

**Министерство образования Республики Беларусь**  
**БЕЛОРУССКИЙ НАЦИОНАЛЬНЫЙ ТЕХНИЧЕСКИЙ УНИВЕРСИТЕТ**

Е.В. Журавкевич

**ИЗУЧЕНИЕ ОСНОВНЫХ ХАРАКТЕРИСТИК ПЕРЕМЕННОГО  
ЭЛЕКТРИЧЕСКОГО ТОКА**

Методические указания к лабораторной работе по физике  
для студентов строительных специальностей

*Учебное электронное издание*

Минск БНТУ 2009

УДК 537.862(075.8)

***Автор:***

Е.В. Журавкевич

***Рецензенты:***

В.И. Кудин, доцент кафедры «Техническая физика» БНТУ,  
кандидат физико-математических наук, доцент;  
Д.А. Русакевич, доцент кафедры «Техническая физика» БНТУ,  
кандидат технических наук, доцент

В методических указаниях рассмотрены физические основы получения переменного электрического тока: принцип работы генераторов переменного и постоянного тока, основные характеристики электрических цепей переменного тока

Белорусский национальный технический университет  
пр-т Независимости, 65, г. Минск, Республика Беларусь  
Тел (017) 292-77-52 факс (017) 292-91-37  
Регистрационный № БНТУ/ФЭС57 – 6.2009

© БНТУ, 2009

© Журавкевич Е.В., 2009

© Журавкевич Е.В., компьютерный дизайн, 2009

## Оглавление

1.Переменный ток. Генератор переменного тока.....	4
1.1 Генератор постоянного тока.....	6
2.Получение трехфазного тока.....	7
2.1 Соединение треугольником.....	8
2.2 Соединение звездой.....	9
3.Электрические цепи переменного тока.....	9
3.1 Индуктивное сопротивление.....	11
3.2 Емкостное сопротивление.....	14
3.3 Индуктивность, емкость и активное сопротивление.....	17
4.Контрольные задания и вопросы.....	20
<i>Литература</i> .....	21

**Цель работы:** изучить принципы получения и основные характеристики переменного электрического тока.

### 1. Переменный ток. Генератор переменного тока

Устройства, вырабатывающие переменный электрический ток путем преобразования механической энергии в электрическую, называются генераторами. Их действие основано на явлении электромагнитной индукции.

Явление электромагнитной индукции состоит в том, что в проводящем контуре, находящемся в переменном магнитном поле, возникает электродвижущая сила индукции  $\mathcal{E}_i$ . Если контур замкнут, то в нем возникает электрический ток, называемый индукционным током. Э.д.с. индукции  $\mathcal{E}_i$  измеряется в вольтах. Для простоты изложения можно э.д.с. индукции представлять как индукционное напряжение в проводящем контуре.

Для получения индукционного напряжения используется вращающийся в однородном магнитном поле проводящий виток (рис. 1), причем индукционное напряжение не является постоянным, а зависит от положения витка в магнитном поле.

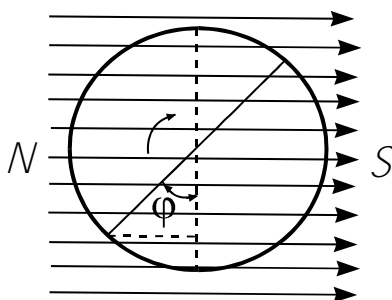


Рис. 1. Вращающийся виток в магнитном поле

Возникающее в витке напряжение пропорционально изменению скорости магнитного потока, и согласно закону электромагнитной индукции равно

$$U = - \frac{\Delta\Phi}{\Delta t} , \quad (1)$$

причем магнитный поток, проходящий через вращающийся виток, пропорционален площади поперечного сечения витка  $S$  и углу поворота  $\varphi$ .

Следовательно, если имеется  $N$  витков, индукционное напряжение в такой катушке, вращающейся в однородном магнитном поле с индукцией  $B$ , можно представить в виде

$$U = -\frac{d\Phi}{dt} \cdot N = \frac{d(NBS \cdot \cos \varphi)}{dt} = \frac{d(NBS \cdot \cos \omega t)}{dt}$$

или

$$U = (NBS \cdot \sin \omega t), \quad (2)$$

где  $\omega$  – угловая частота вращения катушки;

$t$  – время вращения катушки.

Из формулы (2) видно, что индукционное напряжение в катушке изменяется по закону синуса. Это означает, что за период оно дважды изменяет свой знак. Следовательно, оно является переменным напряжением, что и показано на рис. 2.

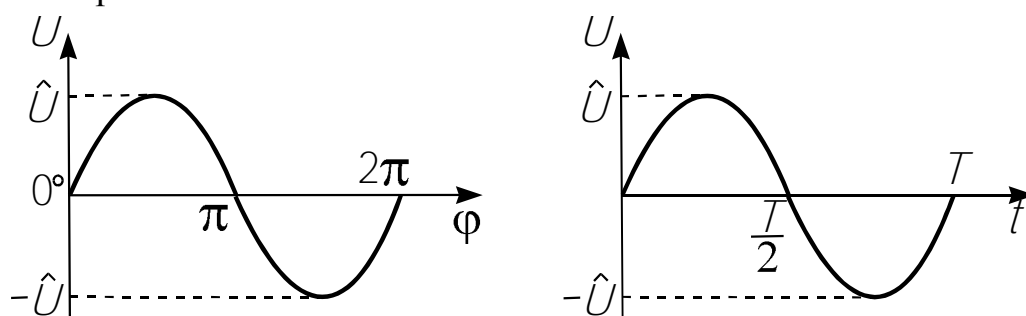


Рис. 2. Переменное напряжение, возникающее в катушке.

Максимальное значение индукционного напряжения в катушке определяется формулой

$$\hat{U} = NBS\omega. \quad (3)$$

Мгновенное напряжение в катушке (т.е. напряжение в данный момент времени) можно представить в виде:

$$U = \hat{U} \sin \omega t = \hat{U} \sin 2\pi f t = \hat{U} \sin 2\pi \frac{t}{T}, \quad (4)$$

где  $f = \omega/2\pi$  – линейная частота;

$T = 2\pi/\omega$  – период вращения катушки.

Если концы вращающейся катушки соединить с внешней электрической цепью (например, с внешним сопротивлением  $R$ ), возникнет электрический ток, сила которого также будет синусоидальной функцией времени, а знак (следовательно, и направление) в каждом периоде будет дважды изменяться (рис. 3).

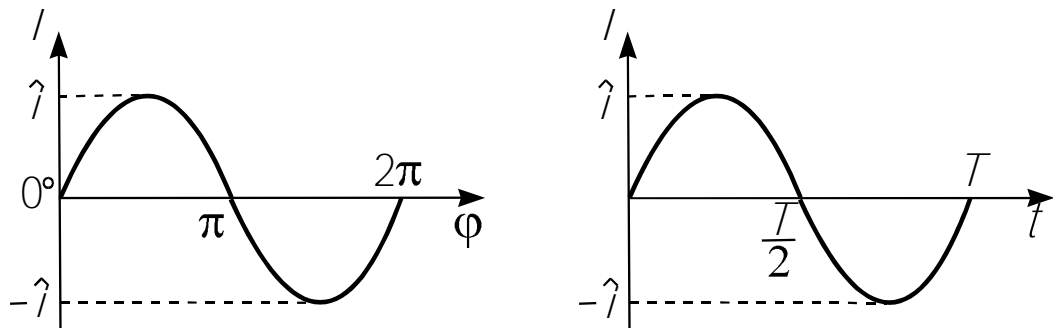


Рис. 3. Переменный ток, возникающий в рамке.

Следовательно, можно написать

$$i = \hat{i} \sin \omega t = \hat{i} \sin 2\pi f t = \hat{i} \sin 2\pi \frac{t}{T}. \quad (5)$$

Ток, определяемый таким образом, называют переменным током.

Каждый генератор переменного тока состоит из магнита, создающего магнитное поле, вращающейся проводящей катушки, а также скользящих колец (контактов) для соединения с внешней электрической цепью (рис. 4).

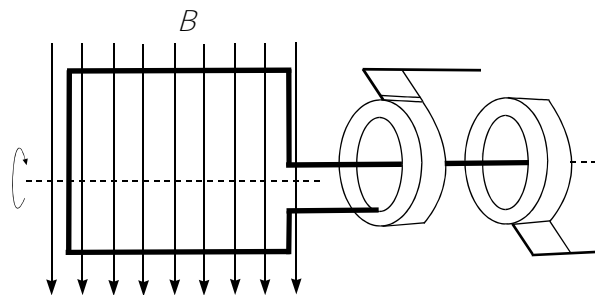


Рис. 4. Генератор переменного тока.

Для того чтобы получить высокое переменное напряжение, используется катушка с большим числом витков. Вращающаяся часть (например катушка) называется **ротор**, покоящаяся часть (например магнит) называется **статор**.

### 1.1 Генератор постоянного тока

Следует отметить, что принцип работы генератора постоянного тока соответствует принципу работы генератора переменного тока, однако вместо скользящих колец используются два изолированных полукольца (так называемый коммутатор). Задача коммутатора через каждую половину оборота катушки переключить (коммутировать) концы катушки (рис. 5).

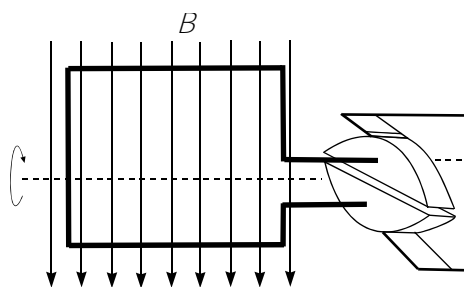


Рис. 5. Генератор постоянного тока.

При таком переключении получается напряжение, представленное на рис. 6.

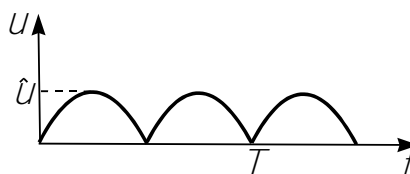


Рис. 6. Напряжение, вырабатываемое генератором постоянного тока.

Такой генератор, следовательно, дает пульсирующий ток, направление которого хотя и остается постоянным, но сила тока все-таки изменяется

## 2. Получение трехфазного тока

В промышленности используется трехфазная система переменных токов (или просто трехфазный ток). Вырабатывается такая система токов генератором трехфазного тока. Он также является генератором переменного тока, но имеет три одинаковых, геометрически сдвинутых друг относительно друга на  $120^\circ$  (градусов) катушки и создает соответственно сдвинутые на  $120^\circ$  переменные напряжения (рис. 7).

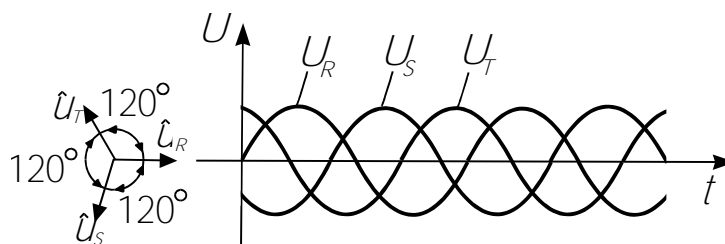


Рис. 7. Переменное напряжение в генераторе трехфазного тока.

Подключая катушки к внешней цепи, получают три переменных тока. Из сложения трех сдвинутых друг относительно друга на  $120^\circ$  напряжений

$$\widehat{U}[\sin \omega t + \sin(\omega t + 120^\circ) + \sin(\omega t - 120^\circ)] = 0 \quad (6)$$

следует, что алгебраическая сумма трех напряжений в каждый момент времени равна нулю.

При наличии трех катушек в генераторе, число проводов для соединения генератора с внешней электрической цепью равно шести. Однако их количество можно уменьшить. В связи с этим различают два основных способа включения генератора трехфазного тока в электрическую цепь.

### 2.1 Соединение треугольником

Как видно из рисунка 8, при таком соединении линейные напряжения (т.е. напряжения между проводами  $R, S, T$ ) равны между собой и равны напряжению на каждой катушке.

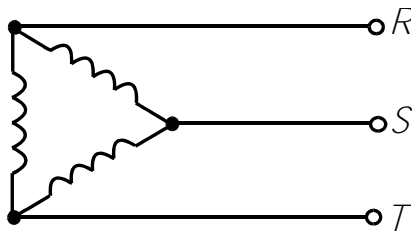


Рис. 8. Соединение треугольником.

Следовательно, можно написать

$$U_{RS} = U_{RT} = U_{ST} = U_{\Phi} , \quad (7)$$

где  $U_{\Phi}$  – напряжение на катушке, которое называют также фазовым напряжением.

Линейные токи (токи в каждом проводе) при этом также равны и связаны с фазовым током (ток в катушке) следующим соотношением:

$$I_R = I_S = I_T = \sqrt{3} \cdot I_{\Phi} , \quad (8)$$

где  $I_{\Phi}$  – фазовый ток.



## 2.2 Соединение звездой

В этом случае объединяют три провода, по одному от каждой катушки (рис. 9). Однако при таком соединении появляется так называемый нулевой провод.

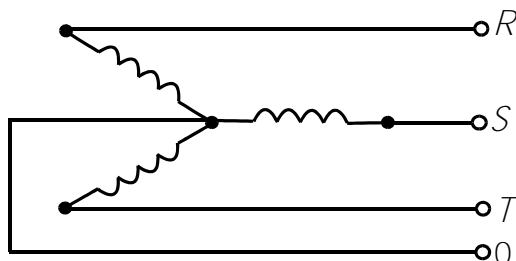


Рис. 9. Соединение звездой.

В этом случае справедливы соотношения:

$$U_{RS} = U_{RT} = U_{ST} = \sqrt{3} \cdot U_{\Phi} \quad (9)$$

и 
$$U_{RO} = U_{SO} = U_{TO} , \quad (10)$$

где  $U_{RO}, U_{SO}, U_{TO}$  – напряжения между проводами  $R, S, T$  и нулевым проводом (линейное напряжение);

$U_{\Phi}$  – фазовое напряжение.

Также выполняется соотношение

$$I_R = I_S = I_T = I_{\Phi} , \quad (11)$$

где  $I_R, I_S, I_T$  – линейные токи (т.е. токи в проводах  $R, S, T$ );

$I_{\Phi}$  – фазовый ток (т.е. ток в катушке).

Отметим, что эти соотношения как в случае 1, так и в случае 2 справедливы в том случае, если подключаемые нагрузки (например, сопротивления) на всех трех катушках одинаковы. При этом всегда ток в нулевом проводе будет равен нулю. Именно поэтому он называется нулевым проводом.

## 3. Электрические цепи переменного тока

Цепь переменного тока отличается от цепи постоянного тока прежде всего тем, что напряжение и ток в цепи переменного тока являются функ-

циями времени и соответственно периодически изменяются. В цепи переменного тока кроме омических сопротивлений дополнительно могут присутствовать индуктивное и емкостное сопротивления, поэтому напряжение и ток не могут достигать одновременно своих максимальных значений.

Отметим также, что для цепей переменного тока расчет работы и мощности тока напрямую по формулам для цепи постоянного тока, а именно работа

$$A = UI \cdot t = \frac{U^2 t}{R} = I^2 R t \quad (12)$$

и мощность

$$W = UI = \frac{U^2}{R} = I^2 R, \quad (13)$$

где  $U$  – напряжение в цепи постоянного тока;

$I$  – ток;

$t$  – время;

$R$  – омическое сопротивление в цепи постоянного тока,

требует применения мгновенных значений силы тока и напряжения. Естественно, что при этом получаются мгновенные значения (т.е. в данный момент времени) работы и мощности. Однако в реальности необходимо знать, например, не мгновенное значение мощности, а ее среднее значение за большой период времени, охватывающий много периодов колебаний тока. Для таких расчетов вводят так называемое эффективное значение тока и напряжения. Представление об эффективном значении тока дает рис. 10.

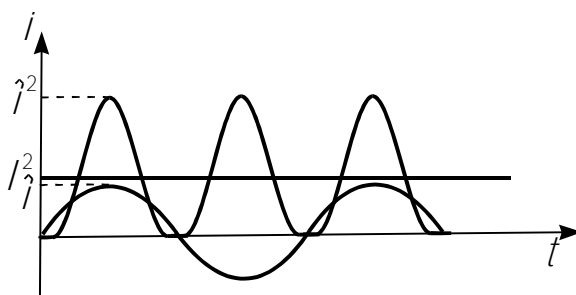


Рис. 10. Зависимости токов от времени в цепи переменного тока.

Как видно из рис. 10, квадрат эффективного значения тока может быть представлен

$$I^2 = \frac{\hat{i}}{\sqrt{2}} = 0,707 \hat{i} , \quad (14)$$

а после умножения этого выражения на сопротивление, получаем выражение для эффективного значения напряжения:

$$U = \frac{\hat{U}}{\sqrt{2}} = 0,707 \hat{U} . \quad (15)$$

Необходимо отметить, что выражения для эффективного значения тока и напряжения справедливы только для синусоидального переменного тока.

Выражение  $R = \rho \ l/S$  для расчета сопротивления проводника действительно и для постоянного, и для переменного токов. Сопротивление  $R$ , определяемое таким образом, называют омическим или активным сопротивлением. Причиной этого сопротивления электрическому току является структура (внутреннее строение), характеризуемая удельным сопротивлением  $\rho$ , а величина сопротивления определяется также и геометрическими факторами: длиной  $l$  и сечением  $S$ .

В цепи переменного тока дополнительно к омическому сопротивлению возможны еще так называемые реактивные сопротивления, оказываемые переменному току конденсаторами (емкостное сопротивление) и катушками индуктивности (индуктивное сопротивление). Эти устройства, в отличие от омического сопротивления, не превращают электрическую энергию в теплоту. Геометрическая сумма активных и реактивных сопротивлений в цепи переменного тока называется полным сопротивлением цепи переменного тока.

Рассмотрим действие реактивных сопротивлений в цепи переменного тока.

### 3.1 Индуктивное сопротивление

Основное действие индуктивности  $L$  в цепи – это замедление изменений тока со временем (например, при включении и выключении тока) вследствие возникновения электродвижущей силы самоиндукции, описываемой формулой

$$\mathcal{E}_{\text{самоинд}} = -L \frac{\Delta I}{\Delta t} . \quad (16)$$

Ток при наличии индуктивности в цепи достигает своего максимального значения всегда позже, чем напряжение, приложенное к катушке индуктивности

Для представленной на рис. 11 схемы предполагается, что активного сопротивления нет, т.е.  $R = 0$ .

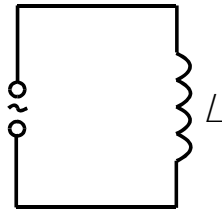


Рис. 11. Индуктивность в цепи переменного тока.

Выражение для тока соответствует уравнению (17)

$$i = \hat{i} \sin \omega t , \quad (17)$$

тогда приложенное к катушке напряжение равно

$$U = L \frac{di}{dt} = \frac{d(L \hat{i} \sin \omega t)}{dt} \quad \text{или}$$

$$U = \omega L \hat{i} \cos \omega t , \quad (18)$$

или это выражение можно представить в виде

$$U = \omega L \hat{i} \sin \left( \omega t + \frac{\pi}{2} \right) . \quad (19)$$

Сравнивая выражение для тока (17) и напряжения (19) можно утверждать, что между током и напряжением возникает разность фаз, равная  $+\pi/2$ .

Полученный результат можно проиллюстрировать на рис. 12 и сформулировать иными словами.

В каждой цепи переменного тока с индуктивностью  $L$  напряжение опережает ток на  $\pi / 2$  (или на  $T / 4$  соответственно).

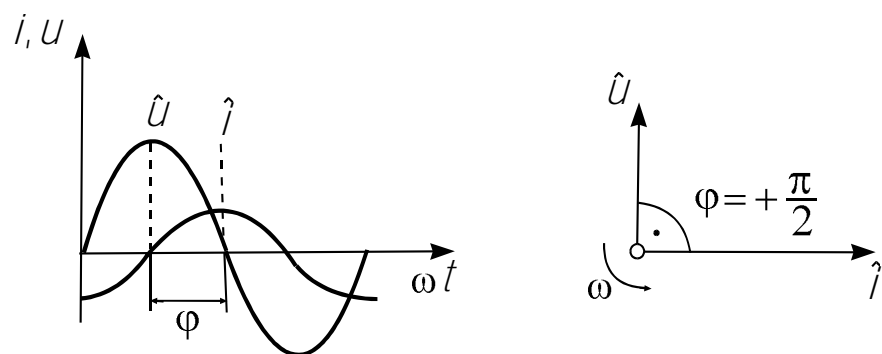


Рис. 12. Разность фаз между током и напряжением в цепи, содержащей индуктивность.

Необходимо помнить, что в векторных диаграммах вращение принимается против часовой стрелки с угловой скоростью  $\omega$ . Угол между вектором напряжения и вектором тока соответствует сдвигу фаз, т.е.

$$\varphi = \varphi_U - \varphi_i . \quad (20)$$

Максимальное значение напряжения на катушке равно

$$\hat{U} = \omega L \hat{i} . \quad (21)$$

Из сравнения с законом Ома  $U = IR$ , произведение  $\omega L$  можно представлять как сопротивление индуктивности переменному току. Это сопротивление называется индуктивным и обозначается

$$X_L = \omega L . \quad (22)$$

Необходимо отметить, что индуктивное сопротивление растет с увеличением частоты тока. Если в цепи переменного тока имеется только индуктивное сопротивление, то сила тока рассчитывается по формуле

$$I = \frac{U}{\omega L} . \quad (23)$$

### 3.2 Емкостное сопротивление

В цепи постоянного тока конденсатор представляет собой очень большое сопротивление. Однако при приложении к конденсатору переменного напряжения он периодически перезаряжается и в цепи протекает переменный ток (рис. 13).

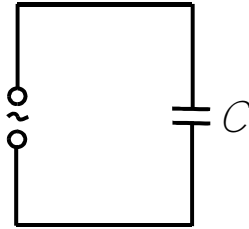


Рис. 13. Емкость в цепи переменного тока.

При этом напряжение на конденсаторе достигает своего максимального значения, когда ток в цепи становится нулевым. Для случая, когда активное сопротивление в цепи переменного тока равно нулю  $R = 0$ , приложенное к конденсатору напряжение равно

$$U = \frac{q}{C}, \quad (24)$$

где  $q$  – заряд на конденсаторе;  $C$  – емкость конденсатора.

Мгновенное значение тока при этом

$$i = \frac{dq}{dt} = \frac{C dU}{dt} = C \frac{d(\hat{U} \sin \omega t)}{dt}. \quad (25)$$

Отсюда следует  $i = \omega C \hat{U} \cos \omega t$  и соответственно

$$i = \omega C \hat{U} \sin \left( \omega t + \frac{\pi}{2} \right). \quad (26)$$

Сравнивая напряжение на конденсаторе  $U = \hat{U} \sin \omega t$  и полученное выражение для тока  $i = \omega C \hat{U} \sin \left( \omega t + \frac{\pi}{2} \right)$  можно утверждать, что между напряжением и током в цепи, содержащей конденсатор, возникает разность фаз  $\left( -\frac{\pi}{2} \right)$ , рис. 14.

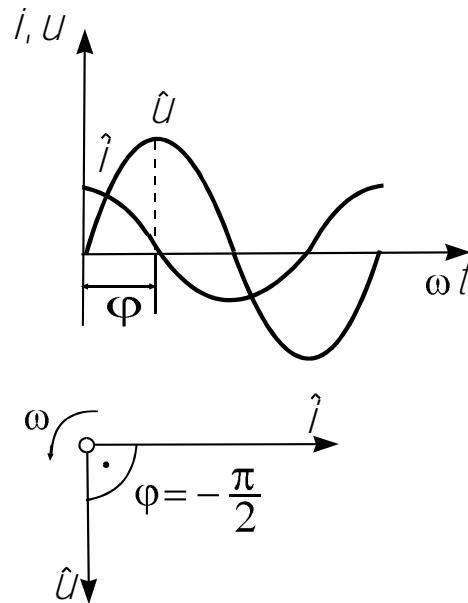


Рис. 14. Разность фаз между током и напряжением в цепи, содержащей емкость

Или другими словами: в каждой цепи переменного тока с конденсатором, ток опережает напряжение на  $\pi/2$  (или на  $T/4$  соответственно).

Максимальное значение тока при этом

$$\hat{i} = \omega C \hat{U} . \quad (27)$$

Сравнивая это выражение с законом Ома  $U = RI$  видно, что емкость действует как сопротивление и можно записать, что это сопротивление определяется выражением

$$X_C = \frac{1}{\omega C} . \quad (28)$$

Отметим, что емкостное сопротивление уменьшается с увеличением частоты тока.

При наличии в цепи только емкостного сопротивления ток определяется как

$$I = U \omega C . \quad (29)$$

На практике цепь переменного тока может включать в себя одновременно и емкостное и индуктивное сопротивления. Для таких случаев существуют особые правила нахождения общего сопротивления цепи переменного тока.

Рассмотрим случай, когда индуктивность и емкость включены в цепь последовательно (рис. 15).

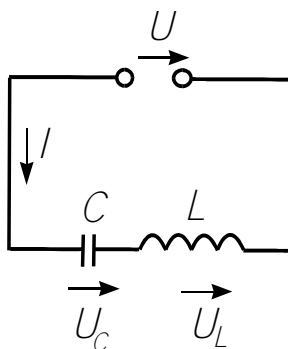


Рис. 15. Электрическая цепь, содержащая емкость и индуктивность, включенные последовательно.

Общее сопротивление такой цепи определяется следующим образом:

$$X = X_L - X_C = \omega L - \frac{1}{\omega C} \quad (30)$$

и напряжение в цепи равно

$$U = U_L - U_C = IX_L - IX_C = IX, \quad (31)$$

где  $X$  – общее сопротивление цепи;

$X_L$  – индуктивное сопротивление;

$X_C$  – емкостное сопротивление;

$U_L$  – напряжение на катушке индуктивности;

$U_C$  – напряжение на конденсаторе;

$I$  – ток в цепи.

Рассмотрим случай, когда индуктивность и емкость включены в цепь параллельно (рис. 16).



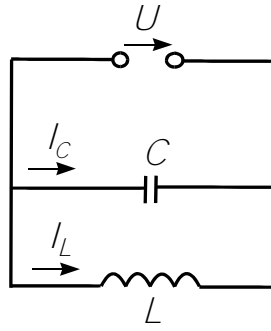


Рис. 16. Электрическая цепь, содержащая емкость и индуктивность, включенные параллельно

Общее сопротивление цепи в этом случае определяется следующим образом:

$$\frac{1}{X} = \frac{1}{X_C} - \frac{1}{X_L} = \omega C - \frac{1}{\omega L} \quad (32)$$

или 
$$X = \frac{\omega L}{\omega^2 L \cdot C - 1}, \quad (33)$$

а ток в цепи

$$I = I_C - I_L = \frac{U}{X_C} - \frac{U}{X_L} = \frac{U}{X}. \quad (34)$$

### 3.3 Индуктивность, емкость и активное сопротивление

Рассмотрим также случай, когда в цепь включены последовательно индуктивность  $L$ , емкость  $C$  и активное сопротивление  $R$  (рис. 17).

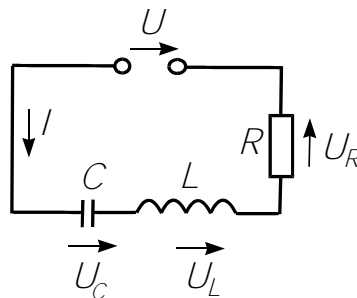


Рис. 17. Электрическая цепь, содержащая емкость, сопротивление и индуктивность, включенные последовательно.

При таком включении общее сопротивление цепи  $Z$  является геометрической суммой активного сопротивления  $R$  и общего реактивного сопротивления  $X = X_L - X_C$  (рис. 18).

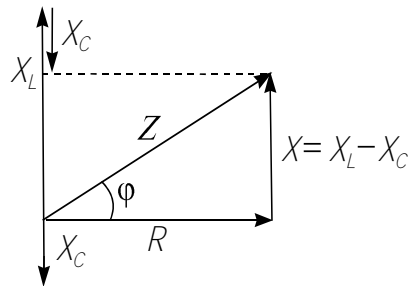


Рис. 18. Диаграмма сопротивлений.

Следовательно, можно написать

$$Z = \sqrt{R^2 + X^2}, \quad (35)$$

а напряжение в такой цепи, как следует из рис. 19, можно определить по следующей формуле:

$$U = \sqrt{U_R^2 + U_X^2} = I \cdot Z, \quad (36)$$

где  $I$  – общий ток в цепи.

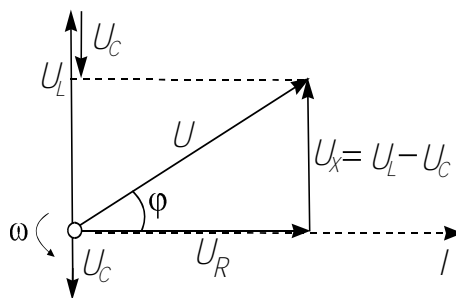


Рис. 19. Диаграмма напряжений.

Рассмотрим также расчет мощности, выделяемой на активном сопротивлении в такой цепи переменным током. Как уже известно, в такой цепи между током и напряжением существует разность фаз (рис. 20).

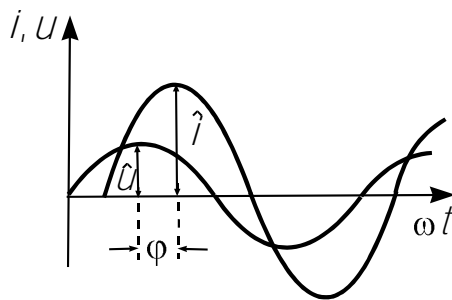


Рис. 20. Разность фаз между током и напряжением.

На векторной диаграмме это угол между напряжением и током (рис. 21).

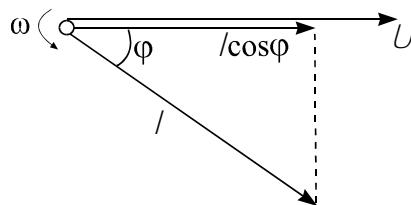


Рис. 21. Диаграмма зависимости  $\cos\varphi$  от сдвига фаз между током и напряжением.

Для нахождения активной мощности переменного тока необходимо использовать проекцию вектора тока  $I \cos\varphi$  на направление вектора напряжения. Тогда активная мощность, выделяемая в такой цепи переменным током, рассчитывается по формуле

$$W = UI \cdot \cos\varphi . \quad (37)$$

Множитель  $\cos\varphi$  называют коэффициентом мощности. Формула определения мощности показывает, что в общем случае при наличии в цепи реактивных сопротивлений, выделяемая на активном сопротивлении мощность зависит не только от силы тока и напряжения, как это происходит в цепи постоянного тока, но и от сдвига фаз между током и напряжением.

#### 4. **Контрольные задания и вопросы**

1. Дайте определение переменного тока.
2. В чем заключается принцип действия генератора переменного тока?
3. Принцип получения трехфазного тока.
4. Соединения «звездой» и «треугольником» в цепи трехфазного тока.
5. Как действуют в цепи переменного тока сопротивление, емкость и индуктивность?
6. Как найти активную мощность в цепи переменного тока?

### *Литература*

1. Наркевич, И.И. Физика для вузов: в 2 т. / И.И.Наркевич, Э.И.Волмянский, С.И.Лобко. – Мн.: Высшая школа, 1994. – Т.2.
2. Детлаф, А.А. Курс физики / А.А.Детлаф, Б.М.Яворский. – М. – Высшая школа, 2001-2002.
3. Савельев, И.В. Курс общей физики / И.В.Савельев. – М.: Астрель АСТ, 2002.