. Затем включить в сумму со знаком (+) все э.д.с. и токи, направления которых

совпадают с направлением обхода контура, а со знаком (-) те, направления которых противоположны направлению обхода.

Составим уравнение по второму закону Кирхгофа для контура *абвга* (рис.1.3). На схеме условно внутренние сопротивления и э.д.с. источников энергии показаны раздельно. Пусть обход контура совпадает с направлением движения часовой стрелки. Тогда по второму закону Кирхгофа имеем

$$I_1(R_{01} + R_1) - I_3 R_{03} = E_1 - E_3.$$

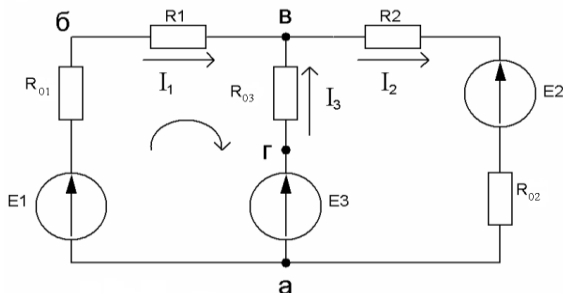


Рис. 1.3. Сложная электрическая цепь

Определение эквивалентного сопротивления и преобразование электрических цепей. Сопротивления в электрических цепях могут быть включены последовательно, параллельно, смешанно или по более сложным схемам. Расчет цепей упрощается при замене нескольких сопротивлений одним эквивалентным, а также при других преобразованиях. Рассмотрим свойства различных способов соединения сопротивлений.

Последовательным называется такое соединение, при котором во всех включенных резисторах сила тока одна и та же (рис.1.4).

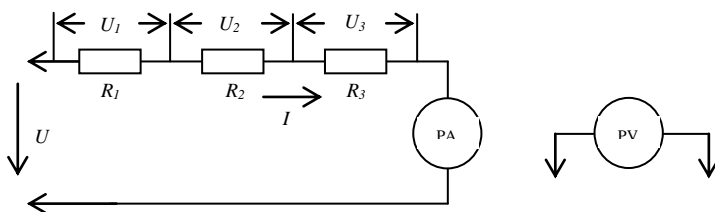


Рис.1.4. Последовательное соединение резисторов

На основании второго закона Кирхгофа можно записать, что общее напряжение цепи равно сумме падений напряжений на отдельных её участках

$$U = U_1 + U_2 + U_3$$

или

$$IR_{\text{экв}} = IR_1 + IR_2 + IR_3,$$

откуда

$$R_{\text{экв}} = R_1 + R_2 + R_3.$$

Таким образом, общее сопротивление цепи равно арифметической сумме сопротивлений отдельных участков.

Цепь с любым числом последовательно включенных резисторов можно заменить цепью с одним эквивалентным резистором $R_{\text{экв}}$ (рис.1.5).

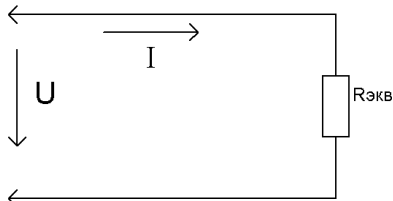


Рис. 1.5. Эквивалентная схема

Приемники электрической энергии, включенные последовательно, работают нормально, т.е. находятся под номинальным напряжением U_n , когда все они имеют один и тот же номинальный ток I_n , а напряжение источника питания равно сумме их номинальных напряжений. В этом случае приемники, имеющие большую номинальную мощность, находятся под большим напряжением, так как они имеют большее сопротивление.

Последовательно можно включать, в частности, одинаковые приемники, если напряжение источника равно произведению числа приемников на их номинальное напряжение. Достоинство этой схемы — простота и наглядность, но она может быть использована лишь при условии, если напряжение источника равно произведению числа приемников на их номинальное напряжение. При выходе из строя одного приемника прекращается работа всех приемников. Поэтому применяется она сравнительно редко.

Параллельным называется такое соединение, при котором все включенные в цепь приемники находятся под одним и тем же

напряжением (рис.1.6). В этом случае они присоединены к двум узлам цепи, и на основании первого закона Кирхгофа можно записать, что общий ток равен алгебраической сумме токов отдельных ветвей, т.е.

$$I = I_1 + I_2 + I_3$$

или

$$\frac{U}{R_{\text{экв}}} = \frac{U}{R1} + \frac{U}{R2} + \frac{U}{R3},$$

откуда

$$\frac{I}{R_{\text{экв}}} = \frac{I}{R1} + \frac{I}{R2} + \frac{I}{R3}. \quad (1.4)$$

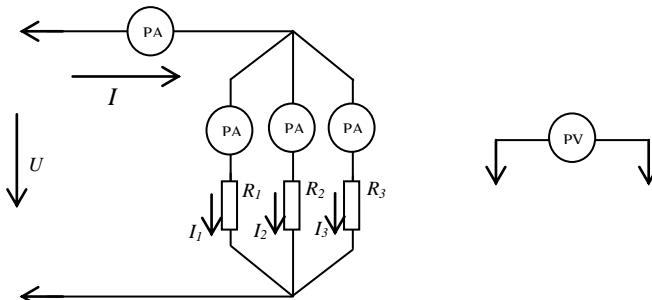


Рис.1.6. Параллельное соединение резисторов

Три параллельно включенных резистора цепи можно заменить одним эквивалентным согласно формуле (1.4)

$$R_{\text{экв}} = \frac{R1R2R3}{R1R2 + R1R3 + R2R3}.$$

При двух параллельно включенных резисторах

$$R_{\text{экв}} = \frac{R1R2}{R1 + R2}.$$

Из соотношения (1.4) следует, что общая проводимость цепи равна арифметической сумме проводимостей отдельных ветвей:

$$g_{\text{экв}} = g1 + g2 + g3,$$

где $g = \frac{1}{R}.$

По мере роста числа включенных приемников проводимость цепи возрастает, а общее сопротивление уменьшается. **Если параллельно включены n одинаковых приемников, то общее сопротивление равно сопротивлению одного из них, деленному на n .**

Напряжение цепи

$$U = IR_{\text{экв}} = I_1 R_1 = I_2 R_2 = I_3 R_3.$$

Отсюда следует, что

$$\frac{I_1}{I_2} = \frac{R_2}{R_1},$$

т.е. ток в цепи распределяется между параллельными ветвями обратно пропорционально их сопротивлениям. Включение по этой схеме приемников любой мощности рассчитано на одно и то же номинальное напряжение. Причем включение или отключение одного или нескольких приемников не отражается на работе остальных. Это обуславливает высокую надежность и гибкость схемы параллельного соединения, поэтому в электротехнике она является основной.

Смешанным называется такое соединение, при котором в цепи имеются группы параллельно и последовательно включенных приемников (рис.1.7).

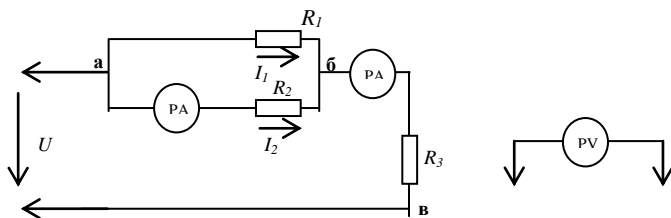


Рис.1.7. Смешанное соединение резисторов

Эквивалентное сопротивление в этом случае равно сумме сопротивлений отдельных последовательно включенных участков цепи. Для цепи, представленной на рис.1.7, имеем

$$R_{\text{экв}} = R_{aб} + R_{бв} = \frac{R_1 R_2}{R_1 + R_2} + R_3.$$

Очевидно, что в этом случае можно перейти к эквивалентной схеме с одним резистором (см. рис. 1.5). Напряжения и токи резисторов определяются на основании соотношения для последовательного и параллельного соединений.

Включение приемников по этой схеме осуществляют крайне редко, лишь тогда, когда ни параллельное, ни последовательное соединение не обеспечивает нормальное питание приемников от источника.

Порядок выполнения работы

1. Убедиться, что все выключатели стенда выключены (находятся в нижнем положении).

2. Собрать схему рис. 1.8 при этом:

- PV1 и PA3 после моста не подключать;
- PV1 подключить параллельно VD8;
- нижний по схеме конец ЛАТРа TV2 подключить перемычкой к фазе «В».

Технические данные измерительного моста:

$$\begin{aligned} R20 &= 4,7 \text{ кОм} & R21 &= 200 \text{ Ом} \\ R22 &= 10 \text{ кОм} & E1 &= U_{\text{см}} = \text{В} \\ R23 &= 4,7 \text{ кОм} & R24 &= \text{кОм} \end{aligned}$$

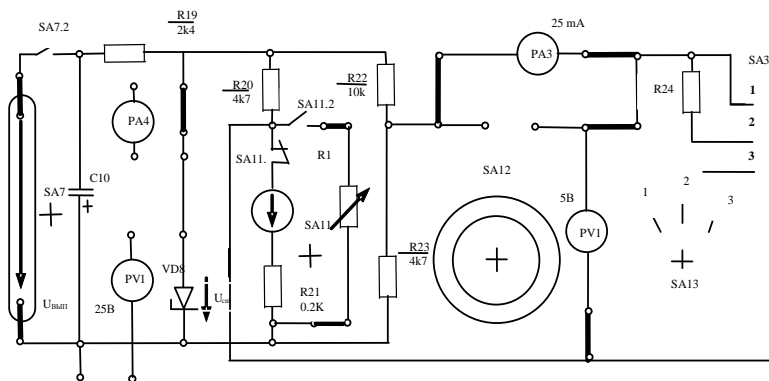


Рис.1.8. Схема лабораторной установки

3. Включить R1 в схему моста (включить SA11). Установить значение R1, заданное преподавателем. Изучить порядок выполнения работы.

4. Определить цену деления приборов PV1 и PA3.

5. Доложить преподавателю о готовности к работе.

6. С разрешения преподавателя подать напряжение на стенд (нажать черную кнопку SB1).

7. Проверить, что тумблер переключения пределов регулирования напряжения ЛАТРа в положении «0 → 100 В», а оба переключателя установлены на «0». Подать напряжение на ЛАТР TV2 (включить SA3).

8. Тумблером SA7 подать напряжение на измерительный мост (включить SA7).

9. Правым переключателем ЛАТР TV2 увеличивать напряжение, подаваемое на измерительный мост, до момента пробоя стабилитрона VD8, наблюдая за показаниями PV1. При увеличении напряжения показания PV1 увеличиваются, а после пробоя VD8 показания PV1 не изменяются. Записать показание PV1 (напряжение стабилизации VD8 $U_{см} = B$).

10. Выключить SA7. Отсоединить PV1 от VD8. Собрать схему рис.1.8. (подключить PV1 и PA3 после моста). Включить SA7.

11. Методом амперметра и вольтметра определить R24:

- установить SA13 в положение «2»;
- левым переключателем R1 добиться максимального рассогласования моста (максимального отклонения стрелки PV1);
- снять показания PV1 и PA3 (при нажатой кнопке), записать в таблицу 1.1 и по закону Ома рассчитать R24.

Таблица 1.1

U, В	I, мА	R24, кОм

$$R24 = \frac{U}{I}$$

12. Включить источник E в плечо моста (выключить SA11).

13. Снять экспериментальную зависимость $U_{вых} = f(E)$ и $I_3 = f(E)$, изменяя величину E с помощью переключателя SA12. Результаты записать в таблицу 1.2.

Таблица 1.2

E, В	0	1	2	3	4	5	6	7	8	9	1
U _{вых} , В											
I ₃ , мА											

14. Выключить SA7, SA3. Нажать красную кнопку SB2.

15. Доложить преподавателю о выполнении работы.

16. Разобрать схему. Органы управления поставить в исходное положение.

17. Сдать рабочее место преподавателю.

18. Методом контурных токов рассчитать все токи и величину выходного напряжения моста при значении ЭДС, заданном преподавателем (см. Приложение 1).

19. Построить зависимость $U_{\text{вых}}=f(E)$ и $I_3=f(E)$.
20. Сопоставить $U_{\text{вых}}$ для заданного значения E с расчетным.
21. Сделать выводы по работе.

Пример расчета выходного напряжения моста методом контурных токов

Система уравнений для расчета контурных токов для значений $E_1=16\text{В}$, $E=10\text{В}$, $R_{24}=7,617\text{кОм}$ имеет вид (см. рис. 1.9)

$$\begin{cases} I_{11} \cdot (R_{20} + R_{21}) - I_{22} \cdot R_{20} - I_{33} \cdot R_{21} = E_1 - E, \\ I_{22} \cdot (R_{20} + R_{24} + R_{22}) - I_{11} \cdot R_{20} - I_{33} \cdot R_{24} = 0, \\ I_{33} \cdot (R_{21} + R_{23} + R_{24}) - I_{22} \cdot R_{24} - I_{11} \cdot R_{21} = E. \end{cases}$$

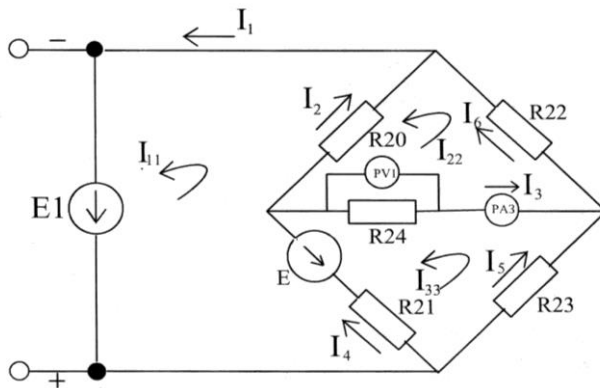


Рис.1.9. Схема для расчета

Подставляем значения сопротивлений в кОм, ЭДС – в вольтах, значения тока получим в миллиамперах.

$$\begin{cases} I_{11} \cdot (4,7 + 0,2) - I_{22} \cdot 4,7 - I_{33} \cdot 0,2 = 16 - 10, \\ -4,7 \cdot I_{11} + I_{22} \cdot (4,7 + 7,617 + 10) - 7,617 \cdot I_{33} = 0, \\ -0,2 \cdot I_{11} - 7,617 \cdot I_{22} + I_{33} \cdot (0,2 + 4,7 + 7,617) = 10; \end{cases}$$

$$\begin{cases} 4,9 \cdot I_{11} - 4,7 \cdot I_{22} - 0,2 \cdot I_{33} = 6, \\ -4,7 \cdot I_{11} + 22,317 \cdot I_{22} - 7,617 \cdot I_{33} = 0, \\ -0,2 \cdot I_{11} - 7,617 \cdot I_{22} + 12,517 \cdot I_{33} = 10. \end{cases}$$

$$D = \begin{vmatrix} 4,9 & -4,7 & -0,2 & 4,9 & -4,7 \\ -4,7 & 22,317 & -7,617 & -4,7 & 22,317 \\ -0,2 & -7,617 & 12,517 & -0,2 & -7,617 \end{vmatrix} =$$

$$\begin{aligned} &= 4,9 \cdot 22,317 \cdot 12,517 - 4,7 \cdot 7,617 \cdot 0,2 - 0,2 \cdot 4,7 \cdot 7,617 - \\ &- 0,2 \cdot 22,317 \cdot 0,2 - 7,617 \cdot 7,617 \cdot 4,9 - 12,517 \cdot 4,7 \cdot 4,7 = \\ &= 1368,7752 - 7,15998 - 7,15998 - 0,89268 - 284,2916 - 276,5005 = 792,7704; \end{aligned}$$

$$D_{11} = \begin{vmatrix} 6 & -4,7 & -0,2 & 6 & -4,7 \\ 0 & 22,317 & -7,617 & 0 & 22,317 \\ 10 & -7,617 & 12,517 & 10 & -7,617 \end{vmatrix} =$$

$$\begin{aligned} &= 6 \cdot 22,317 \cdot 12,517 + 4,7 \cdot 7,617 \cdot 10 + 0,2 \cdot 0 \cdot 7,617 + \\ &+ 10 \cdot 22,317 \cdot 0,2 - 7,617 \cdot 7,617 \cdot 6 + 12,517 \cdot 0 \cdot 4,7 = \\ &= 1676,0513 + 357,999 + 0 + 44,634 - 348,1121 + 0 = 1730,5722; \end{aligned}$$

$$D_{22} = \begin{vmatrix} 4,9 & 6 & -0,2 & 4,9 & 6 \\ -4,7 & 0 & -7,617 & -4,7 & 0 \\ -0,2 & 10 & 12,517 & -0,2 & 10 \end{vmatrix} =$$

$$\begin{aligned} &= 4,9 \cdot 0 \cdot 12,517 + 6 \cdot 7,617 \cdot 0,2 + 0,2 \cdot 4,7 \cdot 10 - \\ &- 0,2 \cdot 0 \cdot 0,2 + 10 \cdot 7,617 \cdot 4,9 + 12,517 \cdot 4,7 \cdot 6 = \\ &= 0 + 9,1404 + 9,4 - 0 + 373,233 + 352,9794 = 744,7528; \end{aligned}$$

$$D_{33} = \begin{vmatrix} 4,9 & -4,7 & 6 & 4,9 & -4,7 \\ -4,7 & 22,317 & 0 & -4,7 & 22,317 \\ -0,2 & -7,617 & 10 & -0,2 & -7,617 \end{vmatrix} =$$

$$\begin{aligned} &= 4,9 \cdot 22,317 \cdot 10 + 4,7 \cdot 0 \cdot 0,2 + 6 \cdot 4,7 \cdot 7,617 + \\ &+ 0,2 \cdot 22,317 \cdot 6 + 7,617 \cdot 0 \cdot 4,9 - 10 \cdot 4,7 \cdot 4,7 = \\ &= 1093,533 + 0 + 214,7994 + 26,7804 + 0 - 220,9 = 1114,2128; \end{aligned}$$

$$I_{11} = \frac{D_{11}}{D} = \frac{1730,5722}{792,7704} = 2,1829 \text{ (mA)};$$

$$I_{22} = \frac{D_{22}}{D} = \frac{744,7528}{792,7528} = 0,9395 \text{ (мА)};$$

$$I_{33} = \frac{D_{33}}{D} = \frac{1114,2128}{792,7528} = 1,4055 \text{ (мА)};$$

$$I_3 = I_{22} - I_{33} = 0,9395 - 1,4055 = -0,4659 \text{ (мА)};$$

$$|U_{\text{вых}}| = I_3 \cdot R_{24} = 0,4659 \cdot 7,617 = 3,549 \text{ (В)}.$$

$$\frac{3,549 - 3,48}{3,48} \cdot 100\% = 1,997\%.$$

$$\begin{matrix} I_1 = \\ I_2 = \end{matrix}$$

$$\begin{matrix} I_3 = \\ I_4 = \end{matrix}$$

$$\begin{matrix} I_5 = \\ I_6 = \end{matrix}$$

Содержание отчета

Отчет должен содержать: название, цель работы; схемы (рис. 1.8. и 1.9.); расчетные формулы; таблицы 1.1 и 1.2; графики зависимостей $U_{\text{вых}}=f(E)$ и $I_3=f(E)$; выводы.

Контрольные вопросы

1. Какое соединение резисторов называется последовательным?
2. Чему равно эквивалентное сопротивление цепи с последовательно включенными резисторами?
3. При каких условиях применяется последовательное включение резисторов (приемников)?
4. Какое соединение резисторов называется параллельным?
5. Как определить для параллельного соединения эквивалентное сопротивление и эквивалентную проводимость?
6. При каких условиях можно включать параллельно приемники электрической энергии?
7. Почему схема параллельного включения приемников является основной?
8. Какое соединение резисторов называется смешанным?
9. Как определить для смешанного соединения эквивалентное сопротивление?

Лабораторная работа №2
ОПРЕДЕЛЕНИЕ ПАРАМЕТРОВ И ИССЛЕДОВАНИЕ РЕЖИМОВ
РАБОТЫ ЭЛЕКТРИЧЕСКОЙ ЦЕПИ ПЕРЕМЕННОГО ТОКА С
ПОСЛЕДОВАТЕЛЬНЫМ СОЕДИНЕНИЕМ КАТУШКИ
ИНДУКТИВНОСТИ, РЕЗИСТОРА И КОНДЕНСАТОРА.
РЕЗОНАНС НАПРЯЖЕНИЙ

Цель работы: изучение основных режимов работы электрической цепи при последовательном соединении резистора, катушки индуктивности и конденсатора и явлений, происходящих в неразветвленных цепях переменного синусоидального тока при изменении соотношений величин индуктивности и ёмкости; определение параметров схемы замещения индуктивной катушки с магнитопроводом; ознакомление с явлением резонанса напряжений; изучение методов построения векторных диаграмм напряжений и токов.

Содержание работы

Рассмотрим процессы в цепи с последовательным соединением катушки и конденсатора (рис. 2.1). Реальная катушка обладает индуктивным сопротивлением $X_L = \omega L$ и активным сопротивлением

$$R = \frac{\rho l}{S}$$

где ω - угловая частота переменного тока, L - индуктивность катушки, ρ - удельное электрическое сопротивление провода катушки, l - длина провода, S - площадь поперечного сечения провода.

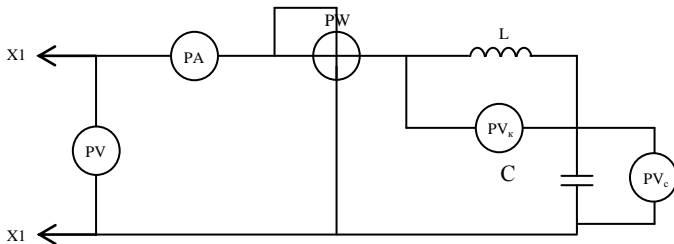


Рис. 2.1. Схема цепи с последовательным соединением катушки и конденсатора

При прохождении тока через катушку электрическая энергия расходуется на нагревание провода катушки. Скорость преобразования

электрической энергии в тепловую учитывается с помощью величины, называемой активной мощностью $P=RI^2$.

Измерив ток и активную мощность катушки, можно вычислить активное сопротивление катушки

$$R = \frac{P}{I^2}.$$

Его можно определить также, пропуская через катушку постоянный ток. В цепи постоянного тока катушка обладает только активным сопротивлением, так как угловая частота $\omega = 2\pi f = 0$ и $X_L = \omega L = 0$. Поэтому

$$R = \frac{U}{I},$$

где U - постоянное напряжение, приложенное к катушке, а I - сила постоянного тока, протекающего через катушку.

Эквивалентная схема замещения катушки может быть представлена в виде последовательного соединения резистивного и индуктивного идеальных элементов (рис. 2.2).

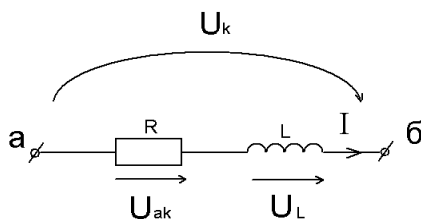


Рис. 2.2. Эквивалентная схема замещения катушки

Напряжение на катушке U_k можно разложить на две составляющие - активную $U_{ак}$ и индуктивную U_L . Векторная диаграмма напряжений и тока для катушки приведена на рис. 2.3. Напряжение U_k можно измерить на выводах катушки с помощью вольтметра, ток I - с помощью амперметра. Угол сдвига фаз между током и напряжением катушки φ_k можно определить из формулы $P_k = U_k I \cos \varphi_k$, если измерить с помощью ваттметра активную мощность катушки P_k . Составляющие напряжения U_k , U_L , $U_{ак}$ можно вычислить из треугольника напряжений ОАВ (рис. 2.3). $U_{ак} = U_k \cos \varphi_k$ или определить графически, опустив перпендикуляр из конца вектора U_k (точка А на рис. 2.3) на линию вектора тока I .

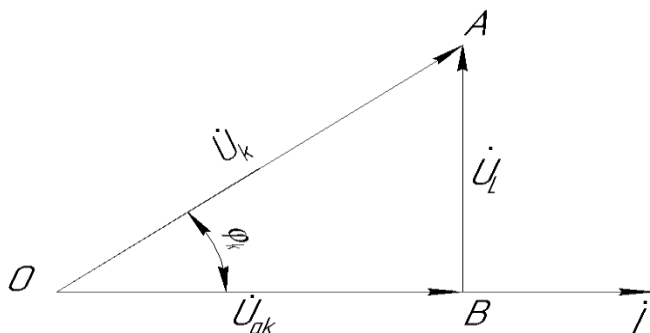


Рис. 2.3. Векторная диаграмма напряжений и тока для катушки

Конденсатор в цепи переменного тока обладает емкостным сопротивлением $X_C = 1/\omega C$, где C - емкость конденсатора. Следует указать, что в конденсаторе также имеются активные потери энергии в диэлектрике. Однако величина этих потерь настолько мала, что ими можно пренебречь. На схеме замещения конденсатор можно представить в виде идеального емкостного элемента с параметром C , равным емкости конденсатора.

Последовательное соединение катушки и конденсатора изображено в виде схемы замещения на рис. 2.4.

При подключении такой цепи под напряжение U в ней возникает ток I . Вектор активной составляющей напряжений на катушке $\dot{U}_{ак}$ будет совпадать по направлению с вектором тока \dot{I} (рис. 2.5), так как соответствующие синусоиды мгновенных значений совпадают по фазе:

$$i = I_m \sin \omega t \text{ и } U = iR = I_m R \sin \omega t. \quad (2.1)$$

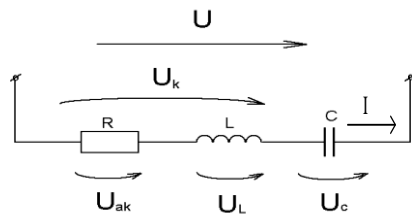


Рис. 2.4. Схема замещения цепи с последовательным соединением катушки и конденсатора

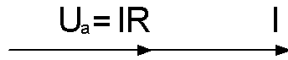


Рис. 2.5. Векторная диаграмма напряжения и тока при активной нагрузке цепи

Вектор индуктивного напряжения $\dot{U}_L = \dot{I} x_L$ опережает по фазе вектор тока \dot{I} на 90° (рис. 2.6), так как синусоида напряжения U_L на индуктивности опережает по фазе синусоиду тока i на 90° .

$$U_L = L \frac{di}{dt} = I_m \omega t \sin(\omega t + 90^\circ) \quad (2.2)$$

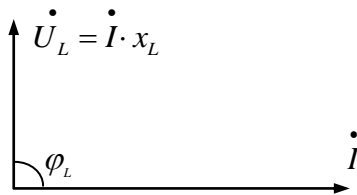


Рис. 2.6. Векторная диаграмма напряжения и тока при индуктивной нагрузке цепи

Вектор емкостного напряжения $\dot{U}_C = \dot{I} x_C$ отстает по фазе от вектора тока \dot{I} на 90° (рис. 2.7), так как синусоида напряжения на емкости при нулевых начальных условиях отстает от синусоиды тока i на 90° .

$$U_c = \frac{1}{C} \int_0^t i dt = \frac{I_m}{\omega C} \sin(\omega t - 90^\circ) \quad (2.3)$$

Для рассматриваемой цепи уравнение по второму закону Кирхгофа имеет следующий вид.

$$\dot{U} = \dot{U}_a + \dot{U}_L + \dot{U}_C \quad (2.4)$$

где

$$\dot{U}_a = \dot{I} R; \quad \dot{U}_L = \dot{I} x_L; \quad \dot{U}_C = \dot{I} x_C.$$

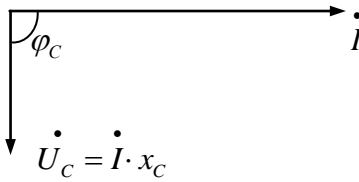


Рис. 2.7. Векторная диаграмма напряжения и тока при емкостной нагрузке цепи

Согласно уравнению (2.4) и рис. 2.5 - 2.7, векторная диаграмма напряжений цепи (рис. 2.4) будет иметь вид, показанный на рис. 2.8, где вектор \dot{U}_a совпадает по фазе с вектором \dot{I} , а вектор \dot{U}_L опережает по фазе на 90° вектор тока \dot{I} . Сумма векторов \dot{U}_L и \dot{U}_a дает вектор напряжения катушки $\dot{U}_K = \dot{U}_{ak} + \dot{U}_L$, опережающий по фазе ток на угол φ_K .

Вектор \dot{U}_c отстает по фазе на 90° от вектора тока \dot{I} . Сумма векторов, $\dot{U}_L, \dot{U}_a, \dot{U}_c$ дает вектор напряжения сети \dot{U} , опережающий ток по фазе на угол φ .

Разделив и умножив стороны треугольника (рис. 2.8) на величину тока \dot{I} , получим подобные треугольники сопротивлений и мощностей (рис. 2.9 и 2.10 соответственно).

Из треугольника сопротивлений (см. рис. 2.9) найдем полное сопротивление Z и $\cos \varphi$ цепи

$$Z = \sqrt{R^2 + (x_L - x_C)^2}; \quad (2.5)$$

$$\cos \varphi = \frac{R}{Z}. \quad (2.6)$$

Из векторной диаграммы напряжений (см. рис. 2.8) получим формулу тока I , которая является выражением закона Ома для последовательной цепи переменного тока:

$$I = \frac{U}{\sqrt{R^2 + (x_L - x_C)^2}} = \frac{U}{Z}. \quad (2.7)$$

Из диаграммы мощностей (рис. 2.10) получим соотношение между полной S , активной P и реактивными Q_L и Q_C мощностями

$$S = \sqrt{P^2 + (Q_L - Q_C)^2} \quad (2.8)$$

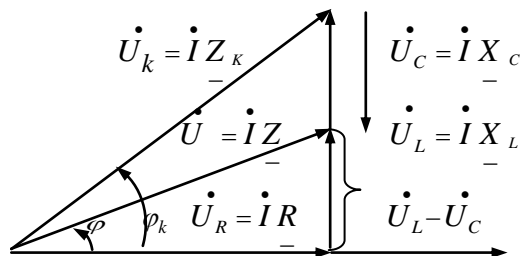


Рис.2.8. Векторная диаграмма тока и напряжения для цепи с последовательным соединением элементов R, L, C при $X_L > X_C$

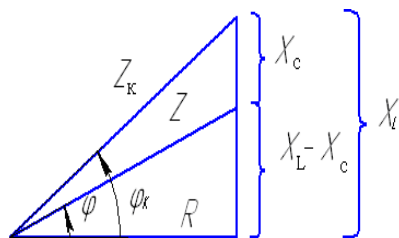


Рис. 2.9. Треугольник сопротивлений для цепи с последовательно соединенными элементами R, L, C

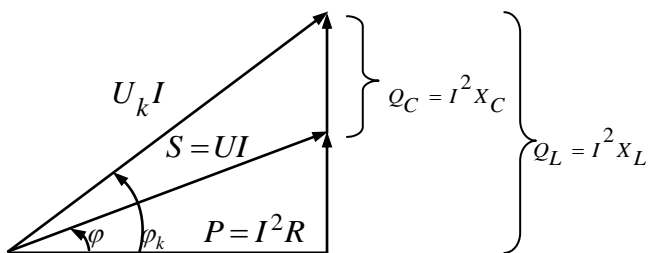


Рис. 2.10. Треугольник мощностей для цепи с последовательным соединением элементов R, C, L

Изменяя величину емкости или индуктивности в цепи, можно изменять соотношение между емкостными и индуктивными

сопротивлениями и напряжениями $U_C = I \frac{1}{\omega C}$ и $U_L = I\omega L$,

и получать различные значения угла сдвига фаз φ между вектором тока \dot{I} и вектором напряжения сети \dot{U} согласно уравнению (2.6). Если

величина $L > \frac{1}{\omega^2 C}$, имеем $\omega L > \frac{1}{\omega C}$ и $U_L > U_C$, т.е. в цепи преобладает

индуктивное сопротивление x_L и напряжение \dot{U}_L , поэтому вектор тока \dot{I} отстает по фазе от вектора напряжения сети \dot{U} на угол φ (см. рис. 2.8).

Если $L < \frac{1}{\omega^2 C}$, то, преобладает емкостное сопротивление x_C и напряжение \dot{U}_C , поэтому вектор тока \dot{I} опережает по фазе вектор напряжения сети (рис. 2.11).

При величине индуктивности

$$L_{рез} = \frac{1}{\omega^2 C} \quad (2.9)$$

индуктивное сопротивление будет равно емкостному

$$\omega L = \frac{1}{\omega C}, \quad (2.10)$$

а, следовательно, будут равны между собой индуктивное и емкостное напряжения (рис. 2.12)

$$I x_L = I x_C ; U_L = U_C. \quad (2.11)$$

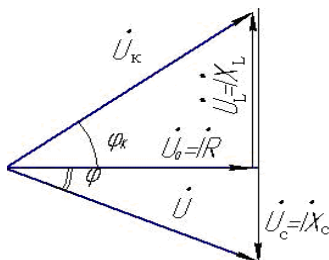


Рис. 2.11. Векторная диаграмма тока и напряжений для цепи с последовательным соединением элементов R, C, L при $x_L < x_C$

Мы получим резонанс напряжений, т.е. полную взаимную компенсацию индуктивного и емкостного напряжений:

$$\dot{U}_L + \dot{U}_C = 0.$$

При резонансе напряжений угол сдвига фаз $\varphi=0$, следовательно,
 $\cos \varphi = 1$. (2.12)

Вектор напряжения $\dot{U}_L = \dot{U}_{ak}$. Полное сопротивление цепи при резонансе $Z_{рез}$ принимает минимальное значение $Z_{рез}=R$, так как $x_L - x_C=0$. Ток при резонансе $I_{рез}$ и активная мощность P принимают максимальные значения:

$$I_{рез} = \frac{U}{Z} = \frac{U}{R}, \quad P = I_{рез}^2 R = UI_{рез}. \quad (2.13)$$

Реактивная мощность равна нулю

$$Q = I(U_L - U_C) = 0;$$

$$Q_L - Q_C = 0. \quad (2.14)$$

Индуктивное U_L и емкостное U_C напряжения в $\frac{x_L}{R} = \frac{x_C}{R}$ раз больше напряжения сети U :

$$U_L = U_C = Ix_L = \frac{U}{R} x_L = \frac{U}{R} x_C.$$

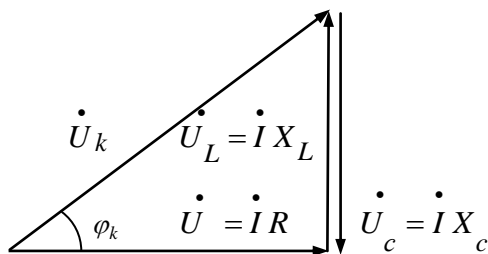


Рис. 2.12. Векторная диаграмма тока и напряжений при резонансе напряжений ($x_L = x_C$)

Поэтому резонанс напряжений может оказаться опасным для установки. При испытании таких цепей требуется особая осторожность. Явление резонанса напряжений, т.е. взаимной компенсации реактивных напряжений ($U_L - U_C = 0$), а, следовательно, и реактивных мощностей ($Q_L - Q_C$), объясняется тем, что мгновенные значения напряжений на

индуктивности U_L и на емкости U_C в любой момент времени равны и имеют противоположные знаки. Отсюда следует, что, если, например, индуктивность берет энергию из сети для создания магнитного поля, то в этот момент конденсатор, разряжаясь, отдает энергию в сеть. Происходит взаимная компенсация энергии, потребляемой ими из сети.

Таким образом, при резонансе полная энергия, потребляемая из сети, расходуется только на нагревание резистивного элемента цепи.

Кривые зависимостей полного сопротивления Z цепи от величины емкости C показаны на рис. 2.13. При $C_p = \frac{1}{\omega^2 L}$, величина Z минимальна и равна $Z_{рез} = R$.

На рис. 2.13 показана также кривая зависимости тока I и $\cos\varphi$ от величины емкости C . При $C = C_{рез}$ ток I имеет максимальное значение

$$I_{рез} = \frac{U}{R} \text{ при всех других значениях емкости } I = \frac{U}{Z}.$$

Из выражения (2.10) видно, что резонанс напряжений в цепи может быть получен изменением индуктивности L или емкости C при неизменной частоте сети ω или изменением частоты сети при заданных постоянных L и C .

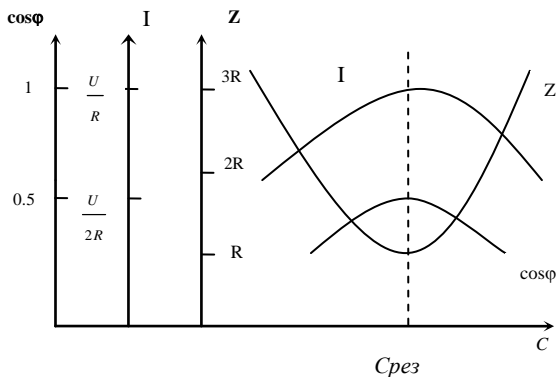


Рис.2.13. Графики зависимостей полного сопротивления цепи Z , тока I и коэффициента мощности $\cos\varphi$ от емкости (при $L=\text{const}$)

Построение векторных диаграмм

При последовательном соединении элементов цепи через каждый из них протекает один и тот же ток I . Поэтому при построении векторных диаграмм для таких цепей вектор тока принимается за базовый (исходный). Векторные диаграммы строят циркулем методом засечек

по известным из опыта напряжениям: U_a на зажимах резистора, U_k - на зажимах катушки, U_C - на зажимах конденсатора и U - на зажимах всей цепи. Все величины на диаграммах изображаются в масштабе.

В качестве примера рассмотрим построение векторной диаграммы для цепи с последовательным соединением резистора (реостата) и катушки. Напряжение на резисторе U_a , совпадающее по фазе с током I , откладывают в масштабе по линии тока. Из конца вектора \dot{U}_a радиусом, равным напряжению на катушке U_{kl} делают первую засечку. Вторая засечка делается радиусом, равным общему напряжению цепи U из начала вектора \dot{U}_a . В точке пересечения засечек будут находиться концы векторов \dot{U} и \dot{U}_k (рис. 2.14,а). Активную и индуктивную составляющую напряжений на катушке $\dot{U}_{ак}$ и U_L определяют, опуская перпендикуляр на ось вектора тока \dot{I} из конца вектора \dot{U}_k . Векторная диаграмма для цепи с последовательным соединением катушки и конденсатора, строится аналогично и приведена на рис.2.14,б.

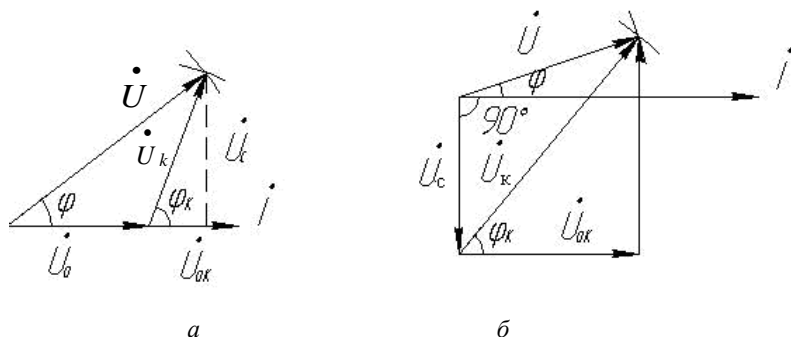


Рис. 2.14. Построение векторных диаграмм методом засечек

Порядок выполнения работы

1. Убедиться, что все выключатели стенда выключены (находятся в нижнем положении).
2. Собрать схему рис. 2.15, при этом PV2 и C11 не подключать; R17 соединить перемычкой с проводом, идущим к фазе «В»; R18 перемычкой к проводу фазы «В» не подключать.

РАСЧЁТНЫЕ ФОРМУЛЫ

$$S = UI_H; \quad Z_{1\Sigma} = \frac{U}{I_H}; \quad R_{1\Sigma} = \frac{P}{I_H^2}; \quad R_{L1} = R_{1\Sigma} - R17;$$

$$X_{L1} = \sqrt{Z_{1\Sigma}^2 - R_{1\Sigma}^2};$$

$$R17 = \quad \text{Ом}; \quad L1 = \frac{X_{L1}}{2\pi f}; \quad \cos \varphi = \frac{P}{S} = \frac{P}{UI_H};$$

$$f = 50 \text{ Гц} \quad I_{\text{рез max}} = \frac{U}{R_{1\Sigma}}.$$

9. Выключить SA3. Оба переключателя ЛАТР TV2 установить на «0».

10. Рассчитать максимально возможное значение тока при резонансе $I_{\text{рез max}}$. Рассчитать напряжение U_{min} , при котором в режиме резонанса напряжений ток в цепи не превысит $I_H = 0,8 \text{ А}$. Результаты расчетов записать в таблицы 2.1, 2.2.

Расчётные параметры для опыта резонанса напряжений

Таблица 2.2

C11 _{рез} , мкФ	U _{min} , В	I _H =I _{рез} , А

РАСЧЁТНЫЕ ФОРМУЛЫ

При резонансе $X_{L1} = X_{C11}$, поэтому $C11_{\text{рез}} = \frac{1}{2\pi f X_{L1}};$

$$U_{\text{min}} = I_H (R_{L1} + R17) = I_H R_{1\Sigma}; \quad R_{1\Sigma} = \frac{P}{I_H^2}.$$

11. Собрать полную схему рис. 2.15 PV4 подсоединить проводами к L1 (на схеме управляемого выпрямителя). Убедиться, что тумблер SA4 выключен (рычажок вниз).

12. С разрешением преподавателя включить SA3. Переключателями ЛАТР TV2 установить по прибору PV3 значение U_{min} . Если $50 \text{ В} < U_{\text{min}} < 80 \text{ В}$, то вместо PV3 включить выносной вольтметр электромагнитной системы, позволяющий измерять напряжение в диапазоне $50 \div 80 \text{ В}$. Если $U_{\text{min}} = 50 \pm 5 \text{ В}$, то опыт проводить при $U_{\text{min}} = 50 \text{ В}$. Во время опыта поддерживать U_{min} постоянным.

13. Изменяя емкость C_{11} , задавая значения, указанные в таблице 2.4, снять зависимости $I = f(C_{11})$, $P = f(C_{11})$, $U_{L1} = f(C_{11})$, $U_{C11} = f(C_{11})$ при $U_{min} = const$. Результаты измерений записать в таблицу 2.4. Данные измерений в момент резонанса напряжений записать в таблицу 2.3.

Результаты опыта резонанса напряжений

Таблица 2.3

Экспериментальные данные				Расчет
$U_{min},$ В	$I_{рез},$ А	$P,$ Вт	$C_{рез},$ мкФ	$\cos\varphi$

Таблица 2.4

$C_{11},$ мкФ	8	16	24	32	40	44	48	56	63
$I,$ А									
$P,$ Вт									
$U_{C11},$ В									
$U_{L11},$ В									
$\cos\varphi$									

14. Выключить SA3. Выключить питание стенда (нажать красную кнопку SB2).

15. Доложить преподавателю о выполнении работы. Переключатели схемы поставить в исходное положение. Разобрать схему.

16. Сдать рабочее место преподавателю.

17. Рассчитать параметры схемы замещения катушки индуктивности (таблица 2.1).

18. Определить величину ёмкости C_{11} , при которой в цепи наступает резонанс напряжений ($C_{11_{рез}}$). Результат записать в таблицу 2.2. Сравнить результат расчёта с опытными данными (таблица 2.3).

19. Определить расчётным путём значение $\cos\varphi$ и тока I в цепи при максимальном значении ёмкости конденсатора $C_{11} = 63$ мкФ. Результаты расчётов записать в таблицу 2.5.

Определение расчётным путём значения $\cos\varphi$ и тока I в цепи при максимальном значении ёмкости конденсатора $C_{11}=63\text{ мкФ}$ и $U=U_{\min}$

Таблица 2.5

Исходные данные		Расчетные значения		
$U_{\min}, \text{В}$	$C_{11}, \text{мкФ}$	$X_{C11}, \text{Ом}$	$I, \text{А}$	$\cos\varphi$

РАСЧЁТ НЫЕ ФОРМУЛЫ

$$X_{C11} = \frac{1}{2\pi f C_{11}}, \quad I = \frac{U}{\sqrt{R_{1\Sigma}^2 + (X_{L1} - X_{C11\max})^2}} = \frac{U}{Z},$$

$$\cos\varphi = \frac{P}{U_{\min} \cdot I}.$$

20. По результатам измерений (таблица 2.4) рассчитать $\cos\varphi$.

21. Построить зависимости $I = f(C_{11})$, $\cos\varphi = f(C_{11})$, $U_{L1} = f(C_{11})$, $U_{C11} = f(C_{11})$ в единой координатной системе.

22. Построить векторные диаграммы напряжений и токов для трех режимов: до резонанса, при резонансе и после резонанса.

Расчётные формулы для построения векторных диаграмм

$$U_R = IR_{1\Sigma} =$$

$$\dot{U}_{L1} = j\dot{I}X_{L1} =$$

$$X_{C11} = \frac{1}{2\pi f C_{11}} =$$

$$\dot{U}_{C11} = -j\dot{I}X_{C11} =$$

23. Сделать выводы по работе.

Содержание отчета

Отчет должен содержать: название, цель работы; схему (рис. 2.15); расчетные формулы; таблицы 2.1 - 2.5; графики зависимостей $I = f(C_{11})$, $\cos\varphi = f(C_{11})$, $U_{L1} = f(C_{11})$, $U_{C11} = f(C_{11})$ в единой координатной системе; векторные диаграммы напряжений и токов для трех режимов: до резонанса, при резонансе и после резонанса; выводы.

Контрольные вопросы

1. Что такое индуктивное и емкостное сопротивления и от чего они зависят?
2. Как вычисляется полное сопротивление неразветвленной цепи переменного синусоидального тока?
3. Как вычисляется действующее значение тока в цепи с последовательным соединением резистивного, емкостного и индуктивного элементов?
4. Что такое коэффициент мощности цепи переменного тока и почему нужно стремиться к его повышению при потреблении электрической энергии?
5. При каком условии возникает резонанс напряжений в цепи переменного синусоидального тока? Чем характеризуется это явление?
6. Объясните, какую опасность может представлять резонанс напряжений в электрических цепях?
7. Каким должно быть соотношение индуктивного и емкостного сопротивлений, чтобы ток в цепи опережал напряжение? Поясните это при помощи векторной диаграммы.
8. В цепи переменного тока частотой $f=50$ Гц с последовательно включенными катушкой и конденсатором имеет место резонанс. Определить напряжение на катушке и конденсаторе, если $U = 20$ В, $r = 10$ Ом, $C = 1$ мкФ. Вычислить индуктивность катушки.

Лабораторная работа № 3

ИССЛЕДОВАНИЕ РЕЖИМОВ РАБОТЫ ЛИНИИ ЭЛЕКТРОПЕРЕДАЧИ ПЕРЕМЕННОГО ТОКА ПРИ ИЗМЕНЕНИИ КОЭФФИЦИЕНТА МОЩНОСТИ НАГРУЗКИ. РЕЗОНАНС ТОКОВ

Цель работы: изучение эксплуатационных характеристик линии электропередачи переменного тока; экспериментальное определение параметров нагрузки; исследование режимов работы ЛЭП при изменении коэффициента мощности нагрузки.

Содержание работы

Рассмотрим параллельное соединение катушки, обладающей индуктивным $X_L = \omega L$ и активным R сопротивлениями, с конденсатором, обладающим емкостным сопротивлением $X_C = \frac{1}{\omega C}$ (рис.3.1).

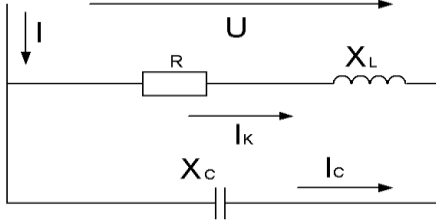


Рис. 3.1. Принципиальная схема параллельного соединения R, X_L, X_C

При включении такой цепи под напряжение U в катушке протекает ток I_K ,

$$I_K = \frac{U}{\sqrt{R^2 + X_L^2}}, \quad (3.1)$$

где $Z_K = \sqrt{R^2 + X_L^2}$ - полное сопротивление катушки.

Вектор тока будет отставать от напряжения на угол φ_K

$$\cos \varphi_K = \frac{R}{Z_K}, \quad \sin \varphi_K = \frac{X_L}{Z_K}. \quad (3.2)$$

В конденсаторе протекает ток I_C

$$I_C = \frac{U}{X_C} = \omega C U. \quad (3.3)$$

Вектор тока \dot{I}_C будет опережать на 90° вектор \dot{U} , $\varphi_C = 90^\circ$. Вектор общего тока определяется на основании первого закона Кирхгофа

$$\dot{I} = \dot{I}_K + \dot{I}_C. \quad (3.4)$$

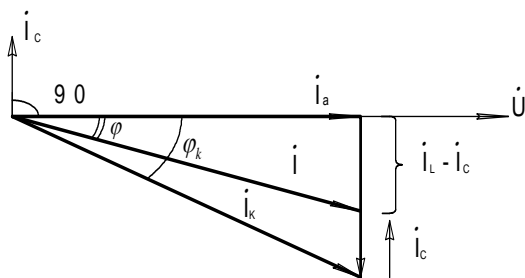


Рис.3.2. Векторная диаграмма \dot{U} , \dot{I} для цепи с параллельным соединением катушки и емкости при $I_L > I_C$

Векторная диаграмма токов согласно (3.4) показана на рис.3.2. Вектор тока \dot{I}_k проводим под углом φ_k к вектору напряжения \dot{U} . Из конца вектора тока \dot{I}_k проводим вектор тока \dot{I}_c под углом $\varphi_c = 90^\circ$ к вектору напряжения \dot{U} (в сторону опережения).

Сумма вектора \dot{I}_k и \dot{I}_c даст вектор общего тока, отстающий на угол φ от вектора напряжения.

Для аналитического определения общего тока I и угла φ разложим ток катушки I_k на активную составляющую I_a , совпадающую с напряжением U , и индуктивную составляющую I_L , отстающую на 90° от напряжения U .

$$I_a = I_k \cos \varphi_k = \frac{U}{Z_k} \cdot \frac{R}{Z_k} = Ug ;$$

$$I_L = I_k \sin \varphi_k = \frac{U}{Z_k} \cdot \frac{X_L}{Z_k} = Ub_L , \quad (3.5)$$

где g и b_L – активная и индуктивная проводимости катушки:

$$g = \frac{R}{Z_k^2} ; b_L = \frac{X_L}{Z_k^2} . \quad (3.6)$$

Аналогично определяют проводимость конденсатора. При отсутствии конденсатора активного сопротивления ($R_c=0$) активная проводимость его равна нулю $g_c = \frac{R}{Z_c^2} = 0$, где $Z_c = X_c$.

Емкостная проводимость

$$b_C = \frac{I_C}{U} = \frac{X_C}{Z_C^2} = \frac{1}{X_C} = \omega C. \quad (3.7)$$

Из векторной диаграммы на рис.3.2. имеем

$$I = \sqrt{I_a^2 + (I_L - I_C)^2}, \quad (3.8)$$

$$\cos \varphi = \frac{I_a}{I}. \quad (3.9)$$

Подставив значение I_a , I_C и I_L из уравнений (3.5) и (3.7) в уравнение (3.8), получим:

$$I = U \sqrt{g^2 + (b_L - b_C)^2} = UY, \quad (3.10)$$

где $Y = \frac{I}{U} = \sqrt{g^2 + (b_L - b_C)^2}$ – полная проводимость всей цепи.

Разделив стороны треугольника (рис.3.3.) на напряжение, получим треугольник проводимостей (рис.3.4.), из которого находим

$$\cos \varphi = \frac{g}{Y} = \frac{g}{\sqrt{g^2 + (b_L - b_C)^2}}. \quad (3.11)$$

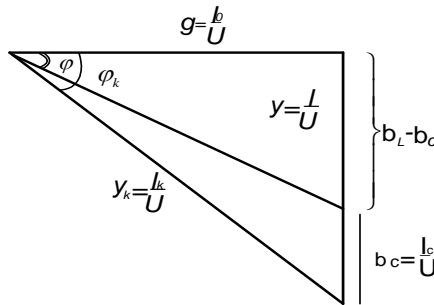


Рис. 3.3. Векторная диаграмма для цепи с параллельным соединением катушки и емкости при $I_L > I_C$

Изменяя величину емкости C , от которой зависит значение b_C , согласно (3.7), можно изменять соотношение между b_C и индуктивными проводимостями (b_L), а, следовательно, и токами: $I_C = Ub_C = U\omega C$;

$$I_L = Ub_L.$$

При величине $b_C < b_L$, т.е. $C < \frac{b_L}{\omega}$ имеем $U\omega C < Ub_C$ или $I_C < I_L$. Преобладает индуктивная проводимость b_L и, следовательно, ток I_L , поэтому вектор общего тока \dot{I} отстает от вектора напряжения \dot{U} (рис.3.2).

При величине $b_C > b_L$ т.е. $C > \frac{b_L}{\omega}$ имеем $U\omega C > Ub_C$ или $I_C > I_L$. Преобладает емкостная проводимость b_C и, следовательно ток I_C , поэтому вектор общего тока \dot{I} опережает вектор напряжения \dot{U} (рис.3.4).

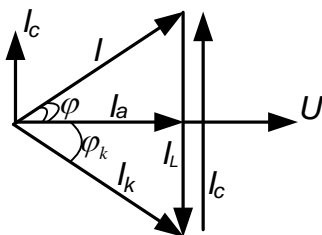


Рис.3.4. Векторная диаграмма для цепи с параллельным соединением катушки и емкости при $I_L < I_C$

При величине емкости $C = \frac{b_L}{\omega}$ (3.12)

емкостная проводимость равна индуктивной

$$b_C = \omega C = b_L, \quad (3.13)$$

а, следовательно, будут равны между собой емкостный и индуктивный токи (рис.3.5).

$$b_C U = b_L U ; I_C = I_L. \quad (3.14)$$

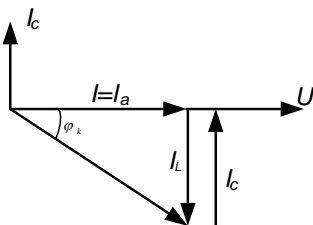


Рис.3.5. Векторная диаграмма при резонансе токов ($I_L = I_C$)

Мы получим резонанс токов, т.е. полную взаимную компенсацию индуктивного и емкостного токов

$$I_L - I_C = 0. \quad (3.15)$$

В результате общий ток I при резонансе состоит только из активной составляющей, согласно выражению (3.8) и рис.3.5.

$$I = I_a = Ug, \quad (3.16)$$

поэтому угол $\varphi = 0$, а $\cos \varphi = 1$.

Полная проводимость цепи, а, следовательно, и ток I принимает минимальное значение, так как согласно (3.10) $Y = g$, поскольку $b_L - b_C = 0$, а

полное сопротивление цепи $Z_p = \frac{1}{g}$, следовательно - максимальное значение.

Реактивная мощность цепи равна нулю

$$U(I_L - I_C) = 0; Q_L - Q_C = 0.$$

Явление резонанса токов, т. е. взаимной компенсации токов ($I_L - I_C = 0$), а, следовательно, и реактивных мощностей ($Q_L - Q_C = 0$) объясняется следующим. Когда индуктивная ветвь (катушка) потребляет энергию для создания магнитного поля, в этот момент в параллельной ветви конденсатор разряжается и отдает энергию. Происходит взаимная компенсация энергий. Общая энергия, потребляемая из сети, расходуется только на активном сопротивлении катушки (на нагревание провода катушки).

Зависимость полного сопротивления Z цепи от величины емкости будет иметь следующий вид:

$$Z = \frac{1}{Y} = \frac{1}{\sqrt{g^2 + (b_L - b_C)^2}}, \quad (3.18)$$

где $g = \frac{R}{Z_K^2}$ и $b_L = \frac{X_L}{Z_K^2}$ от C не зависят.

Кривые $Z=f_1(C)$ и $I=f_2(C)$, построенные по выражениям (3.18) и (3.10), показаны на рис.3.6. Там же дана кривая $\cos \varphi = f_3(C)$, построенная по уравнению (3.11).

Из (3.12) видно, что величины емкости и индуктивности, при которых наступает резонанс, зависят от частоты переменного тока. При заданных постоянных C и L явление резонанса может быть получено изменением частоты.

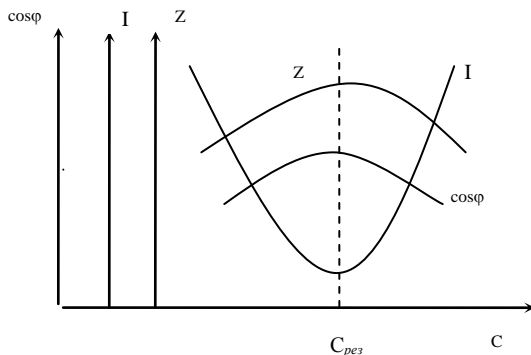


Рис.3.6. Графики зависимости тока в цепи I , $\cos\varphi$ и полного сопротивления Z от емкости

Определение параметров всей электрической цепи и ее элементов

Полная проводимость Y и сопротивление Z как всей цепи, так и отдельных ветвей – катушки и конденсатора – определяются по показаниям вольтметра U и соответствующих амперметров в общей цепи I , в цепи катушки I_K и в цепи конденсатора I_C :

$$Z = \frac{1}{Y} = \frac{U}{I};$$

$$Z_K = \frac{1}{Y_K} = \frac{U}{I_K};$$

$$Z_C = \frac{1}{b_C} = \frac{U}{I_C}.$$

Активное сопротивление катушки R определяется по показаниям ваттметра P и амперметра в цепи катушки I_K

$$R = \frac{P}{I_K^2}.$$

Тогда $X_L = \sqrt{Z_K^2 - R^2}.$

Коэффициент мощности $\cos\varphi$ всей цепи и катушки определяется по показаниям ваттметра P , вольтметра U и соответствующих амперметров, в общей цепи I и в цепи катушки I_K :

$$\cos \varphi = \frac{P}{UI}; \quad \cos \varphi_K = \frac{P}{UI_K}.$$

Реактивные составляющие ток I_L , и проводимости катушки b_L ,

$$I_L = I_K \sin \varphi_K.$$

$$b_L = \frac{I_L}{U} = \frac{\sin \varphi_K}{Z_K}.$$

Емкость конденсатора C

$$C = \frac{1}{\omega X_C}.$$

Порядок выполнения работы

1. Убедиться, что все выключатели стенда выключены (находятся в нижнем положении).
2. Собрать схему рис. 3.7, (при этом $C11$ не подключать, а $L1$, $R17$ замкнуть перемычкой).
3. Определить цену деления приборов. Ознакомиться с задействованными в опыте органами управления.
4. Доложить преподавателю о готовности к выполнению работы.
5. С разрешения преподавателя подать напряжение на стенд (нажать черную кнопку SB1).
6. Убедиться, что тумблер ЛАТР TV 2 находится в положении «0 → 100В», а оба переключателя в положении «0». Проверить, что SA4 выключен (рычажок – вниз). Подать напряжение на ЛАТР TV 2 (включить SA3).

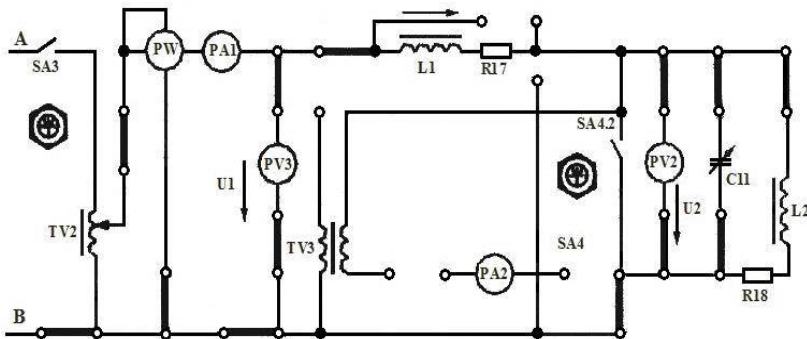


Рис. 3.7

Определение параметров схемы замещения катушки L2

Таблица 3.1

Экспериментальные данные			Расчетные значения								
$U_{2H},$ В	$I,$ А	$P,$ Вт	$S,$ ВА	$Z_2,$ Ом	$X_{L2},$ Ом	$L_2,$ Гн	$R_{2\Sigma},$ Ом	$R_{L2},$ Ом	$\cos\varphi_{2H}$	φ_{2H}	$C11_{рез},$ мкФ

РАСЧЕТНЫЕ ФОРМУЛЫ

$$S = U_{2H} I, Z_2 = \frac{U_{2H}}{I}, X_{L2} = \sqrt{Z_2^2 - R_{2\Sigma}^2}, L2 = \frac{X_{L2}}{2\pi f},$$

$$R_{2\Sigma} = R18 + R_{L2} = \frac{P}{I^2}, R_{L2} = R_{2\Sigma} - R18, \cos\varphi_{2H} = \frac{R_{2\Sigma}}{Z_2},$$

$$C11_{рез} = \frac{X_{L2}}{2\pi f Z_2^2}, R18 = 50 \text{ Ом.}$$

Расчет параметров для опыта повышения $\cos\phi$ до требуемого значения

Таблица 3.2

$P, \text{ Вт}$	$U_{2H}, \text{ В}$	$\cos\varphi_{2H}$	$\cos\varphi_{2mp}$	$tg\varphi_{2H}$	$tg\varphi_{2mp}$	$C11, \text{ мкФ}$
			0,95			

РАСЧЕТНАЯ ФОРМУЛА

$$C_{11} = \frac{P_2}{\omega U_{2H}^2} (tg\varphi_{2H} - tg\varphi_{2mp});$$

$P_2 = P,$ так как $L1$ и $R17$ шунтированы.

Результаты измерений

Таблица 3.3

$C_{II},$ $мкФ$	4	8	12	16	20	24	28	32	36
$P, Вт$									
$I, А$									
$U_l, В$									

Результаты вычислений

Таблица 3.4

b_c									
$(b_{L2} - b_C)^2$									
Y									
$\cos \varphi_2$									
$I^2 \cdot R_{l\Sigma}$									
P_2									
η									

РАСЧЕТНЫЕ ФОРМУЛЫ

$$g = \frac{R_{2\Sigma}}{Z_2^2}, \quad b_c = 2\pi f C_{11}, \quad b_{L2} = \frac{X_{L2}}{Z_2^2},$$

$$Y = \sqrt{g^2 + (b_{L2} - b_C)^2}, \quad \cos \varphi_2 = \frac{g}{Y},$$

$$R_{l\Sigma} = R_{L1} + R_{l7} \quad (\text{из ЛР №2}),$$

$$P_2 = P - P_1 = P - I^2 R_{l\Sigma},$$

$$\eta = \frac{1}{1 + \frac{P_2 R_{l\Sigma}}{U_{2H}^2 \cos^2 \varphi_2}}.$$

Параметры для расчета $\cos\varphi_2$ и к.п.д.

Таблица 3.5

$R_{2\Sigma}, \text{ Ом}$	$Z_2, \text{ Ом}$	$g, \text{ См}$	$g^2, \text{ См}^2$	$b_{L2}, \text{ См}$

7. Левым переключателем ЛАТР TV2 увеличивать напряжение, подаваемое на схему, до установления номинального напряжения на нагрузке $L2, R18$ $U_{2H} = 110\text{В}$ (по прибору PV2). При необходимости подкорректировать величину напряжения правым переключателем ЛАТР TV2. Снять показания приборов и записать в табл. 3.1.

8. Выключить SA3.

9. Собрать полную схему рис. 3.7. Проверить, что SA4 выключен.

10. **С разрешения преподавателя** включить SA3, переключатель «0 → 100В» перевести в положение «110 → 260В» и переключателями ЛАТР TV2 по прибору PV2 установить напряжение $U_{2H} = 110\text{В}$.

11. Изменяя емкость $C11$, задавая значения, указанные в табл. 3.3, и поддерживая $U_{2H} = 110\text{В}$, снять показания приборов и записать в табл. 3.3.

12. Выключить SA3. Нажать красную кнопку SB2. Органы управления установить в исходное положение.

13. Доложить преподавателю о выполнении измерений. Разобрать схему измерений и сдать рабочее место преподавателю.

14. Провести расчеты параметров схемы и результаты записать в табл. 3.1, 3.4 и табл. 3.5.

15. Рассчитать значение емкости $C11$, при которой в цепи наступит резонанс токов. Полученное значение записать в табл. 3.1 и сравнить с данными опыта.

16. Определить расчетным путем значение емкости конденсатора $C11$ для повышения коэффициента мощности нагрузки до значения $\cos\varphi_{2\text{тр}}$, заданного преподавателем. Полученный результат записать в табл. 3.2. и сравнить с данными табл. 3.4.

17. Построить зависимости $\eta = f(C11)$, $I = f(C11)$, $P = f(C11)$, $\cos\varphi_2 = f(C11)$.

18. Сделать выводы по работе.

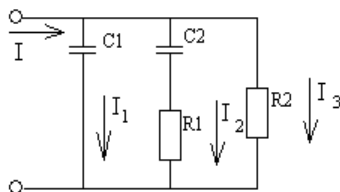
Контрольные вопросы

1. Как и почему изменяется ток в цепи, содержащий индуктивную катушку, если параллельно катушке включить конденсатор?

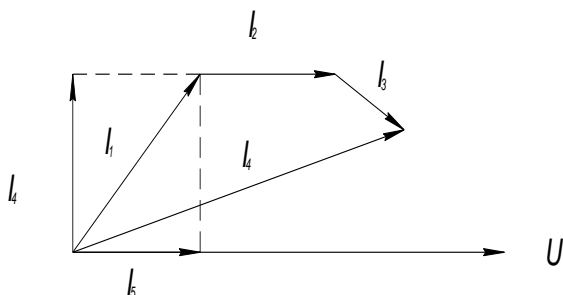
2. Каким должно быть соотношение реактивных проводимостей катушки и конденсатора, чтобы ток в общей цепи опережал напряжение?

3. Каково условие резонанса токов?

4. Начертить векторную диаграмму, соответствующую изображенной схеме:



5. Начертить схему замещения, для которой изображена векторная диаграмма



6. Почему при резонансе токов ток в общей цепи имеет наименьшее значение?

7. Способ повышения коэффициента мощности с помощью конденсаторных батарей и его экономическое значение.

Лабораторная работа №4

ОПРЕДЕЛЕНИЕ ПАРАМЕТРОВ И ИССЛЕДОВАНИЕ РЕЖИМОВ РАБОТЫ ТРЕХФАЗНОЙ ЦЕПИ ПРИ СОЕДИНЕНИИ ПОТРЕБИТЕЛЕЙ ЗВЕЗДОЙ

Цель работы: исследование трехфазной цепи при соединении потребителей звездой; изучение методов расчета трехфазных цепей при соединении потребителей звездой.

Содержание работы

Трёхфазные цепи в современной электроэнергетике получили наибольшее распространение благодаря их преимуществам в отношении экономичности передачи электрической энергии, а также возможностей получения кругового вращающегося магнитного поля и двух эксплуатационных напряжений в одной установке - фазного и линейного.

Основными способами соединений фаз обмоток генераторов, трансформаторов, электродвигателей и других приемников являются соединения звездой и треугольником.

Соединение звездой. При соединении фаз обмоток генераторов или приемников в звезду их концы (X,Y,Z) или начала (A, B, C) соединяют в одну общую точку, которая называется нейтральной точкой (рис.4.1). Провод, соединяющий нейтральные точки генератора O' и приемника O называется нейтральным или нулевым: остальные провода - линейными. Напряжения между линейным проводом каждой фазы генератора или приемника и нулевым проводом, а также токи в фазах, называют фазными: U_ϕ , I_ϕ . Токи в линейных проводах и напряжения между ними называют, соответственно, линейными: I_λ , U_λ .

Нагрузка называется **симметричной**, если сопротивления всех фаз одинаковы по величине и по характеру: $Z_a = Z_b = Z_c$.

Если это условие не выполняется, то нагрузка будет **несимметричной**, при этом она может быть **равномерной**, если одинаковы величины (модули) сопротивления фаз, т.к. $Z_a = Z_b = Z_c$.

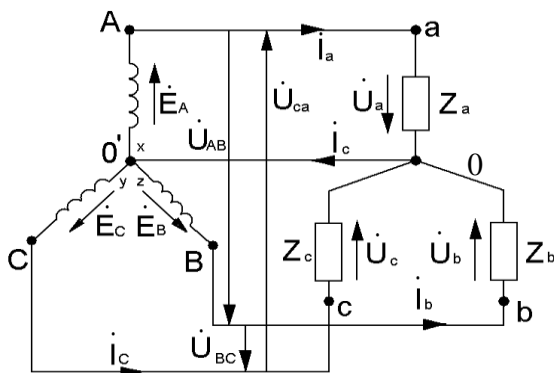


Рис.4.1. Схема соединения звездой

При соединении звездой по фазе течет тот же ток, что и в линейном проводе. Поэтому $I_\lambda = I_\phi$. Линейные напряжения являются векторной разностью соответствующих фазных напряжений:

$$\dot{U}_{AB} = \dot{U}_A - \dot{U}_B; \quad \dot{U}_{BC} = \dot{U}_B - \dot{U}_C; \quad \dot{U}_{CA} = \dot{U}_C - \dot{U}_A \quad (4.1)$$

Векторная диаграмма для рассматриваемого соединения представлена на рис. 4.2. За основу диаграммы взяты три вектора фазных напряжений \dot{U}_A , \dot{U}_B , \dot{U}_C , углы между которыми равны 120° . По отношению к каждому из этих направлений вектор соответствующего фазного тока сдвинут на угол φ , величина которого зависит от характера нагрузки и определяется по формуле: $\varphi = \arctg(\frac{x_\phi}{R_\phi})$ где R_ϕ и x_ϕ - соответственно активное и реактивное сопротивления фазы нагрузки.

Векторы линейных напряжений строятся по уравнениям (4.1). При симметричной нагрузке токи в фазах будут одинаковыми, а длина каждого из векторов линейного напряжения будет в $\sqrt{3}$ раз больше длины вектора фазного напряжения (см. рис.4.2).

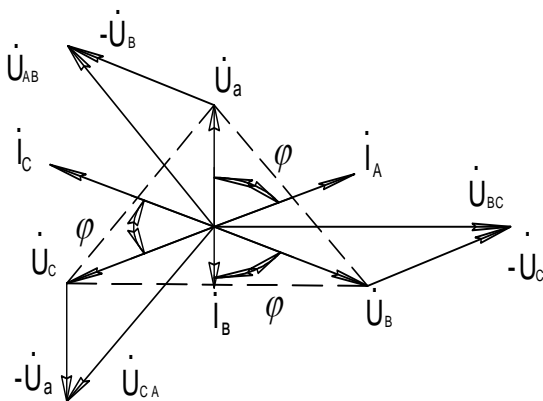


Рис.4.2. Векторная диаграмма напряжений и токов в соединении звездой

При несимметричной нагрузке и наличии нейтрального провода напряжения на каждой фазе приемника $\dot{U}_A, \dot{U}_B, \dot{U}_C$, при изменении нагрузки практически остаются неизменными и равными соответствующим фазным напряжениям генератора $\dot{U}_A, \dot{U}_B, \dot{U}_C$. Это связано с тем, что сопротивление нейтрального провода обычно значительно меньше сопротивления фаз приемника. Следовательно, нейтральный провод обеспечивает симметрию фазных напряжений приемника при несимметричной нагрузке. Поэтому режимы работы каждой фазы нагрузки, находящийся под неизменным фазным напряжением генератора, не будет зависеть от режима работы других фаз. Расчет токов в фазах нагрузки и в нулевом проводе, если пренебречь падением напряжений в нейтральном и линейном проводах, осуществляется на основе следующих соотношений:

$$\dot{I}_a = \frac{\dot{U}_a}{Z_a}; \quad \dot{I}_b = \frac{\dot{U}_b}{Z_b}; \quad \dot{I}_c = \frac{\dot{U}_c}{Z_c}; \quad \dot{I}_0 = \dot{I}_a + \dot{I}_b + \dot{I}_c. \quad (4.2)$$

Если сопротивлением нейтрального провода не пренебрегать, то при $\dot{I}_0 = 0$ напряжения на фазах нагрузки не будут равны соответствующим напряжениям генератора. В этом случае рассчитывается напряжение между нейтральными точками генератора и приемника

$$\dot{U}_{00'} = \frac{\dot{U}_A y_A + \dot{U}_B y_B + \dot{U}_C y_C}{y_A + y_B + y_C + y_0}, \quad (4.3)$$

где $y_A = \frac{1}{Z_a}$; $y_B = \frac{1}{Z_b}$; $y_C = \frac{1}{Z_c}$; $y_0 = \frac{1}{Z_0}$ - комплексные проводимости

фаз нагрузки и нейтрального провода.

Напряжения на фазах нагрузки определяются следующими соотношениями:

$$\dot{U}_a = \dot{U}_A - \dot{U}_{00'}; \quad \dot{U}_b = \dot{U}_B - \dot{U}_{00'}; \quad \dot{U}_c = \dot{U}_C - \dot{U}_{00'}$$

При симметричной нагрузке ток в нейтральном проводе отсутствует

$$\dot{I}_0 = \dot{I}_A + \dot{I}_B + \dot{I}_C = 0$$

и отпадает необходимость иметь этот провод.

Порядок выполнения работы

1. Убедиться, что все выключатели стенда выключены (находятся в нижнем положении).
 2. Собрать схему рис.4.3. Закоротить перемычками элементы *R38*, *C11*, *L2* и *R18*.
 3. Изучить работу схемы, назначение органов управления и приборов.
 4. Определить цену деления приборов, задействованных в опыте.
- Кнопки переключения пределов измерений приборов при выполнении этой работы не нажимать.**
5. Должить преподавателю о готовности к выполнению работы.
 6. С разрешения преподавателя подать напряжение на стенд (нажать черную кнопку SB1).

Исследование симметричной нагрузки с нейтральным проводом

Нагрузка называется **симметричной**, если сопротивление всех фаз одинаковы по величине и характеру, т.е. $Z_A = Z_B = Z_C$.

Нагрузка называется **равномерной**, если одинаковы величины (модули) сопротивления фаз, т.е. $Z_A = Z_B = Z_C$

7. Подать напряжение на исследуемую схему (включить SA15 и SA14). **Быстро** снять показания приборов и записать их в таблицу 4.1. Выключить SA14 и SA15.
8. Снять перемычку в линейном проводе фазы А, имитируя обрыв фазы.

Таблица 4.1

[illegible]

При симметричной нагрузке $R_{37}=R_{39}=R_{40}$, $I_A=I_B=I_C$, $R_{37}=U_C/I_C$.
 Мощность, потребляемая симметричной нагрузкой: $P=3 \cdot I_C^2 \cdot R_{37}$.

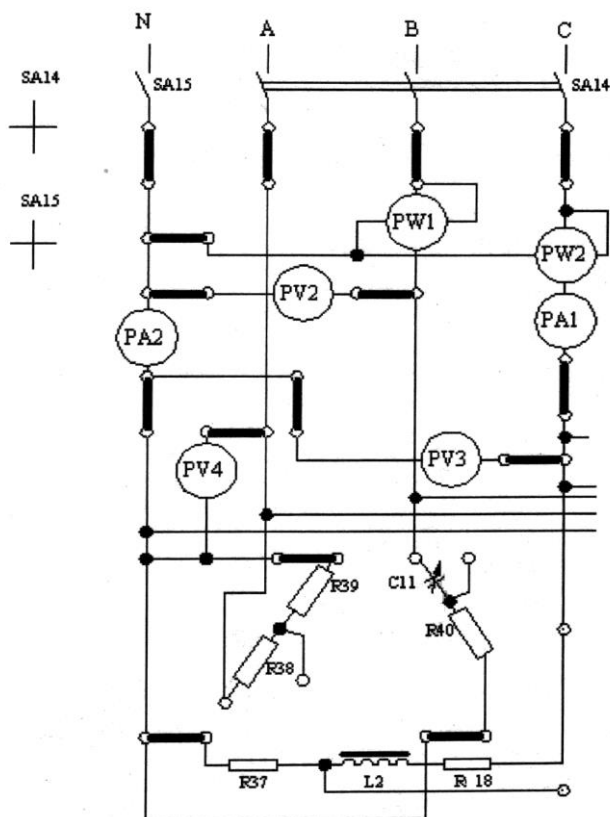


Рис. 4.3

9. Включить SA15 и SA14. Снять показания PA2, PA1 и записать их в табл. 4.1(обрыв фазы). Убедиться, что показания других приборов, кроме PV4, не изменились, а ток в нейтральном проводе (показание PA2) стал равен току фазы (показание PA1). Выключить SA14 и SA15,поставить снятую перемычку в провод фазы A.

Исследование равномерной нагрузки без нейтрального провода

10. Снять перемычки с элементов $R38$, $C11$, $L2$ и $R18$.
11. Отключить нейтральный провод (снять верхнюю перемычку в проводе N). **Тумблер SA15 не включать!** Общую точку ваттметров PW1 и PW2 отсоединить от нейтрального провода и подключить к фазе «А». Тумблерами набрать емкость $C11=16\text{мкФ}$.
12. Включить тумблер SA14. **Быстро** снять показания приборов и записать их в таблицу 4.2.
13. Выключить SA14.

Таблица 4.2

Экспериментальные данные					Расчетные значения			
U_A , В	U_B , В	U_C , В	P , Вт	I_c , А	P , Вт	I_a , А	I_b , А	I_c , А
PV4	PV2	PV3		PA1				

РАСЧЕТНАЯ ФОРМУЛА

$$P = I_a^2(R38+R39) + I_b^2R40 + I_c^2(R37+R18+R_{L2})$$

Исследование равномерной нагрузки с нейтральным проводом

14. Отсоединить общую точку ваттметров от фазы «А» и присоединить ее к нейтральному проводу N.
15. Поставить снятую ранее перемычку в нейтральный провод N. Проверить, что включено $C11=16\text{мкФ}$.
16. Включить SA14 и SA15.
17. **Быстро** снять показания приборов и записать их в таблицу 4.3.

Равномерная нагрузка с нейтральным проводом

Таблица 4.3

Экспериментальные данные						Расчетные значения		
U_a , В	U_b , В	U_c , В	P_{B+C} , Вт	I_c , А	I_N , А	I_a , А	I_b , А	P , Вт
PV4	PV2	PV3	PW1 + PW2	PA1	PA2			

РАСЧЕТНЫЕ ФОРМУЛЫ

$$\dot{I}_A = \dot{U}_a / Z_a; \quad \dot{I}_B = \dot{U}_b / Z_b; \quad \dot{I}_c = \dot{U}_c / Z_c;$$

$$P = I_a^2 \cdot (R_{38} + R_{39}) + I_b^2 R_{40} + I_c^2 \cdot (R_{37} + R_{18} + R_{L2})$$

Проверка: $P = P_a + P_{b+c} = I_a^2 (R_{38} + R_{39}) + P_{b+c}$.

17. Выключить SA14 и SA15. Снять напряжение со стенда (нажать красную кнопку SB2).

18. Доложить преподавателю о выполнении работы. Разобрать схему и сдать рабочее место преподавателю.

19. Произвести необходимые расчеты и их результаты записать в соответствующие таблицы:

– рассчитать сопротивления и проводимости фаз равномерной нагрузки (табл. 4.4 и 4.5);

– рассчитать значение емкости C_{II} для обеспечения равномерной нагрузки (табл. 4.4);

– рассчитать напряжение смещения нейтрали \dot{U}_{nN} , (табл. 4.5) токи в фазах А, В, С, (табл. 4.6) а также активную мощность, потребляемую из сети (табл. 4.1, 4.3)

– Рассчитать ток в нейтральном проводе I_N (табл. 4.7).

20. Сравнить расчетные данные с экспериментальными.

21. Сделать выводы по работе.

Определение параметров для равномерной нагрузки

Таблица 4.4

$R_{18} + R_{L2}$, Ом	X_{L2} , Ом	R_{38} , Ом	$R_{37} = R_{39} = R_{40}$, Ом	C_{II} , мкФ	X_{C11} , Ом	Z_a , Ом	Z_b , Ом	Z_c , Ом

Устанавливаем $C_{II} = 16 \text{ мкФ}$

РАСЧЕТНЫЕ ФОРМУЛЫ

$$Z_a = R_{38} + R_{39} \quad Z_b = \sqrt{(R_{40})^2 + X_{C11}^2};$$

$$Z_c = \sqrt{(R_{37} + R_{18} + R_{L2})^2 + X_{L2}^2}; \quad R_{38} = Z_c - R_{39}.$$

Приняв $Z_b = Z_c$, определяем значение C_{II} для получения равномерной нагрузки $R_{40} + X_{C11}^2 = (R_{37} + R_{18} + R_{L2})^2 + X_{L2}^2$;

$$X_{C11} = \sqrt{(R_{37} + R_{18} + R_{L2})^2 + X_{L2}^2 - R_{40}^2};$$

$$C11 = \frac{1}{2\pi f X_{C11}}.$$

Значения $R_{18}+R_{L2}$, X_{L2} берут из лабораторной работы №3. Если лабораторная работа №3 не выполнялась, то эти данные берут для конкретного рабочего места из «Таблицы величин сопротивлений стенов лаборатории М218» (см. Приложение 2).

Расчет \dot{U}_{nN} в опыте равномерной нагрузки без нейтрального провода

Таблица 4.5

	$\underline{Y}_a, \text{Cm}$	$\underline{Y}_b, \text{Cm}$	$\underline{Y}_c, \text{Cm}$	$\dot{U}_A \underline{Y}_a$	$\dot{U}_B \underline{Y}_b$	$\dot{U}_C \underline{Y}_c$	$\dot{U}_A \underline{Y}_a + \dot{U}_B \underline{Y}_b + \dot{U}_C \underline{Y}_c$	$\underline{Y}_a + \underline{Y}_b + \underline{Y}_c$	\dot{U}_{nN}
модуль									
$\varphi, ^\circ$									
I									
J									

РАСЧЕТНЫЕ ФОРМУЛЫ

$$\dot{U}_{nN} = (\dot{U}_A \underline{Y}_a + \dot{U}_B \underline{Y}_b + \dot{U}_C \underline{Y}_c) / (\underline{Y}_a + \underline{Y}_b + \underline{Y}_c);$$

$$\underline{Y}_a = 1/\underline{Z}_a; \underline{Y}_b = 1/\underline{Z}_b; \underline{Y}_c = 1/\underline{Z}_c.$$

Расчет токов в фазах в опыте равномерной нагрузки без нейтрального провода

Таблица 4.6

	\dot{U}_{nN}	$\dot{U}_{A, B}$	$\dot{U}_A - \dot{U}_{nN}, B$	$Y_{a, Cм}$	\dot{I}_A, A	\dot{U}_B, B	$\dot{U}_B - \dot{U}_{nN}, B$	$Y_{b, Cм}$	\dot{I}_B, A	\dot{U}_C, B	$\dot{U}_C - \dot{U}_{nN}, B$	$Y_{c, Cм}$	\dot{I}_c, A
Модуль													
$\varphi, ^\circ$													
1													
j													

РАСЧЕТНЫЕ ФОРМУЛЫ

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

$$\dot{I}_A = \frac{\dot{U}_a}{Z_a}; \quad \dot{I}_B = \frac{\dot{U}_b}{Z_b}; \quad \dot{I}_C = \frac{\dot{U}_c}{Z_c}$$

Расчет тока в опыте равномерной нагрузки с нейтральным проводом

Таблица. 4.7

	\dot{I}_a, A	\dot{I}_b, A	\dot{I}_c, A	\dot{I}_N, A	I_N, A
модуль					
$\varphi, ^\circ$					
1					
j					

РАСЧЕТНАЯ ФОРМУЛА

$$\dot{I}_N = \dot{I}_a + \dot{I}_b + \dot{I}_c$$

Содержание отчета

Отчет должен содержать: название, цель работы; схема (рис 4.3.); расчетные формулы, таблицы 4.1-4.7; выводы.

Контрольные вопросы

1. Почему наибольшее распространение в электроэнергетике получили трехфазные цепи?
2. Объясните способ соединения звездой.
3. Какая нагрузка называется симметричной, равномерной и несимметричной?
4. Какие напряжения и соответственно токи называются линейными и фазными? Соотношение этих токов при соединении звездой.
5. Объяснить построение векторных диаграмм при соединении звездой.
6. В каком случае применяется соединение звездой с нулевым проводом и без него?

Лабораторная работа №5 ОПРЕДЕЛЕНИЕ ПАРАМЕТРОВ И ИССЛЕДОВАНИЕ РЕЖИМОВ РАБОТЫ ТРЕХФАЗНОЙ ЦЕПИ ПРИ СОЕДИНЕНИИ ПОТРЕБИТЕЛЕЙ В ТРЕУГОЛЬНИК

Цель работы: исследование трехфазной цепи и изучение методов расчета трехфазных цепей при соединении потребителей в треугольник.

Содержание работы

Фазные обмотки генератора или приемника соединяются в треугольник рис. (5.1), чтобы конец первой фазной обмотки X соединился с началом второй фазной обмотки, а конец Y второй обмотки с началом третьей обмотки C и конец Z ее с началом A первой обмотки.

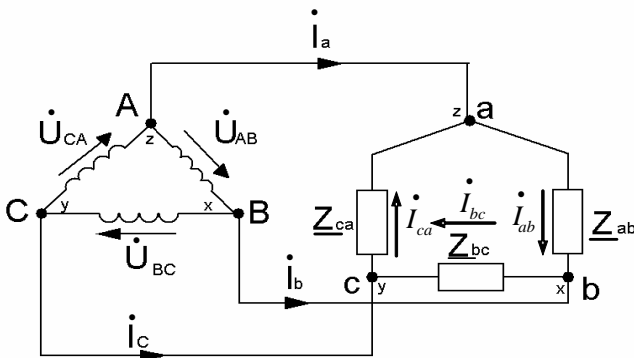


Рис.5.1. Схема соединения треугольником

Из схемы рис.5.1. видно, что независимо от характера нагрузки напряжение на каждой фазе приемника равно линейному $U_\phi = U_L$. Если напряжения и сопротивления фаз нагрузки заданы, то фазные токи определяются по формулам

$$\dot{I}_{ab} = \frac{\dot{U}_{ab}}{Z_{ab}}; \dot{I}_{bc} = \frac{\dot{U}_{bc}}{Z_{bc}}; \dot{I}_{ca} = \frac{\dot{U}_{ca}}{Z_{ca}}.$$

Линейные токи определяются по фазным токам из уравнений, составленных по первому закону Кирхгофа для узлов a, b, c:

$$\dot{I}_a = \dot{I}_{ab} - \dot{I}_{ca}; \dot{I}_b = \dot{I}_{bc} - \dot{I}_{ab}; \dot{I}_c = \dot{I}_{ca} - \dot{I}_{bc}. \quad (5.1)$$

Независимо от характера нагрузки $\dot{I}_a = \dot{I}_b = \dot{I}_c = 0$.

Пример векторной диаграммы при соединении приемников треугольником дан на рис.5.2.

При построении векторной диаграммы в качестве исходных берутся три вектора линейных напряжений $\dot{U}_{ab}, \dot{U}_{bc}, \dot{U}_{ca}$, которые являются вместе с тем и фазными напряжениями. Углы между ними равны 120° . Затем откладываются векторы фазных токов $\dot{I}_{ab}, \dot{I}_{bc}, \dot{I}_{ca}$.

Векторы линейных токов, строятся по уравнениям (5.1).

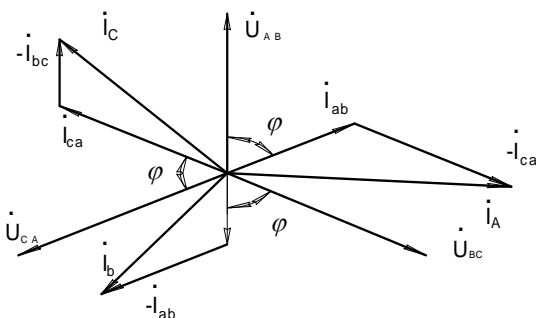


Рис.5.2. Векторная диаграмма напряжений, токов при соединении треугольником

Если нагрузка симметрична, то соотношение между линейными и фазными токами аналогично соотношению между линейными и фазными напряжениями при соединении звездой: $I_L = \sqrt{3}I_\phi$. Для рассматриваемого соединения при изменении сопротивления одной из фаз будет изменяться только ток данной фазы и линейные токи в проводниках, соединенных с данной фазой. Режим работы других фаз остается неизменным, так как линейные напряжения генератора постоянны. Поэтому схема соединения в треугольник широко используется для включения несимметричной нагрузки, в частности, в осветительных установках.

Измерение мощности в трехфазной цепи

В симметричной трехфазной цепи потребляемые каждой фазой мощности P_ϕ , равны между собой, и в этом случае общая мощность $P=3P_\phi$, а для каждой из фаз справедливо общее выражение мощности в цепи переменного тока: $P_\phi = U_\phi I_\phi \cos \varphi$, где φ - угол сдвига между фазными напряжениями и током.

При соединении звездой $U_\phi = \frac{U_L}{\sqrt{3}}$; $I_\phi = I_L$, а при соединении треугольником $I_\phi = \frac{I_L}{\sqrt{3}}$; $U_\phi = U_L$. В общих случаях, заменяя фазные величины через линейные, мы получим одно и тоже выражение для мощности симметричной трехфазной цепи:

$$P = 3U_\phi I_\phi \cos \varphi = \sqrt{3}U_L I_L \cos \varphi.$$

При симметричной нагрузке измеряют мощность P_{ϕ} , $P=3P_{\phi}$. При этом токовую обмотку ваттметра включают последовательно с одной из фаз нагрузки, обмотку напряжения - между началом и концом этой же фазы.

В случае несимметричной нагрузки измерение мощности в трехфазных трехпроводных цепях (при соединении приемников треугольником или звездой без нулевого провода) в большинстве случаев производится по способу двух ваттметров рис.5.3. Общая мощность в этом случае равна алгебраической сумме показаний двух ваттметров.

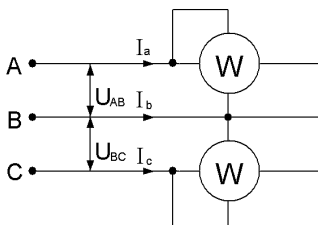


Рис.5.3. Схема для измерения мощности при несимметричной нагрузке в трехпроводной цепи трехфазного тока

Для измерения мощности в трехфазных четырехпроводных системах простейшим является способ трех ваттметров рис.5.4.

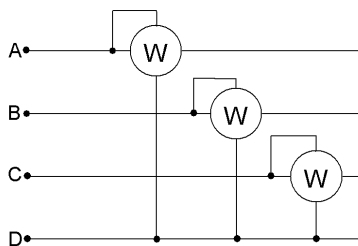


Рис.5.4. Схема для измерения мощности в четырехпроводной цепи трехфазного тока

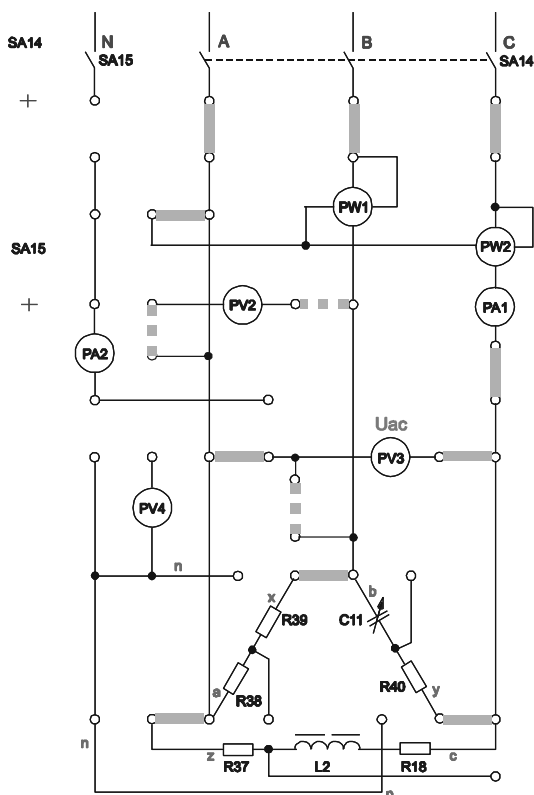


Рис. 5.5. Схема лабораторного стенда

Порядок выполнения работы

По данным лабораторной работы № 4 заполнить исходные данные в таблицу 5.1. Если лабораторная работа №4 не выполнялась, исходные данные конкретно для данного рабочего места взять из «Таблицы величин сопротивлений стендов лаборатории М218» (см. Приложение 2).

Таблица 5.1

Исходные данные							
$R_{37},$ Ом	$R_{38},$ Ом	$R_{39},$ Ом	$R_{40},$ Ом	$C_{11},$ Ом	$X_{C11},$ Ом	$R_{L2}+R_{18},$ Ом	$X_{L2},$ Ом

1. Убедиться, что все выключатели стенда выключены (находятся в нижнем положении)

2. Собрать схему рис. 5.5. **Вольтметр PV2 не подключать, подключить только PV3** (показано сплошными линиями).

ВНИМАНИЕ!

1. Категорически запрещается подключать два вольтметра одновременно!

2. Кнопки переключения пределов измерений приборов при выполнении этой работы не нажимать!

Вместо перемычки в линейный провод фазы «А» включить выносной амперметр электромагнитной системы с пределом измерения 2А или 3А. Установить равномерную нагрузку во всех фазах, для чего переключателями набрать значение ёмкости C_{11} , рассчитанное в лабораторной работе №4 ($C_{11}=16\text{мкФ}$).

3. Изучить схему, порядок её включения. Определить цену деления приборов.

4. Доложить преподавателю о готовности к выполнению работы.

5. С разрешения преподавателя подать напряжение на стенд (нажать черную кнопку SB1).

6. Подать напряжение на исследуемую схему (включить SA14).

7. **Быстро** снять показания приборов и записать в таблицу 5.3.

8. Выключить SA14

9. Отсоединить выносной амперметр от линейного провода фазы «А», на его место поставить перемычку, а амперметр подсоединить вместо перемычки в линейный провод фазы «В». Вольтметр PV3 отсоединить от фазы «А» и подключить между линейными проводами фаз «В» и «С».

Таблица 5.2

Исходные данные								
$R_{ab},$ Ом	$R_{bc},$ Ом	$R_{ca},$ Ом	$Z_{ab},$ Ом	$Z_{bc},$ Ом	$Z_{ca},$ Ом	$\varphi_{ab},$ град	$\varphi_{bc},$ град	$\varphi_{ca},$ град

РАСЧЕТНЫЕ ФОРМУЛЫ

$$R_{ab} = R_{38} + R_{39};$$

$$R_{bc} = R_{40};$$

$$R_{ca} = R_{37} + R_{18} + R_{L2}; \quad \varphi = \arctg \frac{X}{R}; \quad \underline{Z}_{ab} = R_{ab};$$

$$\underline{Z}_{bc} = R_{bc} - j \frac{1}{\omega C_{11}}; \quad \underline{Z}_{ca} = R_{ca} + jX_{L2}.$$

Расчёт фазных токов

Таблица 5.3

[illegible]

Таблица 5.4

\dot{I}_{ab}				\dot{I}_{bc}				\dot{I}_{ca}			
l	j	I _{ab} , A	φ° _{ab}	l	j	I _{bc} , A	φ° _{bc}	l	j	I _{ca} , A	φ° _{ca}

РАСЧЕТНЫЕ ФОРМУЛЫ

$$\dot{U}_{ab} = U_{ab} \cdot e^{j30^\circ}; \dot{U}_{bc} = U_{bc} \cdot e^{-j90^\circ}; \dot{U}_{ca} = U_{ca} \cdot e^{j150^\circ};$$

$$\dot{i}_{ab} = \frac{\dot{U}_{ab}}{Z_{ab}}; \quad \dot{i}_{bc} = \frac{\dot{U}_{bc}}{Z_{bc}}; \quad \dot{i}_{ca} = \frac{\dot{U}_{ca}}{Z_{ca}};$$

$$P = I_{ab}^2 R_{ab} + I_{bc}^2 R_{40} + I_{ca}^2 (R_{37} + R_{18} + R_{L2})$$

Расчет линейных токов

Таблица 5.5

\dot{I}_A				\dot{I}_B				\dot{I}_C			
1	j	I _A , A	φ° _A	1	j	I _B , A	φ° _B	1	j	I _C , A	φ° _C

РАСЧЕТНЫЕ ФОРМУЛЫ

$$\dot{I}_A = \dot{I}_{ab} - \dot{I}_{ca} ;$$

$$\dot{I}_B = \dot{I}_{bc} - \dot{I}_{ab} ;$$

$$\dot{I}_C = \dot{I}_{ca} - \dot{I}_{bc} .$$

10. Включить SA14, **быстро** снять показания приборов и записать их в таблицу 5.3.

11. Выключить SA14. От линейного провода фазы «В» отсоединить амперметр и на его место поставить перемычку. Отсоединить PV3. Подсоединить PV2 между линейными проводами фаз «А» и «В», согласно рис.5.5.

12. Включить SA14, **быстро** снять показания приборов и записать их в таблицу 5.3.

13. Выключить SA14.

14. Выключить питание стенда (нажать красную кнопку SB2).

15. Доложить преподавателю о выполнении работы.

16. Разобрать схему, сдать рабочее место преподавателю.

17. Рассчитать комплексные значения сопротивлений фаз, фазных и линейных токов, а также активную мощность, потребляемую схемой.

Результаты вычислений записать в таблицы 5.2, 5.3, 5.4, и 5.5.

18. Построить векторную диаграмму.

19. Сделать выводы по работе.

Контрольные вопросы

1. Почему наибольшее распространение в электроэнергетике получили трехфазные цепи?

2. Объясните способы соединения треугольником.

3. Какая нагрузка называется симметричной, равномерной и неравномерной?

4. Какие напряжения и соответственно токи называются линейными и фазными? Их соотношение при соединении треугольником.

5. Объяснить построение векторных диаграмм при соединении треугольником.

6. В каком случае применяется соединение звездой с нулевым проводом и без него?

Таблица ЭДС, устанавливаемых переключателем SA7

Положение SA12	Рабочее место №1	Рабочее место №2	Рабочее место №3	Рабочее место №4	Рабочее место №5	Рабочее место №6
0	0,68	0,69	0,7	0,67	0,64	0,71
1	0,76	0,79	0,81	0,79	0,77	0,92
2	1,64	1,72	1,68	1,7	1,68	1,9
3	2,63	2,75	2,66	2,69	2,7	2,96
4	3,64	3,78	3,64	3,68	3,68	4
5	4,65	4,79	4,6	4,69	4,7	5,4
6	5,66	5,82	5,6	5,7	5,7	6,2
7	6,68	6,84	6,6	6,7	6,73	7,24
8	7,7	7,85	7,6	7,74	7,74	8,34
9	8,7	8,86	8,58	8,73	8,73	9,42
10	9,67	9,98	9,55	9,75	9,73	10,47

Приложение 2

Таблица величин сопротивлений стенов лаборатории (M218)

Номер рабочего места	R17, Ом	R19, Ом	R24, Ом	R37, Ом	R38, Ом	R39, Ом	R40, Ом
1	50,8	1,11	8,35	91,6	90	93,5	92,3
2	50,9	1,11	8,25	100,7	101,3	102,6	101,5
3	51,3	1,1	8,19	98	96,7	101,9	101,3
4	50,2	1,23	8,1	96,3	102,1	97,9	101
5	49,7	1,14	8,45	93,6	102,8	95	101,5
6	48,7	1,1	8,14	102,6	102,8	100,7	101,7
Номер рабочего места	$R_{L1}+R17$, Ом	X_{L2} , Ом	$R_{L2}+R18$, Ом	X_{L2} , Ом	R44, Ом	R45, Ом	
1	62,5	74,83	69,87	166,24	113,1	79	
2	76,56	66,26	59,51	143,04	161,3	72,3	
3	62,5	81,24	71	153,62	79,5	72,5	
4	54,69	83,72	65,92	158,71	46,2	31,6	
5	65,625	75,45	75,74	151,33	33,3	33,4	
6	56,25	85,68	66,83	149,96	46,8	38,9	

Параметры схемы замещения катушки индуктивности L1

Номер рабочего места								
	S, BA	Z _{1Σ} , Ом	R _{1Σ} , Ом	R _{L1} , Ом	XL1, Ом	L1, Гн	cosφ	C11рез, мкФ
1	62,4	97,5	62,5	11,7	74,83	0,2383	0,641	42,56
2	64,8	101,25	76,56	25,66	66,25	0,211	0,756	48,06
3	65,6	102,5	62,5	11,2	81,24	0,2587	0,6098	39,2
4	64	100	54,69	4,49	83,72	0,2666	0,547	38,04
5	64	100	65,625	12,925	75,45	0,2403	0,656	42,2
6	65,6	102,5	56,25	7,55	85,68	0,2729	0,549	37,17

Параметры схемы замещения катушки индуктивности L2

Номер рабочего места								
	S, BA	Z _{2Σ} , Ом	X _{L2} , Ом	L2, Гн	R _{2Σ} , Ом	R _{L2} , Ом	cosφ _{2H}	C11рез, мкФ
1	67,1	180,33	166,24	0,529	69,87	19,87	0,387	16,28
2	78,1	154,93	143,01	0,456	59,51	9,51	0,384	18,98
3	71,5	169,23	153,62	0,489	71	21	0,42	17,1
4	70,4	171,86	158,71	0,505	65,92	15,92	0,383	17,1
5	71,5	169,23	151,33	0,482	75,74	25,74	0,448	16,83
6	73,7	164,18	149,96	0,478	66,83	16,83	0,407	17,72

Содержание

Лабораторная работа №1 «Исследование режимов работы и методов расчета линейных цепей постоянного тока с одним источником питания»	3
Лабораторная работа №2 «Определение параметров и исследование режимов работы электрической цепи переменного тока с последовательным соединением катушки индуктивности, резистора и конденсатора. Резонанс напряжений».....	15
Лабораторная работа №3 «Исследование режимов работы линии электропередачи переменного тока при изменении коэффициента мощности нагрузки. Резонанс токов».....	30
Лабораторная работа №4 «Определение параметров и исследование режимов работы трехфазной цепи при соединении потребителей звездой».....	41
Лабораторная работа №5 «Определение параметров и исследование режимов работы трехфазной цепи при соединении потребителей в треугольник».....	51
Приложение.....	61
Содержание.....	64

Учебное издание

ЭЛЕКТРОТЕХНИКА И ЭЛЕКТРОНИКА

Методические указания к выполнению лабораторных работ для бакалавров направления 220400.62 – Управление и информатика в технических системах, 220700.62 – Автоматизация технологических процессов и производств, 221000.62 – Мехатроника и робототехника, 221700.62 – Метрология, стандартизация и сертификация, 230100.62 – Автоматизированные системы обработки информации и управления, 280700.62 – Радиационная и электромагнитная безопасность

Составители:

Солдатенков Алексей Сергеевич

Паращук Ольга Владимировна

Подписано в печать Формат 60x84/16. Усл. печ. л. Уч. – изд.л.

Тираж экз. Заказ Цена

Отпечатано в Белгородском государственном технологическом университете
им. В.Г. Шухова
308012, г. Белгород, ул. Костюкова, 46