

МИНИСТЕРСТВО ОБРАЗОВАНИЯ РЕСПУБЛИКИ БЕЛАРУСЬ
УЧРЕЖДЕНИЕ ОБРАЗОВАНИЯ
«БРЕСТСКИЙ ГОСУДАРСТВЕННЫЙ ТЕХНИЧЕСКИЙ УНИВЕРСИТЕТ»

КАФЕДРА АВТОМАТИЗАЦИИ ТЕХНОЛОГИЧЕСКИХ ПРОЦЕССОВ И
ПРОИЗВОДСТВ

МЕТОДИЧЕСКИЕ УКАЗАНИЯ

по выполнению лабораторных работ по курсам:
«Электрические сети», «Инженерные сети»,
«Электротехника и основы электроники»,
«Электротехника, электрические машины и
аппараты» для студентов специальностей
70 02 01, 70 04 03, 74 05 01, 70 01 01, 36 01 01

Часть I

Электрические цепи

У 621.3(07)
М54

Методические указания по выполнению лабораторных работ по дисциплинам: «Электрические сети», «Инженерные сети», «Электротехника и основы электроники», «Электротехника, электрические машины и аппараты» для студентов специальностей 70 02 01, 70 04 03, 74 05 01, 70 01 01, 36 01 01

Содержит описание лабораторных стендов по цепям переменного тока, порядок выполнения работ, сборки схем и контрольные вопросы для самоподготовки.

Составители: А.В. Клопоцкий, доцент;
Г.Н. Овсянников, доцент;
И.М. Панасюк, ст. преподаватель

Содержание

	стр.
Общие указания по выполнению и оформлению лабораторных работ	4
Работа N 1.0 Электрические приборы и измерения	5
Работа N 1.1 Исследования энергетических параметров цепи переменного тока	19
Работа N 1.2 Исследование неразветвленной цепи переменного тока. Резонанс напряжений	24
Работа N 1.3 Исследование разветвленной цепи переменного тока. Резонанс токов	27
Работа N 1.4 Проверка однофазного счетчика электрической энергии	30
Работа N 1.5 Исследование трехфазной цепи при соединении потребителей по схеме "звезда"	33
Работа N 1.6 Исследование трехфазной цепи при соединении потребителей по схеме "треугольник"	38
Работа N 1.7 Измерение активной мощности в цепи трехфазного тока	41
Рекомендованная литература	43

**ОБЩИЕ УКАЗАНИЯ
ПО ВЫПОЛНЕНИЮ И ОФОРМЛЕНИЮ ЛАБОРАТОРНЫХ РАБОТ.**

1. Подготовиться к предстоящей работе по контрольным вопросам и составить отчет по работе, в котором должны быть указаны:

- номер работы, название и ее цель;
- порядок выполнения;
- принципиальная электрическая схема, которая должна быть выполнена аккуратно, обязательно под линейку и в строгом соответствии с условными обозначениями электротехнических элементов ГОСТ 2.201 - 2.275-68 ;
- таблицы результатов расчета и эксперимента;
- векторные диаграммы в принятых масштабах и графики (после выполнения работы);
- выводы по работе.

ПРИМЕЧАНИЕ С методикой построения векторных диаграмм разобраться самостоятельно до выполнения первой работы! [1,2,3].

Отчет оформить индивидуально каждому студенту.

2. Перед началом работы убедиться в том, что стол свободен от посторонних предметов (пакеты, книги и т.д.), все проводники исправны (проконтролировать визуально) и стенд отключен от сети !?!

3. Ознакомиться со стендом, оборудованием, используемом в работе и измерительными приборами. Определить цены делений для многопредельных приборов.

4. Собрать электрическую схему в следующем порядке. Цепь собирать последовательно от условного плюса источника до условного минуса. Во вторую очередь подключаются параллельные ветви и в последнюю очередь вольтметры и обмотки напряжения сложных приборов.

ПРИМЕЧАНИЕ: Цепь необходимо собирать вдвоем. Один подключает проводники, другой помогает и контролирует действия первого.

5. Представить собранную схему для проверки инженеру лаборатории. При всех изменениях в электрической схеме, в процессе выполнения работы, обязательно предъявить ее для проверки повторно.

6. Произвести необходимые измерения и результаты занести в таблицу.

ПРИМЕЧАНИЕ: При перерывах в работе стенд обязательно отключать от сети.

7. Результаты измерений предъявить преподавателю для контроля.

8. Обесточить стенд (в первую очередь!!) только затем разобрать схему, сложить проводники.

9. Произвести необходимые расчеты и построение векторных диаграмм и графиков.

10. Защитить работу.

11. Привести в порядок рабочее место!

Цель работы: Изучение измерительных приборов, их маркировки, условий использования, методов измерения.

1. ВВЕДЕНИЕ.

Для определения (задания) режимов работы потребителей электрической энергии необходимо измерять множество параметров электрической цепи: напряжение, ток, сопротивление, сдвиг по фазе и другие. Для этих измерений используются различные приборы: простые (амперметр, вольтметр), сложные (ваттметр, фазометр), стрелочный, цифровые (амперметр, вольтметр), аналоговые (осциллограф), комбинированные (авометр, тестер) и т.д.

Для правильного включения и использования измерительных приборов необходимо знать устройство, принцип действия, назначение прибора, диапазоны и единицы измерения, класс точности и иную информацию, а также методы измерения, например, прямые и косвенные измерения, измерения с использованием дополнительных технических средств измерения (измерительные трансформаторы, шунты, дополнительные резисторы и т.д.).

1.2. Классификация измерительных приборов.

Электроизмерительные приборы можно классифицировать по ряду признаков: принцип действия; род измеряемой величины; род тока; точности и т.д. Существование различных классификаций объясняется большим количеством приборов, к которым предъявляются самые различные требования и которые работают в разнообразных условиях.

По принципу действия различают следующие системы приборов: магнито-электрическая, электромагнитная, электродинамическая, индукционная, тепловая, электростатическая, ферромагнитная и другие.

По роду измеряемой величины приборы делятся на: амперметры - приборы для измерения тока; вольтметры - приборы для измерения напряжения; омметры и мегомметры - приборы для измерения сопротивления; ваттметры - приборы для измерения мощности; фазометры - приборы для измерения коэффициента мощности и другие.

По роду тока приборы делятся на: используемые в цепях постоянного тока; в цепях переменного тока; а также приборы, используемые в цепях как постоянного, так и переменного токов.

1.3. Маркировка измерительных приборов.

Маркировка - это условные обозначения, размещаемые на шкале прибора и позволяющие правильно использовать данный прибор.

а) Единица измерения: Например: А - ампер, μV — микровольт, mW - милливольт, k Ω - килоом и другие.

ПРИМЕЧАНИЕ: 1. Не все измерительные приборы имеют единую единицу (дену) измерения. Например, авометры, другие многопредельные приборы непосредственной оценки. Поэтому в таких приборах единица измерения не указывается и цена деления определяется для каждого диапазона

отдельно $C = \frac{D}{n}$, где D - диапазон шкалы; n - число делений

шкалы

2. Для сложных многопредельных приборов (ваттметров) цена деления определяется в виде $C = \frac{I_N U_N}{n}$, где I_N, U_N - номинальные значения тока

и напряжения для данного прибора.

б) Название прибора: (амперметр, вольтметр и т.д.) дается для многопредельных или цифровых приборов.

в) Принцип действия прибора или системы, на основе которой выполнен данный прибор.

Измерительные системы имеют условные обозначения:

 или  - магнитоэлектрическая система,

 или  - электромагнитная система,

 или  - электродинамическая система,

 или  - ферродинамическая система,

 или  - индукционная система,

 - тепловая система,

 - электростатическая система,

 - вибрационная система.

г) Род тока в цепи:

— -- постоянный ток,

~ -- однофазный переменный ток,

∩ -- постоянный и однофазный переменный ток,

≡ -- трехфазный переменный ток,



-- трехфазный переменный ток при несимметричной нагрузке.

д) Класс точности. В соответствии с ГОСТом 1845-59 приборы делятся на следующие классы точности: 0.05; 0.1; 0.2; 0.5; 1.0; 1.5; 2.5; 4.0.

ПРИМЕЧАНИЕ: Классы точности ваттметров активной мощности определяются ГОСТом 6570-60: 1.0; 2.0; 2.5, а реактивной мощности – 2.0; 3.0.

е) Класс точности при нормировании погрешности в % от длины шкалы обозначается, к примеру, так 1, 5.

ж) Рабочее положение прибора:

или - вертикальное,

или - горизонтальное,

- под углом к горизонту.

з) Испытательное напряжение электрической прочности изоляции:

- изоляция испытана на пробой напряжением 2 кВ относительно корпуса,

- прочность изоляции проверена при напряжении 500В,

- испытание на электрическую прочность изоляции не подлежит,

- прочность изоляции не соответствует норме.

и) Степень защищенности от влияния внешних магнитных и электрических полей.

По степени защищенности приборы делятся на две категории - I и II.

- прибор защищен от влияния внешних магнитных полей I категории,

- прибор защищен от влияния внешних электрических полей по II категории,

- прибор электростатической системы I категории защищенности от электрических полей.

к) - смотри дополнительные указания в техническом паспорте прибора.

л) Использование дополнительных технических средств измерения:

ТТ - прибор содержит встроенный измерительный трансформатор тока,

ТН - прибор содержит встроенный измерительный трансформатор напряжения,

R_ш - прибор содержит встроенный шунт,

R_г - прибор содержит дополнительный резистор.

м) Условия эксплуатации делят приборы на следующие группы:

A - приборы работающие при $t = +10 \div +35^{\circ}\text{C}$ и относительной влажности $\beta = 80\%$ при $t = 30^{\circ}\text{C}$;

B - приборы работающие при $t = -30 \div +40^{\circ}\text{C}$;

B₁ - приборы работающие при $t = -40 \div +50^{\circ}\text{C}$ $\beta = 95\%$ при $t = 35^{\circ}\text{C}$;

B_2 - $t = -50 \div +60^\circ\text{C}$ и $\beta = 96\%$;

B_3 - $t = -50 \div +80^\circ\text{C}$ и $\beta = 98\%$ при $t = 40^\circ\text{C}$.

T - приборы для тропических условий эксплуатации $t = +10 \div 50^\circ\text{C}$ и $\beta = 98\%$;

$ОП$ - приборы повышенной механической прочности;

$ТП$ - приборы тряскопрочные;

$ВП$ - приборы вибропрочные;

$ТН$ - приборы нечувствительные к тряске;

$УП$ - приборы ударопрочные;

B_1 - приборы брызгозащищенные;

B_3 - приборы водозащищенные;

$Г_M$ - приборы герметичные;

$П_3$ - приборы пылезащищенные;

B_5 - приборы взрывобезопасные.

н) Схема включения прибора.

Схема включения может быть самой разнообразной, в зависимости от измеряемого параметра, его величины, точности измерения, неоднозначности включения прибора в цепь измерения. Например, во всех приборах электродинамической и индукционной измерительных систем по одной клемме тока и напряжения маркированы звездочкой (I^* , U^*) – это, так называемые, генераторные клеммы, которые должны подключаться со стороны источника (рис. 1.0.4.).

Кроме указанных условных обозначений маркировка измерительных приборов может содержать массу других обозначений, которые не влияют на режим использования прибора и результат измерения. Например, диапазон частот питающего тока, знак качества, товарный знак изготовителя, год изготовления, номер партии и т.д.

2. СИСТЕМЫ ЭЛЕКТРОИЗМЕРИТЕЛЬНЫХ ПРИБОРОВ

В электротехнической практике наиболее широкое распространение получили измерительные приборы непосредственной оценки (прямого отчета). В приборах этого типа независимо от назначения и принципа действия имеются электрические цепи и измерительный механизм. Измерительный механизм прибора имеет подвижную часть, каждому положению которой соответствует определенное значение измеряемой величины. С подвижной частью связаны стрелка или другое указательное устройство (световой луч, цифровой счетный механизм). Для успокоения колебаний подвижной части прибор снабжается демфером.

2.1. Магнитоэлектрическая измерительная система.

В этой системе используется эффект взаимодействия поля постоянного магнита и

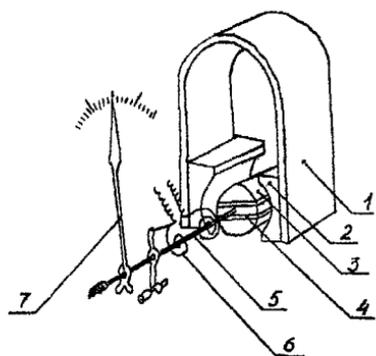


Рис. 1.0.1. Устройство прибора магнитоэлектрической системы.

1 - постоянный магнит; 2 - наконечники постоянного магнита; 3 - подвижный сердечник; 4 - обмотка сердечника; 5 - ось катушки; 6 - спиральные пружины и токоподводы; 7 - стрелка.

катушки с током, являющейся подвижной частью прибора. По перемещению подвижной части судят о значении измеряемой величины (рис. 1.0.1.).

При взаимодействии магнитного поля с током катушки I на последнюю действует момент $M_{BP} = \Phi WI = K_1 I$, так как $\Phi W = const$, где w - число витков катушки, Φ - магнитный поток. Противодействующий момент $M_{ПР}$ создается спиральными пружинами и пропорционален углу поворота. $M_{ПР} = K_2 \alpha$, где α - угол поворота подвижной части. При $M_{BP} = M_{ПР}$, уравнение шкалы будет $\alpha = K_1 / K_2 \cdot I = KI$ - линейное, а шкала равномерная.

Обычно приборы магнито-электрической системы пригодны для измерения постоянного тока в качестве амперметров, вольтметров, омметров. Приборы магнитоэлектрической системы отличаются точностью, чувствительностью и малым собственным потреблением энергии. С учетом этих характеристик приборы магнитоэлектрической системы становятся предпочтительными и для цепей переменного тока. Для чего они дорабатываются в электрической части.

2.2 Приборы электромагнитной системы.

В приборах электромагнитной системы (рис.1.0.2) используется эффект действия магнитного поля катушки, обтекаемой током I , на сердечник из ферромагнитного материала, являющегося подвижной частью прибора. По перемещению подвижной части судят о значении измеряемой величины. Катушка 1 развивает момент $M_{вр} = K_1 I^2$.

Противодействующий момент создается спиральной пружиной и пропорционален углу закручивания. $M_{пр} = K_2 \alpha$. При $M_{вр} = M_{пр}$ уравнение шкалы будет

$$\alpha = \frac{K_1}{K_2} I^2 = KI^2 \text{ -нелинейное, т.е. шкала}$$

неравномерная. Приборы электромагнитной системы наиболее просты по конструкции, надежны в работе. Но имеют невысокую чувствительность и точность. Применимы для измерений в цепях постоянного и переменного токов.

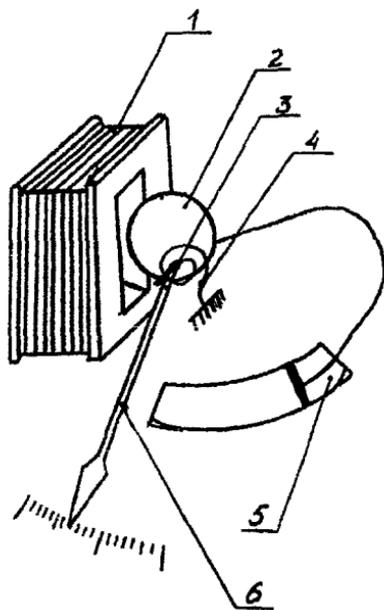


Рис. 1.0.2 Устройство прибора электромагнитной системы.

- 1 - катушка; 2 - сердечник; 3 - ось сердечника; 4 - спиральная пружина; 5 - камера воздушного демпфера; 6 - стрелка прибора.

2.3. Приборы электродинамической системы

В приборах электродинамической системы (рис 1.0.3) используется эффект взаимодействия двух катушек с токами I_1 и I_2 , одна из которых неподвижна, другая - подвижная. По перемещению подвижной части судят о значении измеряемой величины. Момент вращения, создаваемый в результате взаимодействия токов катушек $M_{вр} = K_1 I_1 I_2$. Противодействующий момент создается спиральной пружиной $M_{пр} = K_2 \alpha$. При $M_{вр} = M_{пр}$ уравнение шкалы будет $\alpha = \frac{K_1}{K_2} I_1 I_2 = K I_1 I_2$ - линейное, а шкала равномерная.

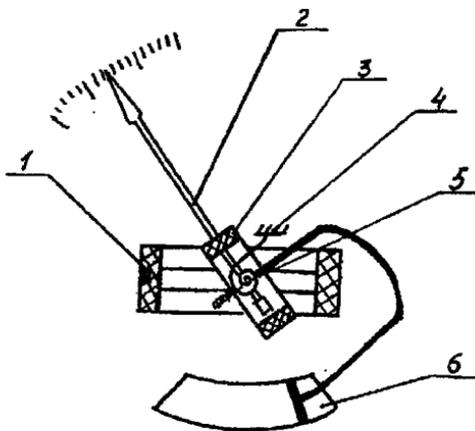


Рис. 1.0.3. Устройство прибора электродинамической системы.

1 - неподвижная катушка; 2 - стрелка прибора; 3 - подвижная катушка; 4 - спиральная пружина; 5 - ось подвижной катушки; 6 - воздушный демпфер.

Приборы электродинамической системы чаще используются в качестве ваттметров, фазометров в цепях постоянного и переменного токов. При этом неподвижная катушка (катушка тока) включается последовательно, а подвижная (катушка напряжения) - параллельно (рис. 1.0.4).

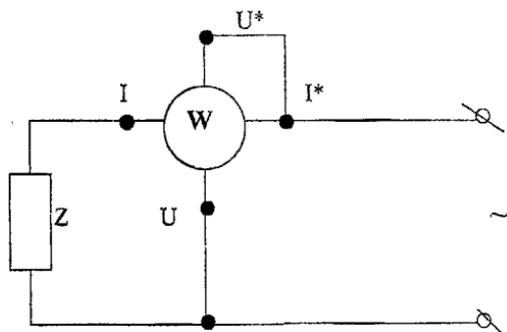


Рис. 1.0.4. Схема включения ваттметра.

ПРИМЕЧАНИЕ: По аналогичной схеме включаются фазометры и счетчики электрической энергии.

2.4. Приборы индукционной системы.

Приборы индукционной системы (рис 1.0.5) характеризуются тем, что вращающий момент создается взаимодействием вихревых токов, наводимых в диске 3 магнитными потоками электромагнитов 1 и 2.

$$M_{вр} = K_1 I_1 U \cos \varphi = K_2 P$$

Противодействующий момент создается в результате взаимодействия вихревых токов, создаваемых в диске постоянным магнитом, с полем того же магнита 6. $M_{пр} = K_3 V$, где

V - скорость вращения диска. Уравнение шкалы $P = \frac{K_2}{K_3} V = KV$ или $Pt = KVt$, т.е.

$W = CN$, где N - число оборотов диска; C - постоянная прибора.

На основе индукционной измерительной системы изготавливаются ваттметры и счетчики электрической энергии.

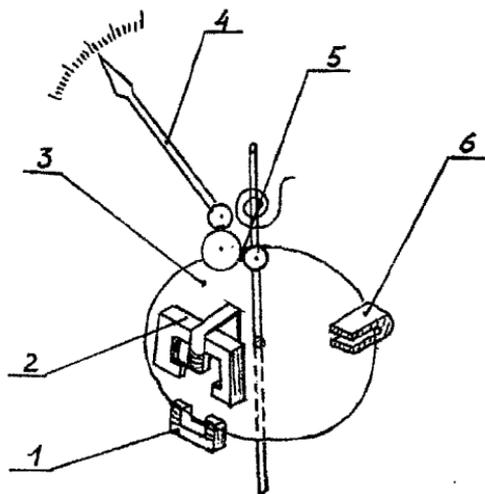


Рис. 1.0.5. Устройство приборов индукционной системы

1,2 - электромагниты; 3 - вращающийся диск; 4 - стрелка; 5 - счетный механизм; 6 - постоянный магнит.

ПРИМЕЧАНИЕ: Все измерительные приборы тарируются и показывают действующие значения измеряемых параметров!!

3. ТОЧНОСТЬ ИЗМЕРИТЕЛЬНЫХ ПРИБОРОВ И ИЗМЕРЕНИЙ.

При любом измерении его результат несколько отличается от действительного значения измеряемой величины. Точность измерительных приборов зависит от его

конструкции, измеряемого параметра, диапазона измерения и условий эксплуатации; и оценивается классом точности $\alpha = \gamma 100\%$, где $\gamma = \frac{\Delta_{\max}}{H}$ - приведенная погрешность; $\Delta = |A - A_0|$ - абсолютная погрешность; A - измеренное значение измеряемого параметра; A_0 - действительное значение измеряемого параметра; H - номинальное значение измеряемого параметра (если номинальное значение неизвестно, то H принимается равным верхнему пределу измерения прибора). На точность прибора оказывают дополнительное влияние внешние магнитные и электрические поля (табл. 1.0.1.).

Таблица 1.0.1.

Класс Точности	Допустимые погрешности $\gamma \delta$ %			
	При воздействии внешних полей		При воздействии ферромагнитного шита	
	категория		категория	
	I	II	I	II
0.05; 0.1; 0.2; 0.5	± 0.5	± 1.0	± 0.25	± 0.5
1.0; 1.5	± 1.0	± 2.5	± 0.5	± 1.0
2.5; 4.0	± 2.5	± 5.0	± 0.5	± 1.0

На точность измерительного прибора оказывают влияние и дополнительные технические средства измерения (измерительные трансформаторы, шунты, дополнительные сопротивления), которые также имеют соответствующие классы точности (см. п.4) и выбираются для измерения на один класс выше по сравнению с измерительным прибором. Таким образом, общая суммарная погрешность используемых технических средств измерения составляет инструментальную погрешность

$$\gamma_{\text{и}} = \gamma_{\text{п}} + \gamma_{\text{с}}$$

Кроме инструментальной погрешности на результат измерения влияет погрешность измерения, которая в свою очередь делится на систематическую и случайную. Систематическая погрешность обусловлена влиянием постоянно действующих факторов, например, число делений шкалы или длина шкалы, трения в опорах подвижной системы, неравномерная шкала и т.д.

ПРИМЕЧАНИЕ: В приборах электромагнитной системы шкала неравномерная, поэтому до 20% начала шкалы являются нерабочими. Следовательно, наименьшую погрешность вызывают измерения величин, значения которых соответствуют второй половине шкалы.

Случайная погрешность зависит от множества случайных факторов, например: колебания напряжения сети, влияние окружающей среды и т.д. Разделить эти составляющие погрешности измерения не всегда удается. Однако хороший эффект дает осреднение результатов нескольких измерений (на основе действия центральной предельной теоремы теории вероятностей).

4. МЕТОДЫ ИЗМЕРЕНИЯ.

Выбор метода измерения зависит от рода измеряемой величины, диапазона ее измерения, рода тока в цепи, точности измерения, использования дополнительных

технических средств измерения и т.д. В самом общем случае все измерения делятся на прямые и косвенные. Прямые измерения дают результаты непосредственного отсчета. Например, измерения тока по амперметру, мощности по ваттметру и т.д. Косвенные измерения дают в результате расчета искомых параметров по исходным данным, полученным прямым измерением. Например, мощность P можно измерить косвенно по результатам измерения тока I , напряжения U и сдвига фазы φ .

4.1. Измерение тока.

Измерение тока целесообразнее выполнить прямым измерением. В зависимости от рода тока в цепи выбирается амперметр магнитоэлектрический или электромагнитный. Диапазон измерения должен быть близок к номинальному значению измеряемой величины. При значительном разбросе измеряемых величин целесообразно использовать многопредельный амперметр или дополнительные технические средства измерения: позволяющие расширять пределы измерения приборов (трансформатор тока в цепях переменного тока см. рис. 1.0.6 и шунт постоянного тока см. рис. 1.0.7).

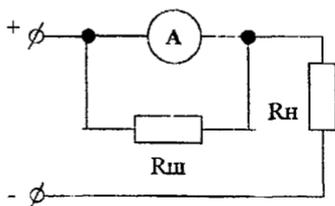
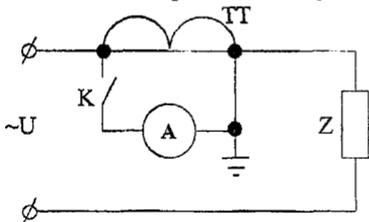


Рис. 1.0.6. Схема включения амперметра с трансформатором тока.

Рис. 1.0.7. Схема включения амперметра с шунтом.

ПРИМЕЧАНИЕ: Использование измерительного трансформатора тока сопряжено с повышением мер электробезопасности!

При наличии измерительного трансформатора измеряемая величина является результатом косвенного измерения. Например, в случае с измерительным трансформатором тока $I = K_{\Gamma T} I_A$, где I_A - показания измерительного прибора; $K_{\Gamma T}$ - коэффициент трансформации. При использовании шунта (в цепи постоянного тока) $I = \frac{R_A}{R_{ш}} I_A$, где $R_{ш}, R_A$ - сопротивления шунта, амперметра соответственно.

Использование шунта в цепи переменного тока не выгодно из-за большого потребления мощности шунтом. Измерительные трансформаторы и шунты изготавливают и выбирают для измерения по классу точности измерительного прибора или на один класс выше, т.к. общая инструментальная погрешность измерительного комплекса γ и увеличивается $\gamma_{и} = \gamma_{\alpha} + \gamma_{\Gamma T}$. Класс точности измерительного прибора должен выбираться исходя из требований допустимой погрешности измерения $\Delta_{\max}, \gamma = \frac{\Delta_{\max}}{H}, \alpha = \gamma 100\%$

Как измерительные трансформаторы так и шунты изготавливаются либо встроенными в прибор, либо наружными. Все изложенное для измерительного трансформатора тока в равной мере относится и к измерительному трансформатору напряжения (при измерении напряжения или мощности).

ПРИМЕЧАНИЕ: Измерительные трансформаторы создают повышенную опасность, особенно в режиме холостого хода. Поэтому коммутация измерительного прибора возможна только при разомкнутой первичной обмотке и обязательном заземлении вторичной (рис. 1.0.6.).

4.2. Измерение напряжения.

Измерение напряжения во многом упрощается, т.к. чаще всего значение номинальной величины напряжения известно (в виде напряжения сети или в схеме делителя напряжений с известными сопротивлениями плеч). Схема включения вольтметра показана на рис. 1.0.8.

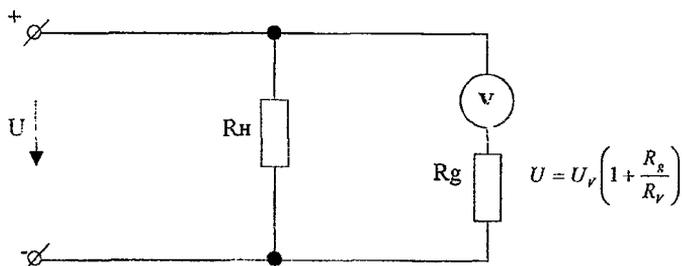


Рис. 1.0.8. Схема включения вольтметра.

При использовании измерительного трансформатора напряжения $U = U_v K_{ТН}$, где $K_{ТН}$ - коэффициент трансформации.

4.3. Измерение мощности.

Измерение активной мощности прямым способом осуществляется с помощью ваттметра или косвенным способом, используя результаты измерения тока I , напряжения U и коэффициента мощности: $P = IU \cos \varphi$.

Способ измерения мощности трехфазной цепи зависит от схемы соединения потребителей и режима работы цепи. Для симметричной нагрузки мощность измеряется одним ваттметром (в схеме «звезда», рис. 1.0.9; в схеме «треугольник», рис. 1.0.10.), и результат утраивается $P = 3P_\phi$.

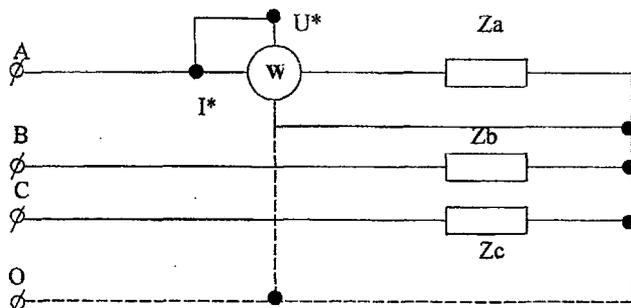


Рис. 1.0.9 Схема включения ваттметра в схеме «звезда».

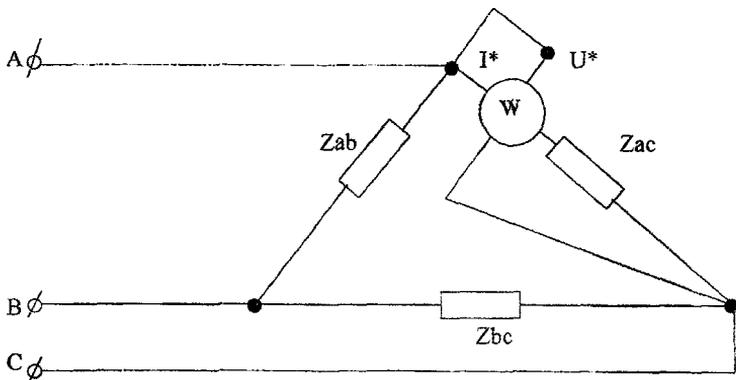


Рис. 1.0.10 Схема включения ваттметра в схеме «треугольник».

При несимметричной нагрузке активную мощность цепи можно измерить двумя однофазными ваттметрами (рис. 1.0.11) или одним трехфазным ваттметром (рис. 1.0.12.). Схема с двумя однофазными ваттметрами позволяет измерить активную мощность трехфазной цепи $P = P_{w1} + P_{w2}$, где измерения каждого ваттметра, в зависимости от характера нагрузки, бывают как положительные так и отрицательные (рис. 1.0.13). При симметричной и активной нагрузке ваттметры дают одинаковые показания; при симметричной нагрузке и $\cos \varphi \neq 1$ показания их различны и определяются выражениями: $P_{w1} = U_{ab} I_A \cos(30^\circ + \varphi)$; $P_{w2} = U_{bc} I_C \cos(30^\circ - \varphi)$. При $\varphi = 60^\circ$, $P_{w1} = 0$; $P_{w2} = P$. При $\varphi > 60^\circ$, $P_{w1} < 0$ и в этом случае для правильного измерения необходимо изменить порядок подключения клемм в одной из обмоток. И тогда $P = P_{w1} + P_{w2}$.

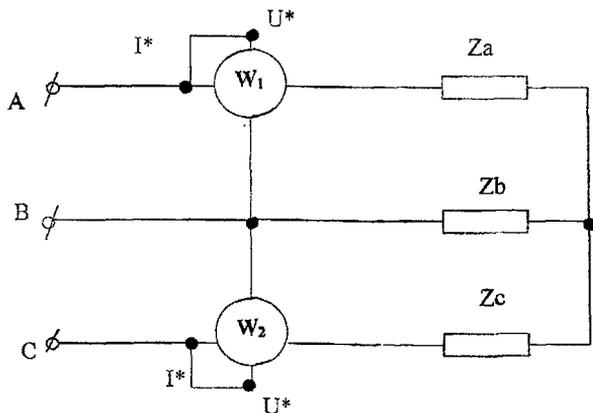


Рис. 1.0.11. Измерение мощности двумя ваттметрами.

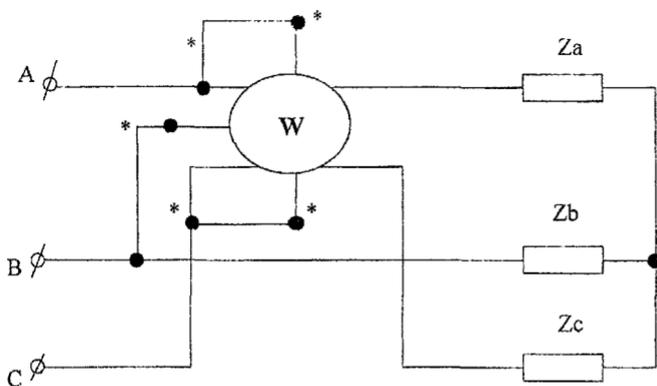


Рис.1.0.12. Измерение мощности 3-х фазным ваттметром.

Реактивную мощность измеряют аналогично активной, с помощью варметров. Однако ее при симметричной нагрузке можно измерить и ваттметром, включенным на «чужое» напряжение (рис. 1.0.14.)В этом случае, в соответствии с векторной диаграммой (рис. 1.0. 15), ваттметр покажет

$$P_w = U_{bc} I_A \cos(\widehat{U_{bc} I_A}) = U_{bc} I_A \cos(\pi/2 - \varphi) = U_{bc} I_A \sin \varphi$$

P

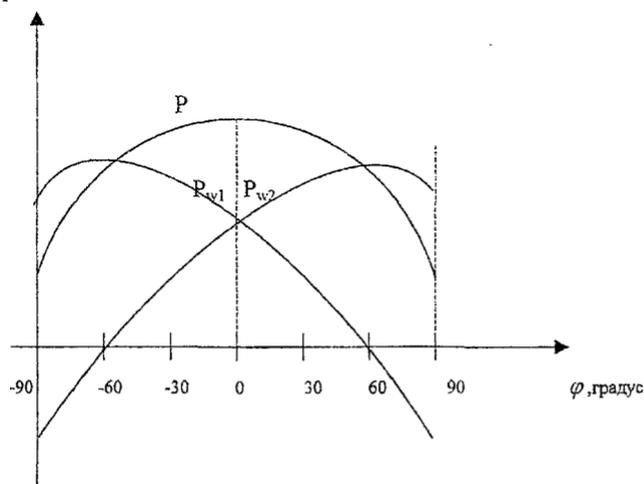


Рис.10.13. Показания однофазных ваттметров.

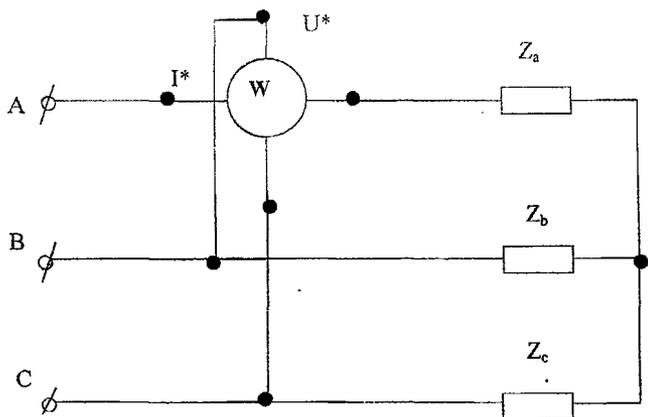


Рис. 1.0.14. Схема включения ваттметра для измерения реактивной мощности.

Для всей цепи $Q = 3 \frac{P_{W}}{\sqrt{3}} = \sqrt{3} P_{W}$

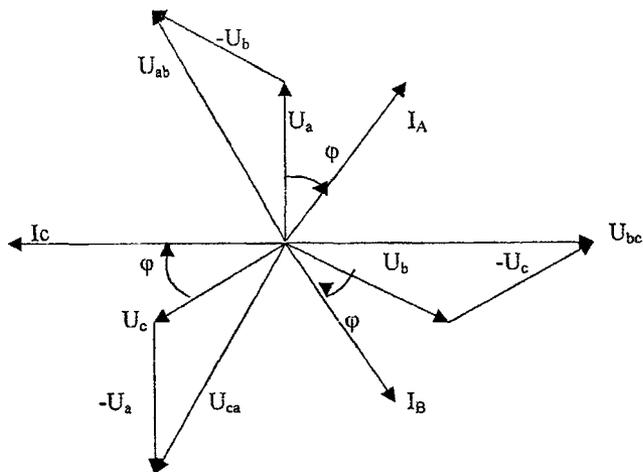


Рис. 1.0.15. Векторная диаграмма при симметричной нагрузке.

Для расширения пределов измерения ваттметров и варметров используются измерительные трансформаторы тока (для токовой обмотки) и напряжения (для обмотки напряжения).

4.4. Измерение сопротивлений.

Измерение сопротивлений прямым способом осуществляется омметром (для средних величин - 1 ... 1000 Ом), мегомметром (для больших величин - 100 ... 10⁶ кОм.). Эти приборы имеют неравномерную шкалу и большую погрешность ($\alpha \geq 2,5$). Косвенным

способом сопротивление можно измерить с использованием амперметра и вольтметра или с помощью моста

Для повышения точности любых измерительных приборов используются логометрические схемы, которые измеряют относительные величины и тем самым компенсируют абсолютные погрешности при изменении напряжения источника, условий применения и т.д.

Контрольные вопросы:

1. Назовите основные типы измерительных приборов.
2. Какие приборы имеют названия (в маркировке)?
3. Для каких приборов не указывается единица измерения?
4. Какие классы точности имеют ваттметры?
5. Как определить цену деления многопредельного ваттметра?
6. Как определить максимальную погрешность прибора по данному классу точности и диапазону шкалы?
7. Назовите условные обозначения в маркировке измерительных приборов.
8. Объясните принцип действия приборов основных измерительных систем.
9. Каковы особенности включения: ваттметров, варметров, фазометров, счетчиков электрической энергии?
10. Как влияют на точность измерения внешние магнитные и электрические поля, а также использование дополнительных технических средств измерения?
11. Как можно измерить активную мощность трехфазной цепи при симметричной и неоднородной нагрузках?
12. Как измерить реактивную мощность трехфазной цепи при несимметричной нагрузке при схеме «треугольник»?
13. Как включить трехфазный фазометр?
14. Какими приборами и методами измеряются сопротивления?

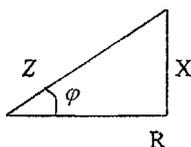
ЛИТЕРАТУРА.

1. Электрические измерения. Под ред. Малиновского В.Н: М, Высшая школа 1980г.
2. Электрические измерения. Под ред. Фремке А.В: Л, Энергия, 1980г.
3. ГОСТ 8.401-81. Погрешности и классы точности электроизмерительных приборов.

Цель работы: Приобретение навыков экспериментального исследования и определения энергетических параметров цепи переменного тока.

Краткие теоретические сведения.

В цепи постоянного тока все проводники и потребители обладают электрическим сопротивлением, которое принято называть омическим. В цепях переменного тока имеют место следующие виды сопротивлений: активное – R ; реактивное – X (индуктивное – X_L , емкостное – X_C) и полное – Z . Указанные сопротивления связаны между собой соотношениями, полученными из треугольника сопротивлений (рис. 1.1.1.)



$$R = Z \cos \varphi; \quad X = Z \sin \varphi;$$

$$Z = \sqrt{R^2 + X^2}; \quad \varphi = \arctg \frac{X}{R}$$

Рис. 1.1.1 Треугольник сопротивлений.

Активным сопротивлением обладают элементы, в которых электрическая энергия необратимо преобразуется в тепловую, световую, механическую и т.д. (резисторы, лампы накаливания, электронагревательные приборы и др.). Реактивным сопротивлением обладают элементы, способные запасать энергию в магнитном или электрическом полях, например, катушки индуктивности и конденсаторы. По своей физической природе реактивное сопротивление отличается от активного, и оно обусловлено влиянием магнитного и электрического полей, связанных с цепью.

При постоянном токе магнитный поток, создаваемый катушкой индуктивности, в установившемся режиме постояен, сопротивление катушки невелико, так как обусловлено только омическим сопротивлением медного провода обмотки. При переменном токе магнитный поток в катушке изменяется во времени по закону \sin и согласно закону электромагнитной индукции, индуцирует э.д.с. самоиндукции такого направления, которое препятствует изменению тока. Э.д.с. самоиндукции катушки индуктивности оказывает противодействие переменному току, характеризующееся величиной индуктивного сопротивления: $X_L = \omega L$, где $\omega = 2\pi f$ - угловая частота переменного тока; L - индуктивность.

При постоянном токе и постоянном значении, приложенного напряжения, заряд конденсатора $q = CU$, где C - емкость конденсатора. Сопротивление конденсатора бесконечно велико за счет прослойки диэлектрика между его обкладками. Поэтому конденсатор постоянный ток "не пропускает". Переменное напряжение создает изменяющийся во времени заряд и в цепи возникает ток, величина которого зависит от величины емкости C конденсатора. Противодействие конденсатора переменному току характеризуется емкостным сопротивлением

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

В отличие от активного, индуктивное и емкостное сопротивления не связаны с необратимым преобразованием электрической энергии в энергию другого вида, за что получили название реактивных. В общем случае, когда ветвь содержит последовательно

соединенные индуктивность и емкость, оно равно разности индуктивного и емкостного сопротивлений: $X = X_L - X_C$.

Знак реактивного сопротивления определяется тем какое из сопротивлений преобладает. При $X_L > X_C$ величина X положительна, при $X_L < X_C$ - отрицательна.

При заданном напряжении действующее значение тока определяется формулой:

$I = \frac{U}{Z}$, выражающей закон Ома для пассивной ветви цепи переменного тока.

Энергетические процессы в цепях переменного тока имеют особенности по сравнению с цепями постоянного тока. Помимо необратимого преобразования электрической энергии в энергию другого вида в них наблюдается процесс обратимого преобразования электрической энергии. При возрастании тока (а следовательно и магнитного потока) электрическая энергия поступает к потребителю, преобразуется и накапливается в нем в виде энергии магнитного поля. Энергия магнитного поля достигает максимума при максимальном значении тока. При убывании тока энергия магнитного поля преобразуется в электрическую энергию и возвращается в цепь. Происходит гармонический обмен энергией между магнитным полем индуктивности и цепью. Подобное преобразование электрической энергии в энергию электрического поля наблюдается и в емкости при приложенном синусоидальном напряжении. При возрастании напряжения конденсатор потребляет энергию из цепи, запасаая ее в электрическом поле (заряжается), при убывании напряжения отдает энергию обратно в цепь (разряжается).

При анализе энергетических процессов в цепях переменного тока используются четыре понятия мощности.

1. Мгновенная мощность: $p = u i$, где $u = U_M \sin(\omega t + \psi_U)$, $i = I_M \sin(\omega t + \psi_I)$ - мгновенные значения напряжения и тока, изменяющиеся во времени по синусоидальному закону. Мгновенная мощность дает значение мощности, потребляемой ветвями цепи в произвольный момент времени.

2. Активная мощность: $P = UI \cos \varphi = I^2 R$, где $U = \frac{U_M}{\sqrt{2}}$ и $I = \frac{I_M}{\sqrt{2}}$ - действующее значения напряжения и тока; $\varphi = \psi_u - \psi_i$ - сдвиг по фазе между током и напряжением; $\cos \varphi$ - коэффициент мощности. Активной мощностью оценивается как средняя за период скорость необратимого преобразования электрической энергии в энергию другого вида. По активной мощности ведут расчет теплоэнергетических характеристик потребителей. Активная мощность измеряется в ваттах (Вт).

3. Реактивная мощность $Q = UI \sin \varphi = I^2 X$. Понятие реактивной мощности, применяемое для оценки процесса обмена энергией между электрическим и магнитным полями ветвей цепи и источником, измеряется в вольтамперах реактивных (ВАр).

4. Полная мощность $S = UI = I^2 Z$. Полной мощностью называют расчетную величину, характеризующую пропускную способность цепи, и она характеризует предельную величину полезно используемой мощности потребителей. Измеряется в вольтамперах (ВА).

Коэффициент мощности $\cos \varphi$ показывает, в какой степени используется пропускная способность ветви.

Составляющие мощности ветви (цепи) связаны соотношениями прямоугольного треугольника (рис. 1.1.2) подобного треугольнику сопротивлений. Из треугольника мощностей следуют соотношения: $P = S \cos \varphi$, $Q = S \sin \varphi$, $S = \sqrt{P^2 + Q^2}$, $\varphi = \arctg \frac{Q}{P}$. Значение активной, реактивной, полной мощностей и параметров участка цепи могут быть экспериментально определены с помощью ваттметра, амперметра и вольтметра, включенных по схеме (рис. 1.1.3.).

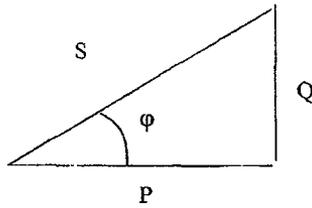


Рис. 1.1.2. Треугольник мощностей.

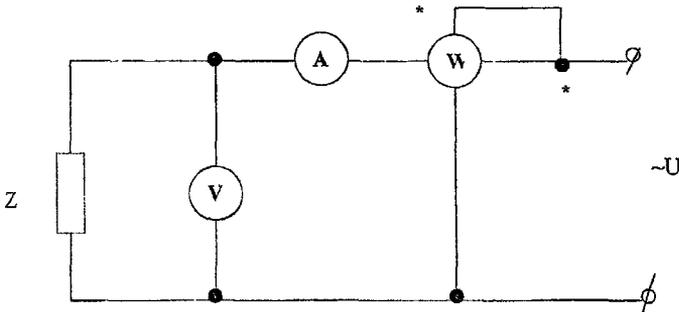


Рис. 1.1.3. Схема подключения измерительных приборов в электрической цепи переменного тока.

Ваттметр измеряет активную мощность P , амперметр и вольтметр показывают действующие значения тока и напряжения. Используя показания приборов, рассчитываем значения величин по формулам:

$$\cos \varphi = \frac{P}{UI}, \quad \varphi = \arccos \frac{P}{UI}, \quad Z_L = \frac{U}{I}, \quad R = \frac{P}{I^2}, \quad X = Z \sin \varphi, \quad S = UI, \quad Q = UI \sin \varphi.$$

Результаты всех измерений получают с погрешностями, поэтому результаты, полученные косвенным путем, не должны противоречить физическому смыслу. (Например: $\cos \varphi > 1$, $Z < R$ и т.д.)

Анализ цепей переменного тока, сопровождается построением векторной диаграммы. Векторная диаграмма это совокупность взаимосвязанных одноименных векторов, изображающих синусоидально изменяющиеся во времени токи и напряжения цепи. При построении векторной диаграммы, длины векторов берут равными (в принятых масштабах) действующим значениям величин; углы между ними – соответствующим сдвигам фаз.

Реальная катушка индуктивности представляет собой нагрузку активно-индуктивного характера, так как вследствие потерь мощности на нагрев провода обмотки, она обладает помимо индуктивного сопротивления X_L , активным сопротивлением R_L . Реактивное сопротивление катушки равно $X = X_L$, сдвиг по фазе между током и напряжением:

$\varphi = \arctg \frac{X_L}{R_L} > 0$, что означает, что ток отстает по фазе от напряжения (вектор напряжения

на диаграмме повернут относительно вектора тока против часовой стрелки).

В реальном конденсаторе, при низких частотах $f \leq 50$ Гц, практически отсутствуют потери мощности, его можно рассматривать как емкостную нагрузку. Реактивное сопротивление конденсатора $X = -X_C$, сдвиг по фазе между током и напряжением:

$\varphi \approx \arctg \frac{-X_C}{0} \approx -90^\circ$, что означает, что ток опережает по фазе напряжение на 90°

(вектор напряжения повернут относительно вектора тока по часовой стрелке).

На рис. 1.1.4 представлена цепь, содержащая последовательно соединенные резистор и катушку. На рис.1.1.5 – качественная векторная диаграмма этой цепи.

$$M_I = \dots \frac{A}{\text{см}}; M_U = \dots \frac{B}{\text{см}}$$

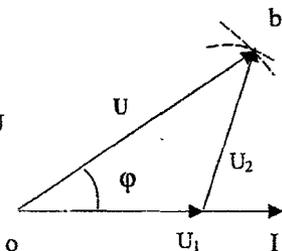
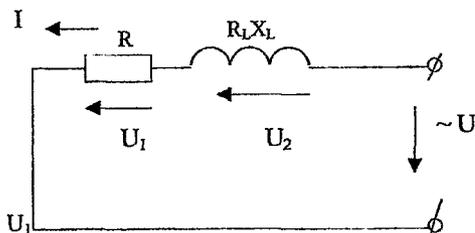


Рис. 1.1.4. Электрическая цепь.

Рис. 1.1.5. Векторная диаграмма.

При последовательном соединении элементов построение диаграммы начинают с вектора тока, так как ток на всех участках цепи один и тот же. Затем, в принятом масштабе, строят вектора напряжений \vec{U}_1, \vec{U}_2 на участках с резистором и катушкой, используя известные значения углов сдвига фаз для этих участков ($\varphi_1 = 0, 0 < \varphi_2 < \frac{\pi}{2}$). Напряжение источника, в соответствии со вторым законом Кирхгофа, должно

удовлетворять условию: $\vec{U} = \vec{U}_1 + \vec{U}_2$. Положение точки " b ", а, следовательно, и положение векторов \vec{U}_1, \vec{U}_2 определяется способом засечек. Угол φ - сдвиг по фазе между напряжением U и током I на входе цепи. Аналогично строится диаграмма для цепи, содержащей последовательно соединенные резистор и конденсатор.

Порядок выполнения работы.

1. Собрать схему рис. 1.1.6.
2. Поставив тумблер К в положение 1, измерить значение тока, напряжения и активной мощности на отдельных участках и для цепи в целом.
3. Переключить тумблер К в положение 2 и повторить те же измерения.
4. Результаты измерений занести в табл. Вычислить значения величин, указанных в табл.
5. Для цепей, соответствующих двум положениям тумблера К, построить в одинаковых масштабах векторные диаграммы.

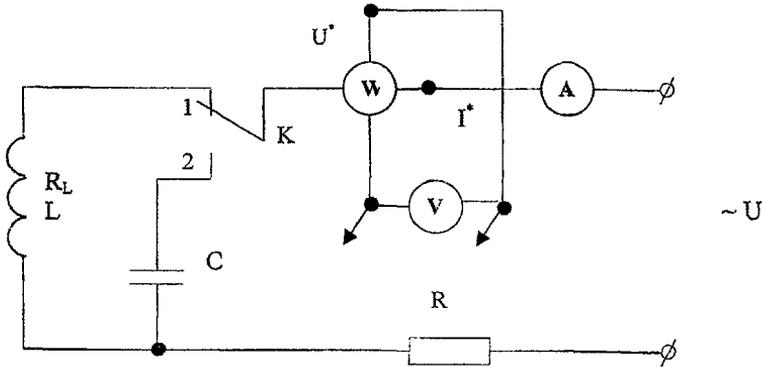


Рис. 1.1.6. Схема лабораторной установки.

Таблица

№ цепи	участок электрической цепи:	измерено			вычислено						
		I [A]	U [B]	P [Вт]	cosφ	φ градус	Z [Ом]	R [Ом]	X [Ом]	Q [ВА]	S [ВА]
1	с резистором R										
	с катушкой индуктивности L										
	Вся цепь R,L										
2	с резистором R										
	с конденсатором C										
	вся цепь R,C										

Контрольные вопросы.

1. Назовите параметры характеризующие пассивный участок цепи переменного тока.
2. Объясните наличие у катушки индуктивности активного сопротивления. Объясните физический смысл индуктивного сопротивления.
3. Объясните особенности энергетических процессов в цепях переменного тока.
4. Чем отличаются реальные элементы L и C от "идеальных"?
5. Назовите четыре понятия мощности, применяемые при анализе энергетических процессов в цепях переменного тока.
6. Как экспериментально могут быть определены параметры участка цепи?
7. Объясните порядок построения векторных диаграмм для цепей с последовательным соединением элементов.
8. В каких единицах измеряются составляющие мощности?

ЛИТЕРАТУРА [1,2].

РАБОТА N 1.2. ИССЛЕДОВАНИЕ НЕРАЗВЕТВЛЕННОЙ ЦЕПИ ПЕРЕМЕННОГО ТОКА. РЕЗОНАНС НАПРЯЖЕНИЙ.

Цель работы: Изучение явления резонанса напряжений и его практическое использование.

Краткие теоретические сведения.

Неразветвленная электрическая цепь переменного тока с нагрузками разными по характеру (R, L, C) имеет один частный режим работы, когда величины реактивных сопротивлений $X_L = X_C$ ($X = X_L - X_C = 0$), тогда

$$Z = \sqrt{R^2 + X^2} = R \rightarrow \cos \varphi = \frac{R}{Z} = 1$$

Таким образом, в целом цепь эквивалентна цепи с активной нагрузкой. Такой режим работы цепи имеет ряд особенностей и называется явлением резонанса напряжений. Резонанс напряжений возникает в цепи переменного тока с последовательным соединением катушки индуктивности L и конденсатора C (рис.1.2.1) при условии: $X_L = X_C$ или $\omega L = \frac{1}{\omega C}$; где $\omega = 2\pi f$ - угловая частота, f - частота питающего тока.

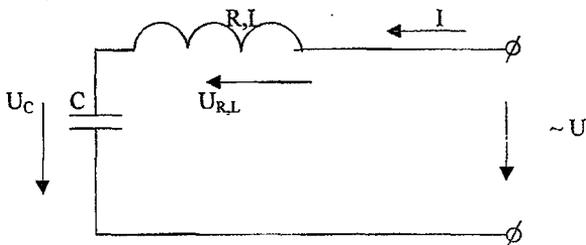


Рис.1.2.1. Неразветвленная электрическая цепь.

Очевидно, что резонанса напряжений можно достигнуть путем изменения одного из параметров: частоты f , индуктивности катушки L , емкости конденсатора C . Для данной цепи, в соответствии с законом Ома

$$I = \frac{U}{\sqrt{R^2 + X^2}} = \frac{U}{R},$$

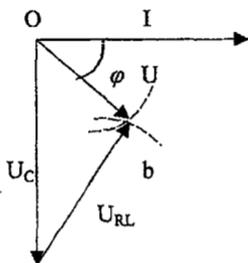
т.е. значение тока при резонансе определяется величиной активного сопротивления в рассматриваемой цепи. При заданных значениях индуктивности L и емкости C , можно определить резонансную частоту $f_{рез}$.

$$2\pi f_{рез} L = \frac{1}{2\pi f_{рез} C}; \quad f_{рез} = \frac{1}{2\pi\sqrt{LC}}$$

Если принять, что $f = \text{const} = 50$ Гц, то достичь резонанса можно изменением величины, например, емкости конденсатора C . Физическую сущность явления резонанса можно пояснить с помощью векторной диаграммы (рис. 1.2.2.)

Построение векторной диаграммы для неразветвленной цепи удобнее начинать с вектора тока, который является общим для всех участков цепи. Далее из точки O (начала вектора I) в принятом масштабе откладываем вектор U_C , с учетом того, что напряжение отстает от вектора тока I на угол $\varphi \approx 90^\circ$. Из конца вектора U_C откладываем вектор $U_{R,L}$,

который опережает вектор тока I на угол $\varphi_L = \arctg \frac{X_L}{R}$. Поскольку так как величина этого угла не известна, то положение векторов U_{RL} и U определяют исходя из уравнения по второму закону Кирхгофа $\dot{U} = \dot{U}_{RL} + \dot{U}_C$. Положение точки "b", а следовательно и векторов U_{RL} ,



$$M_I \dots \frac{A}{\text{см}}; M_U \dots \frac{B}{\text{см}}$$

Рис. 1.2.2. Векторная диаграмма электрической цепи.

U в треугольнике напряжений, определяют методом засечек. При этом может быть: $\varphi > 0$, если $X_L > X_C$ и $\varphi < 0$, если $X_L < X_C$.

При резонансе реактивная составляющая напряжения на катушке индуктивности U_L равна напряжению на конденсаторе U_C , так как $X_L I = X_C I$, а активная составляющая U_R равна напряжению источника цепи, состоящей из катушки индуктивности и конденсатора. $\dot{U}_{R,L} = \dot{U}_L + \dot{U}_R$. При этом, чем больше R , тем меньше $\varphi > 0$. Для идеальной катушки индуктивности $R^0 = 0, U^0_{RL} = U_L = X_L I$. Таким образом, $U_{R,L} \geq U^0_{R,L}$, а угол

$$\varphi^0 = \arctg \frac{X_L}{R} = 90^\circ.$$

При $R \ll X_L = X_C$ напряжения на элементах цепи могут во много раз превышать напряжение источника, так как $IR \ll IX_L = IX_C$, а следовательно, $U \ll U_{RL}, U \ll U_C$. Поэтому, в этом случае, резонанс напряжения может быть опасен пробоями изоляции в приемниках (L, C), а так же поражением электрическим током обслуживающего персонала. С точки зрения энергетики, резонанс способствует разгрузке линии электропередачи от реактивных токов, поэтому здесь явления резонанса благоприятно, так как повышает $\cos \varphi = \frac{R}{Z} \rightarrow 1$ и К.П.Д. цепи. В реальных цепях переменного тока целесообразно снижение, или компенсация реактивных составляющих нагрузки, но полная компенсация практически невозможна и невыгодна. Оптимальный (нормируемый) уровень коэффициента мощности составляет 0,92.

Порядок выполнения работы

1. Собрать схему рис.1.2.3.
2. С помощью лабораторного автотрансформатора (ЛАТР) поддерживая постоянным напряжение в цепи ($U=50$ В), измерить значения тока и напряжений на катушке

индуктивности и на конденсаторе в режимах, соответствующих ступеням батареи конденсаторов. При этом увеличение (или уменьшение) суммарной емкости батареи осуществляется в последовательности, когда зона режимов близких к резонансу проходит с наименьшим шагом изменения C , обеспечивая более точное выполнение условия резонанса $X_L \approx X_C$. Результаты измерений занести в табл. 1.2.1.

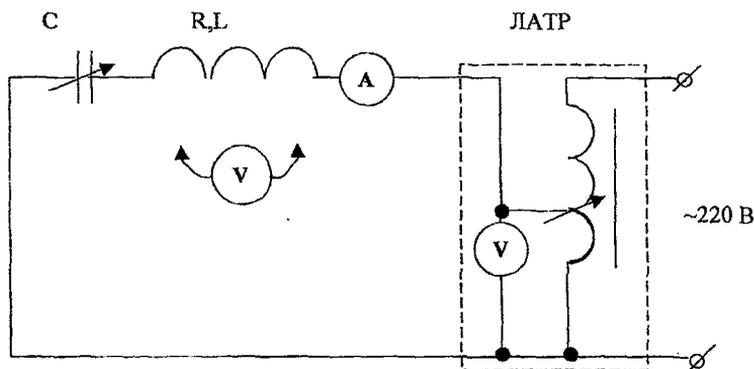


Рис.1.2.3. Электрическая схема лабораторной установки.

- По данным табл. построить, в принятых одинаковых масштабах, векторные диаграммы для трех режимов: близкого к резонансу, до и после резонанса (режимы до и после брать наиболее удаленные от резонансного).
- По тем же данным табл. построить графики зависимостей $I = f_1(C)$; $U_C = f_2(C)$; $U_{R,L} = f_3(C)$.

Таблица 1.2.1.

номер ступени батареи конденс.	U [В]	I [А]	$U_{R,L}$ [В]	U_C [В]
1				
...				
8				

Контрольные вопросы

- Назовите основные признаки резонанса напряжений.
- Назовите условие резонанса напряжений.
- Почему ток при резонансе имеет максимальное значение?
- Когда резонанс напряжений в технике сильных токов является аварийным режимом?
- Чем опасен резонанс напряжений?
- Когда режим резонанса целесообразен?
- Можно ли достичь максимального значения коэффициента мощности?

ЛИТЕРАТУРА [1,2]

РАБОТА № 1.3 **ИССЛЕДОВАНИЕ РАЗВЕТВЛЕННОЙ ЦЕПИ ПЕРЕМЕННОГО ТОКА. РЕЗОНАНС ТОКОВ.**

Цель работы: Изучение явления резонанса токов и его практическое использование.

Краткие теоретические сведения.

Разветвленная цепь состоит из последовательно и параллельно соединенных ветвей. Если произвести определенные преобразования, такую цепь можно представить эквивалентной цепью с последовательным или параллельным соединением элементов [Л.1,3]. Рассмотрим параллельную схему соединения рис.1.3.1. Для этой схемы соединения напряжение будет одинаковым для всех параллельных ветвей. Ток неразветвленного участка, согласно первому закону Кирхгофа, равен $I = I_1 + I_2$, где $I_1 = Uy_1$; $I_2 = Uy_2$;

$y_1 = \sqrt{g_1^2 + e_1^2}$ - полная проводимость первой ветви; $y_2 = e_2$ реактивная проводимость второй ветви. Для "идеальной" ($R=0$) катушки индуктивности, $g_1=0$, а $y_1=v_1$. В частном случае, когда $v_1 = -v_2$, $I_1 = -I_2$, а $I=0$, т.е. при условии равенства реактивных проводимостей параллельных ветвей в цепи возникает режим резонанса токов, для которого характерны некоторые особенности:

$$I = Uy \rightarrow Ug; \quad \varphi = \arctg \frac{b}{g} \rightarrow 0; \quad \cos \varphi = \frac{g}{y} \rightarrow 1$$

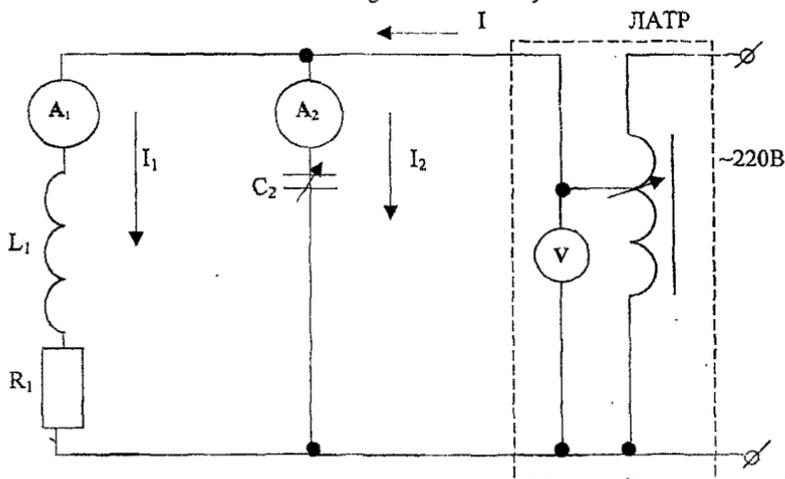
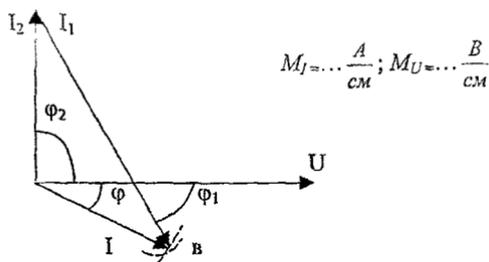


Рис.1.3.1. Электрическая схема цепи.

Анализ явления резонанса токов поясним с помощью векторной диаграммы. Построение векторной диаграммы (рис.1.3.2.) начинаем с вектора напряжения U . Далее, в принятом масштабе, откладываем вектор тока второй ветви, $I_2 = Ub_2$;

$$\varphi_2 = \arctg \frac{-X_{2C}}{R_2} \approx -90^\circ \quad \text{При } R_2 \rightarrow 0 \quad \varphi_2 = -90^\circ. \quad \text{Из конца вектора } I_2 \text{ откладываем вектор } I_1.$$



$$M_I = \dots \frac{A}{\text{см}}; M_U = \dots \frac{B}{\text{см}}$$

Рис.1.3.2. Векторная диаграмма электрической цепи.

Поскольку угол φ_1 не определен, положение вершины "в" треугольника токов определим методом засечек согласно уравнения $\vec{i} = \vec{i}_1 + \vec{i}_2$, составленному о первом закону Кирхгофа. Для идеальной катушки индуктивности $R_1^0 = 0$; $g_1 = \frac{R_1}{Z^2} = 0$; $\varphi_1 = 90^\circ$; $\cos\varphi = 0$. Для реальной катушки индуктивности $R_1 > 0$; $\varphi_1 < 90^\circ$; $\vec{i} = \vec{i}_{1R} + \vec{i}_{1X}$.

Режим резонанса токов может быть опасен при $b_L = b_C \gg g$. Тогда $U_{b_L} = U_{b_C} \gg U_g$; $I_1 = I_2 \gg I$. При больших (нерасчетных) токах в потребителях (L, C) может возникнуть оплавление или возгорание изоляции.

С точки зрения передачи энергии режим близкий к резонансу токов всегда благоприятный, в связи с повышением коэффициента мощности и КПД линии электропередачи.

Порядок выполнения работы.

1. Собрать схему рис.1.3.3.
2. Установить с помощью автотрансформатора (ЛАТРа) напряжение 150 В и поддерживать его во время опыта неизменным. Не производя записей измерений, убедиться, что при изменении емкости от минимального до максимального (или наоборот) значения токов неразветвленной части схемы сначала убывает, а затем возрастает. Изменяя емкость повторно, произвести измерения параметров цепи, таким образом, чтобы состояние близкое к резонансному пройти с меньшим "шагом" изменения емкости C. Результаты измерений занести в табл.
3. По данным опыта построить, в принятых одинаковых масштабах: три векторные диаграммы для режимов резонанса, до и после резонанса. Последние две построить для величины емкости наиболее удаленной от резонансной.
4. Построить график зависимости $I = f(C)$.

Таблица

N П	C [мкФ]	измерено			
		U [В]	I [А]	I ₁ [А]	I ₂ [А]
1					
.....					
8					

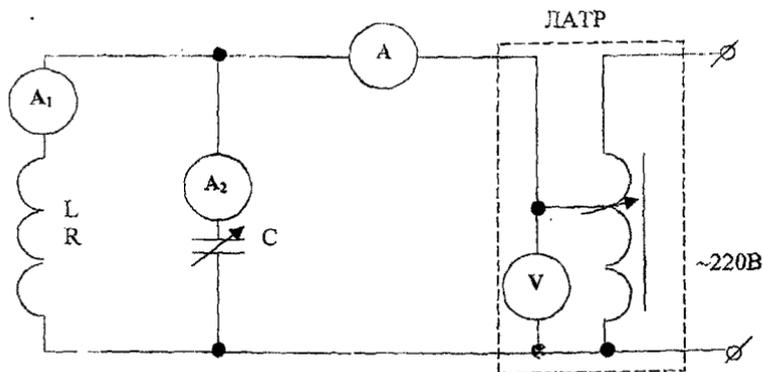


Рис.1.3.3. Электрическая схема лабораторной установки.

Контрольные вопросы.

1. Назовите условие наступления резонанса токов и его характерные признаки.
2. Как определить ток неразветвленной части цепи?
3. Как определить составляющие полную и эквивалентную проводимости цепи?
4. Какой характер нагрузки соответствует случаям: $I_L > I_C$, $I_L < I_C$, $I_L = I_C$.
5. Какие значения имеют параметры цепи при резонансе?
6. Как увеличить $\cos \phi$ установки?
7. Чем опасен резонанс токов и когда полезен?

ЛИТЕРАТУРА [1,3].

РАБОТА N 1.4. ПРОВЕРКА ОДНОФАЗНОГО СЧЕТЧИКА ЭЛЕКТРИЧЕСКОЙ ЭНЕРГИИ.

Цель работы: Изучение устройства, принципа действия и проверка точности измерения счетчика.

Краткие теоретические сведения.

Упрощенная схема устройства однофазного счетчика переменного тока представлена на рис.1.0.5. Основными элементами прибора являются: электромагниты 1,2; постоянный магнит 6; алюминиевый диск 3; стрелка 4; счетный механизм 5. При протекании тока по обмоткам электромагнитов возникают переменные магнитные потоки Φ_1 и Φ_2 , которые создают в диске 3 зоны переменной полярности, поэтому в нем образуются вихревые токи $I_{Д1}$ и $I_{Д2}$. От взаимодействия этих токов с магнитными потоками Φ_1 , Φ_2 создается вращающий момент M , действующий на диск 3. Вращающий момент, приложенный к диску, выражается формулой [л1.2].

$M = K_1 \Phi_1 \Phi_2 \cos \varphi = K_2 U I_1 \cos \varphi = K_2 P$, где K_1, K_2 - постоянные коэффициенты, Φ_2 - поток, пропорциональный напряжению U на нагрузке; Φ_1 - поток, пропорциональный току нагрузки; φ - угол сдвига по фазе между U и I ; P - активная мощность нагрузки. Этот момент вызывает вращение диска. При вращении диска в поле тормозного, постоянного магнита 6 в диске индуктируются вихревые токи, взаимодействие которых с полем того же магнита создает тормозной момент, пропорциональный скорости вращения V диска, т.е. $M_T = K_3 V$. При постоянной нагрузке скорость вращения диска счетчика постоянна, чему соответствует равенство вращающего и тормозного моментов $M = M_T$. Отсюда следует, что $K_2 P = K_3 V$;

$$P = \frac{K_3}{K_2} V = KV$$

Полученное выражение показывает, что скорость вращения диска счетчика пропорциональна мощности нагрузки. Если в течение времени t израсходована энергия $A = P t$, то имея в виду, что $P = K V$, получим $A = Pt = K_3 V t = CN$, где N - число оборотов диска счетчика. Следовательно израсходованная энергия пропорциональна количеству оборотов диска счетчика. Таким образом, по числу оборотов диска счетчика можно судить об израсходованной энергии. Она регистрируется счетным механизмом 5, приводимым в движение от червяка, укрепленного на оси счетчика. Счетный механизм представляет собой счетчик оборотов. Число оборотов диска, которое вызывает изменение показателя счетного механизма на единицу измеряемой величины, называется передаточным числом счетчика. Например: 1 кВт. ч. - 5000 оборотов диска. Величина, обратная передаточному числу счетчика, т.е. энергия, зафиксированная счетным механизмом за один оборот диска, носит название постоянной счетчика. Постоянная счетчика, как правило, выражается в ваттсекундах за один оборот. Таким образом, если известно передаточное число счетчика в оборотах на 1 кВт.ч., то постоянную счетчика C легко можно подсчитать по формуле:

$$C = \frac{1}{n_0} \left[\frac{\text{кВтч}}{\text{оборот}} \right] = \frac{1000 * 3600}{n_0} \left[\frac{\text{Втс}}{\text{оборот}} \right], \text{ где } n_0 - \text{число оборотов диска, соответствующее 1 кВт.ч.}$$

Передаточное число и постоянная счетчика зависят от конструкций счетного механизма и остаются для данного счетчика неизменными величинами. Показания счетчиков не могут быть достаточно точными. Наиболее существенными причинами, нарушающими точность работы счетчиков, являются: - изменение силы трения в

подпятнике и подшипнике; - явления гистерезиса в катушках; - влияние внешних магнитных и электрических полей и т.д. Перечисленные причины приводят к тому, что счетчик работает с ошибками, превышающими определенную норму. Согласно ГОСТ 6570-53 погрешности счетчика не должны превышать погрешности своего класса (1;2;2,5) точности при $\cos\varphi=1$. Проверка точности счетчика производится путем, сравнения энергии, подсчитанной по счетчику, и энергии, подсчитанной по приборам амперметру и вольтметру. Определяем мощность $P=IU$, т.к. $\cos\varphi=1$, при активной нагрузке. Предварительно подсчитывается постоянная счетчика. Затем по секундомеру отсчитывается время, соответствующее оборотам диска. Энергия, подсчитанная по счетчику, равна $A=CN$ [Вт с]. Энергия, подсчитанная по контрольным приборам $A_0=IUt$ [Вт с], где t - время, зафиксированное секундомером.

Абсолютная погрешность счетчика $\Delta A = |A-A_0|$. Величина ΔA может быть положительной (счетчик спешит) и отрицательной (счетчик отстаёт). Погрешность счетчика приходящаяся на один оборот диска выраженная в % будет $\Delta A\% = \frac{\Delta A}{N} 100\%$. По классу точности прибора эта погрешность должна быть не более $\Delta_{max} = \frac{C \cdot \alpha}{100\%}$

Порядок выполнения работы.

1. Собрать схему рис.1.4.2.
2. Пользуясь паспортными данными, приведенными на шкале счетчика, определить его постоянную C .
3. Произвести проверку правильности показаний счетчика по приборам амперметру, вольтметру и секундомеру для трех режимов его работы, соответствующих нагрузке при положении ключей: 1)- K_1 ; 2) - K_1 и K_2 ; 3) - K_1, K_2 и K_3 . Значения тока устанавливаются последовательным подключением резисторов R_1, R_2, R_3 . При изменении режима нагрузки напряжение при помощи автотрансформатора (ЛАТР) поддерживать равным номинальному значению, указанному на шкале счетчика (~ 220 В)

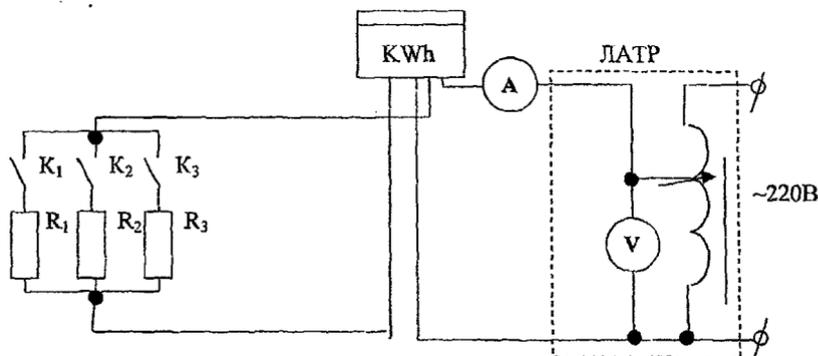


Рис. 1.4.2. Электрическая схема лабораторной установки.

4. Данные опыта занести в табл.

5. Сделать вывод.

Таблица

Измерено				Вычислено				
кол. обор.	t сек.	I А	U В	P Вт	A_0 Вт с	A Вт с	ΔA Втс	γ %
1								
5								
15								

Контрольные вопросы

1. В каких единицах измеряется мощность, энергия?
2. В чем состоит принцип проверки счетчика косвенным методом?
3. Объяснить устройство и принцип работы индукционного счетчика.
4. Какие погрешности допустимы для счетчиков данного класса при номинальной нагрузке?
5. Как определить постоянную счетчика?
6. Пояснить образование в счетчике моментов вращения и торможения.
7. Может ли быть абсолютная погрешность счетчика отрицательной?
8. Можно ли внести поправку в показания счетчика по результатам проверки?

ЛИТЕРАТУРА [1,3].

Цель работы: Анализ режимов работы потребителей в трехфазной цепи, соединенных по схеме “звезда”.

Краткие теоретические сведения

Большинство промышленных и даже бытовых электрических сетей – трехфазные, в которых отдельные фазы цепи электрически связаны между собой. По разновидности этих связей схемы соединений могут быть “звезда” и “треугольник”.

Четырехпроводная трехфазная цепь при соединении “звезда” фазных обмоток генератора, и приемников представлена на рис. 1.5.1. Концы фазных обмоток генератора объединяют в одну точку N , называемой нейтральной точкой генератора. Соответственно концы приемников отдельных фаз объединяют в точку n , называемую нейтральной точкой приемников. Трехфазный генератор соединяют с нагрузкой четырьмя проводами.

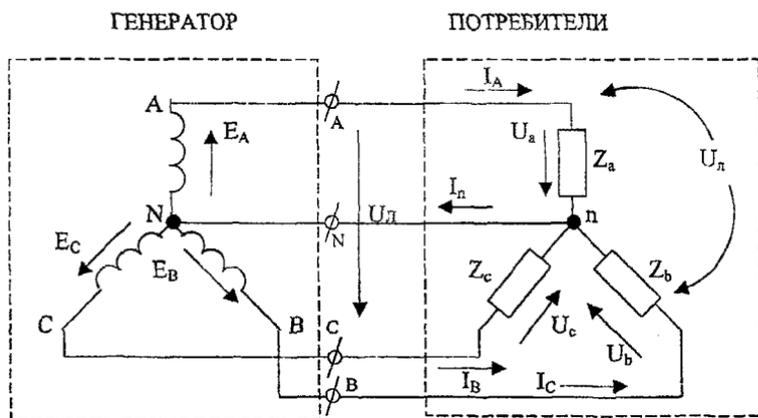


Рис. 1.5.1. Электрическая схема трехфазной цепи “звезда” с нулевым проводом.

Провод, соединяющий нейтральные точки генератора и нагрузки называется нулевым, остальные провода – линейными. Напряжения и токи, имеющие место в фазных обмотках генератора или нагрузки, называют фазными. Токи в линейных проводах и напряжения между ними называют линейными. Исходя из структуры схемы “звезда” $I_{л} = I_{\phi}$.

Комплексные сопротивления приемников в показательной форме можно представить в виде: $\underline{Z}_a = Z_a \cdot e^{j\varphi_a}$; $\underline{Z}_b = Z_b \cdot e^{j\varphi_b}$; $\underline{Z}_c = Z_c \cdot e^{j\varphi_c}$. Приемники, имеющие одинаковые по модулю ($Z_a = Z_b = Z_c = Z$) и по характеру ($\varphi_a = \varphi_b = \varphi_c = \varphi$) сопротивления, создают для генератора и между собой так называемую симметричную нагрузку. Условие симметричности нагрузки: $\underline{Z}_a = \underline{Z}_b = \underline{Z}_c = Z \cdot e^{j\varphi}$. Нагрузка, распределенная между фазами одинаково по величине ($Z_a = Z_b = Z_c$) называется равномерной. Нагрузка в фазах одинаковая по характеру ($\varphi_a = \varphi_b = \varphi_c$) называется однородной.

Для анализа режимов работы потребителей и электрической цепи в целом, по результатам расчета (измерений) ее параметров, строится векторная диаграмма напряжений и токов на потребителях. При этом, для практических целей, потерями

напряжений в линии электропередачи пренебрегают, в виду их малости (не более 5%), т.е. поэтому для четырёхпроводной цепи: $\dot{E}_A \approx \dot{U}_a$; $\dot{E}_B \approx \dot{U}_b$; $\dot{E}_C \approx \dot{U}_c$. Для сложных цепей однофазного тока, а также для трехфазных цепей удобнее пользоваться, так называемыми, топографическими векторными диаграммами, в которых устанавливается однозначное соответствие между одноименными точками электрической цепи и векторной диаграммой. Обычно векторная диаграмма строится в следующей последовательности: $U\phi \rightarrow U_l \rightarrow I\phi \rightarrow I_o$.

Известно, что вектора фазных напряжений имеют одинаковую амплитуду, частоту и сдвинуты по фазе на угол 120° : $\dot{U}_a = U_a \cdot e^{j90^\circ}$; $\dot{U}_b = U_a \cdot e^{-j30^\circ}$; $\dot{U}_c = U_a \cdot e^{-j150^\circ}$. Построим их в заданном масштабе. $M_U \dots \frac{B}{\text{см}}$. Вектора линейных напряжений определим по уравнениям, составленным по второму закону Кирхгофа $\dot{U}_{ab} = \dot{U}_a - \dot{U}_b$; $\dot{U}_{bc} = \dot{U}_b - \dot{U}_c$; $\dot{U}_{ca} = \dot{U}_c - \dot{U}_a$.

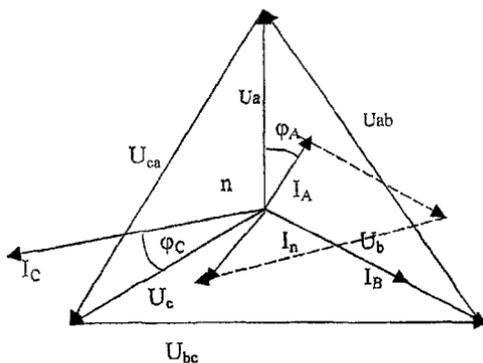


Рис. 1.5.2. Векторная диаграмма для схемы "звезда" с нулевым проводом.

Из рассмотрения треугольников напряжений, выраженных уравнениями Кирхгофа, следует $U_n = \sqrt{3}U_\phi$. Симметрия и стабильность линейных напряжений электрической цепи обеспечивается источниками электрической энергии и является гарантией нормальной работы цепи и потребителей. (Постоянство уровня напряжения является также важнейшей характеристикой качества электрической энергии). Положение векторов тока зависит от величины и характера нагрузки в фазах. Примем, следующие нагрузки: $Z_a = R_a + jX_{La}$ - активно-индуктивная, $\varphi_a > 0$. $Z_b = R_b$ - активная, $\varphi_b = 0$. $Z_c = R_c - jX_{Cc}$ - активно-емкостная, $\varphi_c < 0$. При этом пусть $Z_a > Z_b > Z_c$. Тогда $i_A = \frac{\dot{U}_a}{Z_a}$; $i_B = \frac{\dot{U}_b}{Z_b}$; $i_C = \frac{\dot{U}_c}{Z_c}$. Построим эти вектора

в принятом масштабе $M_I \dots \frac{A}{\text{см}}$;

(Если векторная диаграмма строится вне координатной сетки, то положение векторов тока относительно одноименных векторов фазных напряжений определяется углами $\varphi_{\phi_i} = \arctg \frac{X_i}{R_i} \neq 0$, т.к. $\varphi_i = \varphi_{ni} - \varphi_{\phi_i}$ (рис. 1.5.2), а ток нулевого провода определяется из уравнения Кирхгофа для узла n $i_n = i_A + i_B + i_C$. Для случая симметричной нагрузки, когда

$Z_a = Z_b = Z_c$, то $I_A = I_B = I_C$, а $I_n = 0$, необходимость в нулевом проводе отпадает. Таким образом нулевой провод выравнивает потенциалы нейтральных точек N, п. при несимметричной нагрузке фаз. Использование трехпроводной звезды дает значительный экономический эффект за счет экономии материала проводов. Однако, в случае несимметричной нагрузки, режимы работы потребителей, по напряжению, изменяются. Действительно, при изменении сопротивления одной фазы, очевидно, изменится ток этой фазы, а с учетом первого закона Кирхгофа $I_A + I_B + I_C = 0$, изменяются токи и других фаз, что возможно только при изменении фазных напряжений: $\dot{U}'_a = \dot{U}_a - \dot{U}_{nN}$; $\dot{U}'_b = \dot{U}_b - \dot{U}_{nN}$; $\dot{U}'_c = \dot{U}_c - \dot{U}_{nN}$, где \dot{U}_{nN} - разность потенциалов между нейтральными точками генератора и потребителей, определяется в виде:

$$\dot{U}_{nN} = \frac{\dot{U}_a Y_a + \dot{U}_b Y_b + \dot{U}_c Y_c}{Y_a + Y_b + Y_c} \cdot (a), \text{ где } Y_i = \frac{1}{Z_i} - \text{комплекс полной проводимости } i - \text{ой}$$

фазы. Топографическая векторная диаграмма для трехпроводной "звезда" строится аналогично и в тех же масштабах, что и рис 1.5.2. Сначала строится векторная диаграмма напряжений (ЭДС) источника. Относительно точки N определяем положение точке п(a). Затем откладываем вектора фазных напряжений $\dot{U}'_a, \dot{U}'_b, \dot{U}'_c$, от точки п. Вектора линейных напряжений источника и потребителей остаются неизменными. Вектора токов откладываем относительно одноименных векторов напряжений $U'_{\varphi i}$ под углом $\varphi_i = \arctg \frac{X_i}{R_i}$.

Для принятых нагрузок векторная диаграмма для трехпроводной "звезды" представлена на рис. 1.5.3. Из векторной диаграммы следует, что потребители фаз а и в работают в режиме перенапряжения $U_a > U_A$; $U_b > U_B$, а потребители фазы С находятся в режиме пониженного напряжения $U_c < U_C$. Естественно, что нарушение режимов работы по напряжению существенно снижает технико-экономические показатели потребителей. Таким образом, явление перекоса фазных напряжений в трехпроводной "звезде" очень нежелательно и даже опасно. Трехпроводная "звезда" может использоваться только для симметричной нагрузки. Во избежание бесконтрольного перехода от четырехпроводной к трехпроводной "звезде", при несимметричной нагрузке, (что чаще всего бывает) плавкие предохранители и другие виды защиты в нулевой провод не ставят.

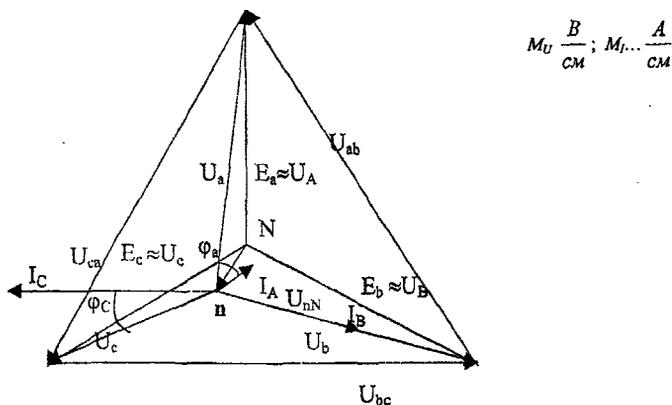


Рис. 1.5.3. Векторная диаграмма для трехпроводной "звезды".

Порядок выполнения работы

1. Собрать схему рис. 1.5.4.
2. Определить характер нагрузки в фазах цепи (рис. 1.5.4).
3. Включить нагрузку любых двух фаз с помощью ключей K_1 . Нагрузку третьей фазы изменять последовательно от холостого хода до максимальной (включены оба ключа). Для всех трех режимов записать параметры, указанные в табл. 1.5.1

- ПРИМЕЧАНИЕ: 1. Параметры нагрузочных резисторов имеют разброс в пределах $\pm 5\%$ от номинала.
2. Все измерительные приборы имеют погрешность прибора согласно его класса точности, а также погрешность измерений.
 3. Результаты измерений необходимо фиксировать с учетом погрешностей измерений, т.е. фиксировать различие результатов измерений только превышающие погрешности, а также заведомо малые результаты измерения отдельных параметров, например U_{Nn} .
 4. По данным табл. 1.5.1 построить (в масштабах, позволяющих различать все вектора), совмещенные топографические диаграммы напряжений и токов, для четырехпроводной "звезды".
 5. Тумблером K_7 разомкнуть нулевой провод. Изменяя нагрузку одной фазы аналогично п.3 снять измерения согласно табл. 1.5.2.
 6. По данным табл. 1.5.2 построить топографическую диаграмму аналогично п.4 для трехпроводной "звезды" в тех же масштабах.
 7. Несмотря на предположения; $E_A \approx U_A$; $E_B \approx U_B$; $E_C \approx U_C$, все напряжения $U_{\Phi i}$; $U_{\Delta i}$; измерять только на нагрузках.

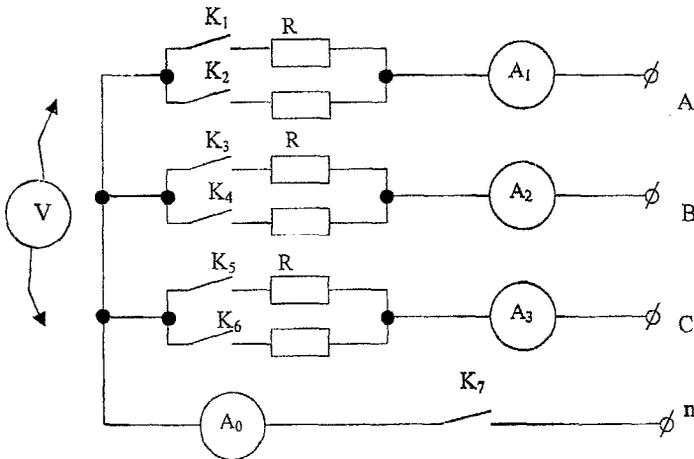


Рис. 1.5.4. Электрическая схема лабораторной установки.

Таблица 1.5.1

измеряем. величина	I_A [A]	I_B [A]	I_C [A]	I_n [A]	U_a [В]	U_b [В]	U_c [В]	U_{ab} [В]	U_{bc} [В]	U_{ca} [В]
режим работы потреб.										
холостой ход одной фазы										
неравномерная нагрузка фаз										
симметричная нагрузка фаз										

Таблица 1.5.2

измер. велич.	I_A [A]	I_B [A]	I_C [A]	I_n [A]	U_a [В]	U_b [В]	U_c [В]	U_{ab} [В]	U_{bc} [В]	U_{ca} [В]	U_{nN} [В]
режим работы потреб.											
холостой ход одной фазы											
неравномерная нагрузка фаз											
симметричная нагрузка фаз											

Контрольные вопросы

1. Какие напряжения называются фазными, линейными?
2. Покажите, что $I_n = I_\phi$; $U_n = \sqrt{3}U_\phi$ при соединении приемников "звездой". В каких случаях эти соотношения справедливы?
3. Когда применяются схемы "звезда" с нулевым проводом и без него?
4. Как изменяется режим работы потребителей в трехпроводной "звезде" при несимметричной нагрузке?
5. Почему не ставят плавкий предохранитель в нулевой провод?
6. Как влияет на фазные напряжения изменение нагрузки одной фазы?
7. Как определить величину и фазу тока в нулевом проводе?

ЛИТЕРАТУРА: [1,3].

РАБОТА № 1.6. ИССЛЕДОВАНИЕ ТРЕХФАЗНОЙ ЦЕПИ С СОЕДИНЕНИЕМ ПОТРЕБИТЕЛЕЙ ПО СХЕМЕ ТРЕУГОЛЬНИК.

Цель работы: Анализ режимов работы потребителей в трехфазной цепи, соединенных по схеме "треугольник".

Краткие теоретические сведения.

Треугольником называется такое соединение, при котором конец обмотки одной фазы потребителя соединяется с началом обмотки другой фазы (рис. 1.6.1.). По линейным проводам проходят линейные токи I_A, I_B, I_C ; по обмоткам нагрузки проходят фазные токи I_{ab}, I_{bc}, I_{ca} . Условно положительные направления токов обозначены на схеме рис. 1.6.1.

Напряжение между линейными проводами называются линейным - U_L , напряжение на обмотке потребителя, фазным - U_ϕ , которые для схемы соединения "треугольник" тождественно равны $U_L=U_\phi$. Соотношение линейных и фазных токов определяются из уравнений, составленных по первому закону Кирхгофа для узлов а, b, c (рис. 1.6.1.) $I_A = I_{ab} - I_{ca}$; $I_B = I_{bc} - I_{ab}$; $I_C = I_{ca} - I_{bc}$;

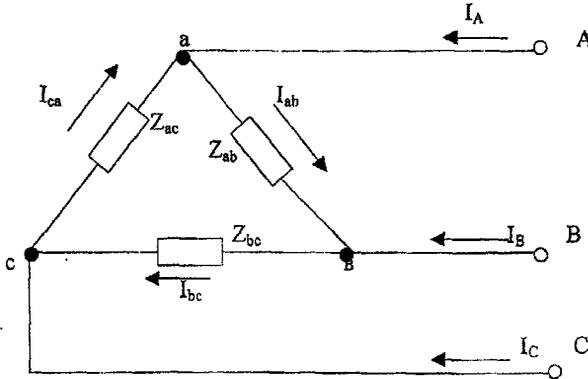


Рис. 1.6.1. Соединение потребителей по схеме "треугольник".

Топографическая векторная диаграмма для схемы "треугольник" строим в последовательности $U \rightarrow I_\phi \rightarrow I_L$. Совокупность векторов линейных напряжений, взаимосвязанные согласно второго закона Кирхгофа, образуют симметричную систему равновеликих векторов со сдвигом по фазе на 120° (отсчет ведется от положительных направлений): $\dot{U}_{ab} + \dot{U}_{bc} + \dot{U}_{ca} = 0$. Вектора фазных токов определяются величиной и характером нагрузки: $\dot{I}_i = \frac{U}{Z_i}$. Очевидно, что сдвиг по фазе $\varphi_i = \arctg(\frac{X_i}{R_i})$ или $\varphi_i = \varphi_{\text{иг}} - \varphi_{\text{п}}$.

При этом $\varphi_i > 0$ или $\varphi_i < 0$ в зависимости от характера нагрузки. Примем следующие нагрузки: в фазе ab - активно-индуктивная, $\varphi_{ab} > 0$; в фазе bc - активно-емкостная, $\varphi_{bc} < 0$; в фазе ca - активная, $\varphi_{ca} = 0$.

На рис. 1.6.2. представлены топографическая векторная диаграмма для режима несимметричной нагрузки ($Z_{ab} \neq Z_{bc} \neq Z_{ca}$). При этом $Z_{ab} = Z_{bc} = Z_{ca}$, т.е. распределение

нагрузки равномерное, но неоднородное. При симметричной нагрузке $Z_{ab} = Z_{bc} = Z_{ca}$, треугольники токов на векторной диаграмме будут равнобедренные, так как фазные токи равны $I_{ab} = I_{bc} = I_{ca}$, откуда следует, что $I_{\text{лн}} = \sqrt{3}I_{\text{фз}}$. При изменении величины нагрузки в одной из фаз изменяется ее фазный ток и линейные токи смежных фаз (см. уравнения токов). Напряжения всегда остаются неизменными.

$$M_U = \dots \frac{B}{\text{см}}; M_I = \dots \frac{A}{\text{см}}$$

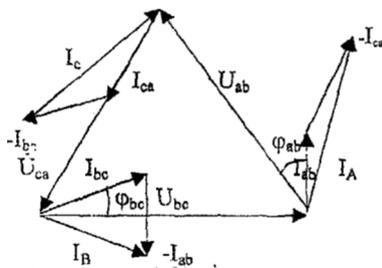


Рис. 1.6.2. Топографическая векторная диаграмма для схемы "треугольник".

Порядок выполнения работы

1. Собрать схему (рис. 1.6.3).
2. Определить характер нагрузки в фазах цепи (рис. 1.6.3).
3. Изменяя нагрузку фазы не от режима холостого хода до максимальной (ключи K1 и K2 включены), измерить токи и напряжения согласно табл.
4. Разомкнуть ключ K1 при симметричной нагрузке (ключи K1, K2 замкнуты). Измерить токи и напряжения согласно табл.
5. По результатам измерений, в принятых масштабах, по току и напряжению, построить совмещенную топографическую диаграмму для всех случаев нагружения, кроме обрыва линейного провода (K3 отключен).

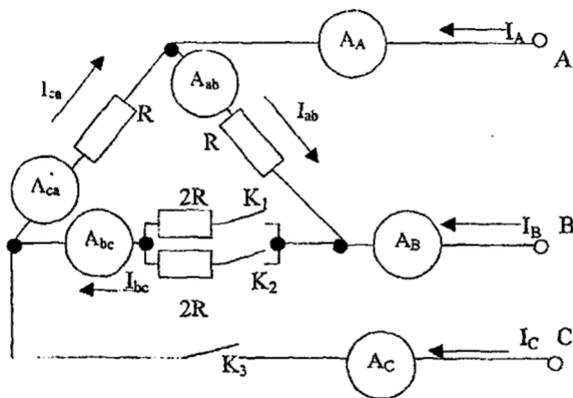


Рис. 1.6.3. Электрическая схема лабораторной установки.

Таблица

измеряемые величины режим ра- боты потребителей	I_A (А)	I_B (А)	I_C (А)	I_{ab} (А)	I_{bc} (А)	I_{ca} (А)	U_{ab} (В)	U_{bc} (В)	U_{ca} (В)
холостой ход одной фазы									
неравномерная нагрузка (один ключ вкл)									
симметричная нагрузка (K_1 и K_2 включены)									
обрыв лин. провод. (K_3 - отключен)									

Контрольные вопросы

1. В каком случае приемники включаются по схеме "треугольник"?
2. По каким признакам выбирается схема включения "звезда" или "треугольник"?
3. Как влияет изменение нагрузки одной фазы на режим работы потребителей других фаз при схеме "треугольник"?
4. Как влияет на режим работы потребителей отключение одной, двух фаз?
5. Достоинства и недостатки схемы "треугольник"?

ЛИТЕРАТУРА: [1,2,3]

Цель работы : Ознакомление с методами измерения мощности трехфазных цепей.

Краткие теоретические сведения.

Измерить активную мощность в цепях трехфазного тока можно различными способами . Например , для измерения мощности при симметричной нагрузке фаз достаточно измерить активную мощность , потребляемую одной фазой приемника , а для определения суммарной активной Р мощности трехфазного потребителя, результат необходимо утроить. В этом случае достаточно иметь один ваттметр, включенный на ток I_{ϕ} и напряжение U_{ϕ} одной фазы. Показания одного ваттметра определяются выражением $P_{\phi} = I_{\phi} U_{\phi} \cos \varphi_{\phi}$, а суммарная мощность трехфазной цепи:

$$P = 3P_{\phi} = 3I_{\phi} U_{\phi} \cos \varphi_{\phi} = \sqrt{3} I_{\phi} U_{\phi} \cos \varphi$$

В трехфазных цепях, с несимметричной нагрузкой фаз потребителя, такой способ определения активной мощности является непригодным. Основным методом измерения активной мощности в трехфазных трехпроводных (без нулевого провода!) цепях является схема двух ваттметров (рис.1.0.11).

Можно показать, что ваттметры, включенные таким образом, учитывают суммарную активную мощность трехфазного потребителя независимо от несимметричной нагрузки. Так при соединении потребителя , например , в "звезду" мгновенные значения мощностей p_1 и p_2 в любой момент времени, определяются выражениями: $p_1 = u_{ab} i_A$ (1) $p_2 = u_{cb} i_C$ (2), где i_1 и i_2 -мгновенные значения токов первой и третьей фаз, в которые включены токовые обмотки ваттметров; u_{ab} и u_{cb} -мгновенные значения линейных напряжений, поданных на обмотки напряжения ваттметров . Просуммируем левые и правые части выражений (1) и (2) после соответствующих преобразований получим, что:

$$p_1 + p_2 = u_{ab} i_A + u_{cb} i_C = (u_a - u_b) i_A + (u_c - u_b) i_C = u_a i_A + u_b (-i_A - i_C) + u_c i_C = p_a + p_b + p_c$$

где $(-i_A - i_C) = i_b$, так как согласно первому закону Кирхгофа для нейтральной точки потребителя $i_A + i_b + i_C = 0$, мгновенные значения мощностей фаз приемников будут $p_a = u_a i_A$; $p_b = u_b i_b$; $p_c = u_c i_C$. Аналогичное доказательство можно привести и для потребителя, соединенного в "треугольник".

Уравнение (3) при переходе к действующим значениям примет следующий вид :

$$P = W_1 + W_2 = I_1 U_{ab} \cos(\varphi_{ab} - \varphi_{I_1}) + I_2 U_{cb} \cos(\varphi_{cb} - \varphi_{I_2})$$

Алгебраическая сумма показаний двух ваттметров дает мощность всей трехфазной цепи, но сам способ включения носит искусственный характер. Деление всей мощности между показаниями ваттметров, в связи со степенью несимметрии нагрузки, не имеет значения, а зависит от величины и знака угла сдвига фаз между током и напряжением φ . Определим зависимость показаний ваттметров от угла сдвига фаз φ .

Для упрощения будем считать нагрузку активной и равномерной ($I_1=I_2=I_3$ и $U_{ca}=U_{ab}=U_{bc}=U_{\phi}$). Углы между векторами U_{ab} и I_A , U_{cb} и I_C найдем из векторной диаграммы (рис.1.7.1). $\overline{U_{ab} I_A} = \varphi + 30^\circ$; $\overline{U_{cb} I_C} = \varphi - 30^\circ$, где φ - угол сдвига фаз между соответствующими векторами фазных напряжений и токов; 30° - угол между линейными и фазным напряжениями. Уравнение примет вид:

$$P = U_{ab} I_A \cos(\varphi + 30^\circ) + U_{cb} I_C \cos(\varphi - 30^\circ) = U_{\phi} I_{\phi} \cos(\varphi + 30^\circ) + U_{\phi} I_{\phi} \cos(\varphi - 30^\circ) \quad [14]$$

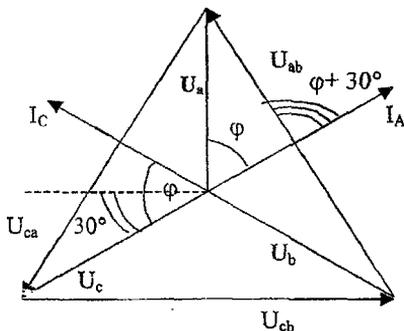


Рис.1.7.1. Векторная диаграмма цепи

Откуда видно, что показания обоих ваттметров равны между собой только при $\varphi = 0$ (т.е. при чисто активной нагрузке) рис.1.0.13. При индуктивной нагрузке $\varphi > 0$ показания ваттметров будут различны , причем при значении $\varphi = 60$ первый ваттметр покажет нуль, а второй ваттметр – всю мощность трехфазной системы. При индуктивной нагрузке, когда $\varphi > 60$, показания первого ваттметра становятся отрицательными, его стрелка отклоняется влево от нуля. Для отсчета показаний необходимо изменить направление тока в одной из обмоток прибора (т.е. переключить зажимы обмотки тока или обмотки напряжения). После такого переключения стрелка прибора будет отклоняться вправо от нуля, но показания ваттметра необходимо считать отрицательными и определять суммарную мощность, как $P = P_{W1} + P_{W2}$.

Таким образом, суммарная мощность в трехфазной системе (трехпроводной) определяется алгебраической суммой показаний обоих ваттметров. Так как

$$P = P_{W1} + P_{W2} = \sqrt{3} U_{ЛЛ} I_{Л} \cos \varphi, \text{ а } P_{W1} - P_{W2} = U_{ЛЛ} I_{Л} \sin \varphi = \frac{Q}{\sqrt{3}}, \text{ то } \operatorname{tg} \varphi = \frac{Q}{P} = \sqrt{3} \frac{P_{W2} - P_{W1}}{P_{W2} + P_{W1}},$$

где $Q = \sqrt{3} U_{ЛЛ} I_{Л} \sin \varphi$ - реактивная мощность трехфазной цепи.

Для определения угла сдвига фаз между напряжениями и токами можно пользоваться также соотношением $\varphi = \arccos \frac{P_{W2} - P_{W1}}{\sqrt{3} U_{ЛЛ} I_{Л}}$.

Для измерения активной мощности при неравномерной нагрузке в четырёхпроводной системе трехфазного тока необходимо измерить мощность, потребляемую каждой фазой приемника. С этой целью в цепь включаются три ваттметра таким образом, чтобы каждый из них измерил мощность одной фазы. Общая активная мощность получается суммированием показаний ваттметров. Иначе активную мощность можно измерить трехфазным ваттметром.

Порядок выполнения работы

1. Собрать схему (рис.1.7.2.)
2. Включить активную нагрузку (резисторы R_1) с помощью рубильника P_2 и записать показания измерительных приборов в табл.
3. Включить параллельно активной нагрузке индуктивную нагрузку с помощью рубильника P_1 и произвести те же измерения.
4. Произвести те же измерения при индуктивной нагрузке (резисторы R_1 отключить – рубильником P_2).

Учебное издание

Составители: Анатолий Васильевич Клопоцкий
Герман Николаевич Овсянников
Игорь Михайлович Панасюк

Методические указания

по выполнению лабораторных работ по курсам:
"Электрические сети", "Инженерные сети",
"Электротехника и основы электроники",
"Электротехника, электрические машины и аппараты"
для студентов специальностей
70.02.01, 70.04.03, 74.05.01, 70.01.01, 36.01.01.

Ответственный за выпуск: Овсянников Г.Н.
Редактор: Строкач Т.В.
Технический редактор: Никитчик А.Д.

Подписано к печати 07.09.2001г. Формат 60x84/16. Бумага писч. Усл.п.л.2,56
Уч. изд. л. 2,75 Заказ № 28. Тираж 200 экз. Отпечатано на ризографе
учреждения образования Брестского государственного технического универ-
ситета. 224017, г. Брест, ул. Московская, 267.