

Московский государственный строительный
университет



Кафедра автоматизации и электроснабжения

ЭЛЕКТРОТЕХНИКА

Часть 1. Электрические и магнитные цепи. Электрические измерения

Лекция 6. Трехфазные цепи при соединении электроприемников треугольником

Электронные лекции

Составитель:

доцент И.Г. Забора

Москва – 2016 г.

Лекцию читает

доцент кафедры

«Автоматизация и электроснабжение» МГСУ

Забора Игорь Георгиевич

E-mail: izabora@yandex.ru



Трехфазные цепи – треугольник

Основные соотношения для цепи – треугольник

Фазы трехфазной цепи при соединении фаз *треугольником* обозначают парами букв латинского алфавита: **AB**, **BC**, **CA** в соответствии с парами линий, к которым они присоединены. Индексы фазных величин (фазные токи, напряжения, мощности, сопротивления и др.) имеют те же пары букв.

На рис. 1 представлены 2 равнозначных варианта схемы замещения трехфазной цепи при соединении фаз-электроприемников треугольником (Δ).

Анализируя эту схему, можно отметить следующее:

По сравнению с трехфазной нагрузкой, соединенной звездой, которая может быть подсоединена к *четырёхпроводной сети с нейтральным проводом N*, трехфазные электроприемники, соединенные *треугольником* могут быть подсоединены к трехфазной питающей сети *только по трехпроводной схеме*.

При соединении электроприемников в треугольник (рис. 1) величины линейных напряжений $U_{AB} = U_{BC} = U_{CA} = U_{\Delta}$ равны соответствующим фазным напряжениям:

$$U_{\Delta} = U_{\Phi}$$

Трёхфазные цепи – треугольник



Основные соотношения для цепи – треугольник

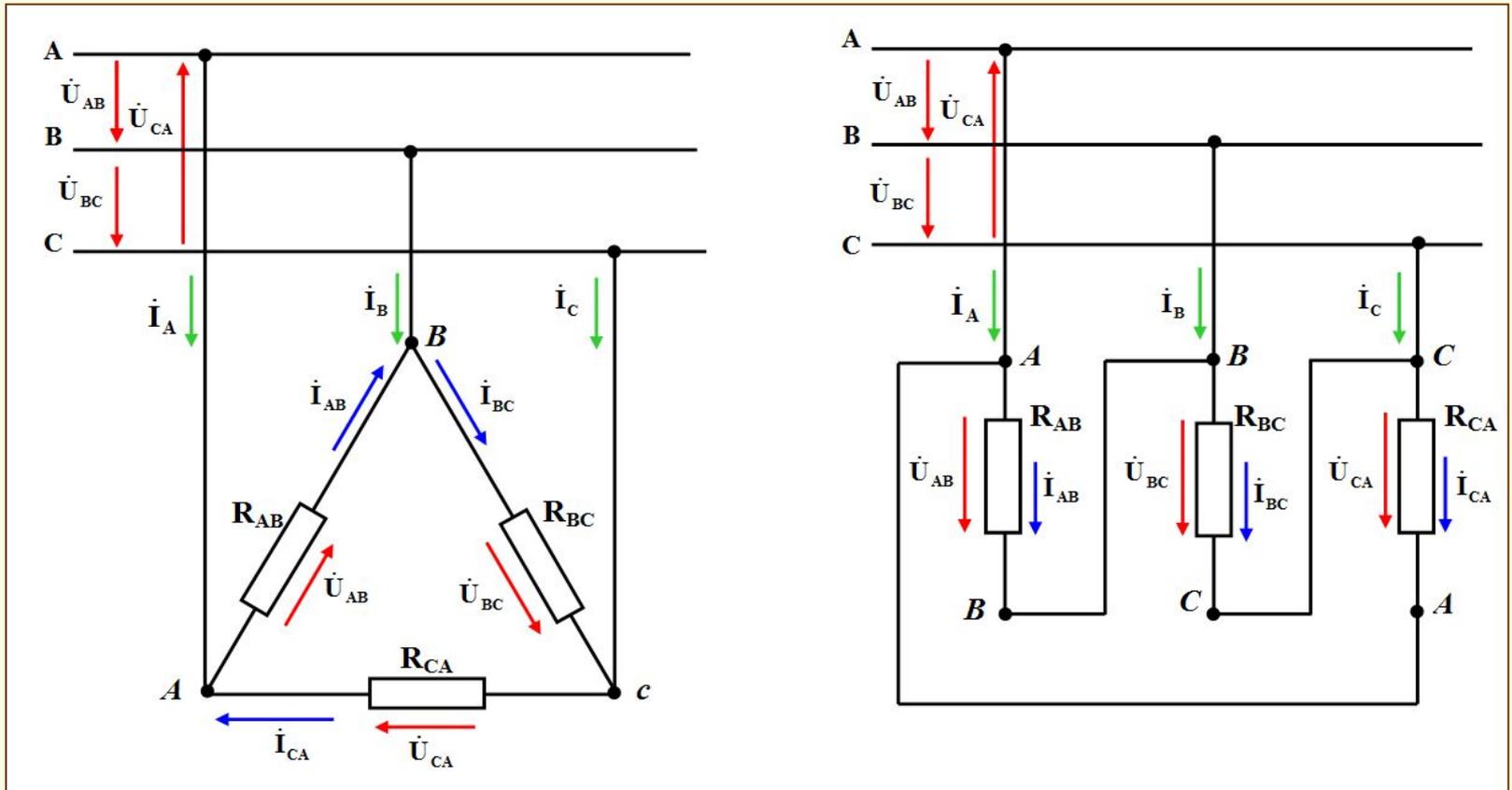


Рис. 1. Эквивалентные схемы замещения трехфазной цепи при соединении электроприемников треугольником



Трехфазные цепи – треугольник



Основные соотношения для цепи – треугольник

То есть для *трехфазной нагрузки соединенной треугольником линейные напряжения равны соответствующим фазным напряжениям*: $U_L = U_\Phi$.

На основании первого закона Кирхгофа соотношения между линейными и фазными токами для схемы цепи рис. 1:

$$I_A = I_{AB} - I_{CA};$$

$$I_B = I_{BC} - I_{AB};$$

$$I_C = I_{CA} - I_{BC}.$$



Для *симметричной трехфазной активной нагрузки*, когда $R_{AB} = R_{BC} = R_{CA} = R_\Phi$, *фазные токи*, определяемые законом Ома, *также будут симметричны*, т.е., одинаковы по величине: $I_{AB} = I_{BC} = I_{CA} = I_\Phi$ и сдвинуты относительно друг друга на угол 120° .

Закон Ома для фазных величин при симметричной активной нагрузке:

$$I_\Phi = U_\Phi / R_\Phi.$$

При *симметричной нагрузке линейные токи также будут симметричны и по величине равны друг другу*: $I_A = I_B = I_C = I_\Phi$.

Трехфазные цепи – треугольник



Симметричная нагрузка фаз

На рис. 2. изображена векторная диаграмма токов и напряжений для симметричной активной нагрузки соединенной треугольником, построенная по правилам, изложенным в пособии по лабораторным работам [2] на основе вышеприведенных соотношений для фазных и линейных токов.

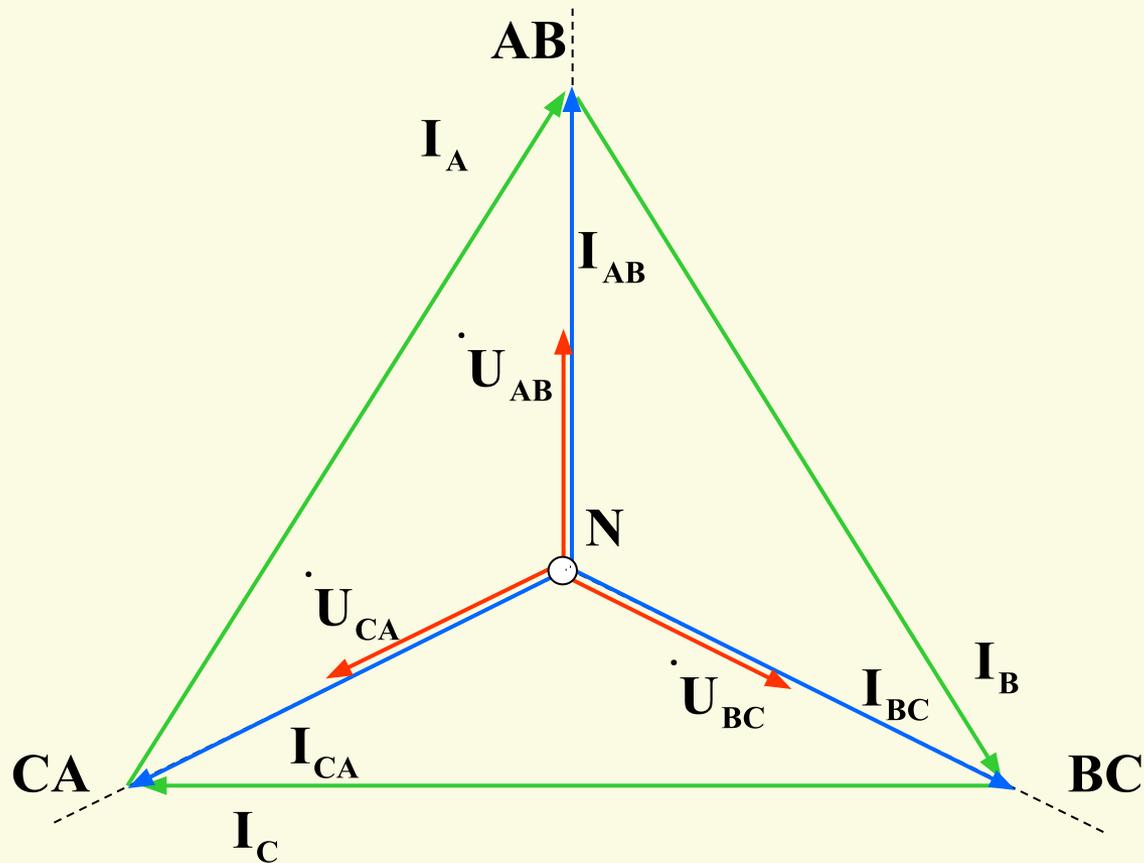
На следующем слайде показано построение *векторной диаграммы напряжений и токов для трехфазной симметричной активной нагрузки, соединенной треугольником.*



Трехфазные цепи – треугольник

Симметричная нагрузка фаз

Построение векторной диаграммы для трехфазной симметричной активной нагрузки соединенной треугольником



Трёхфазные цепи – треугольник



Симметричная нагрузка фаз

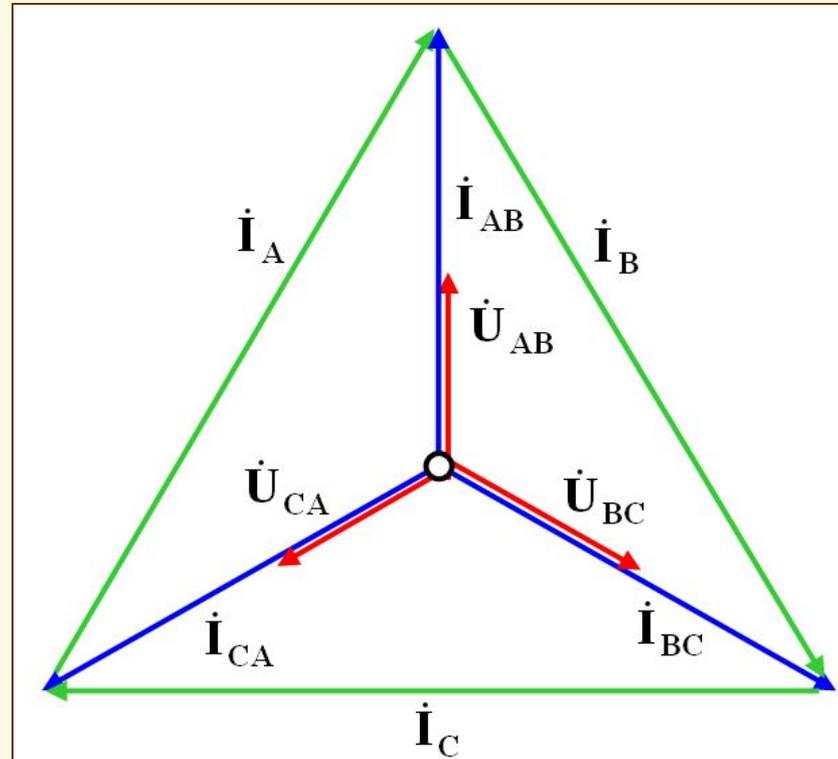


Рис. 2. Векторная диаграмма напряжений и токов для трехфазной симметричной активной нагрузки соединенной треугольником



Трехфазные цепи – треугольник

Симметричная нагрузка фаз

Из векторной диаграммы рис. 2 можно получить соотношение между линейными и фазными токами при симметричной нагрузке:

$I_L = 2I_\Phi \cos 30^\circ = 2I_\Phi (\sqrt{3} / 2) = \sqrt{3}I_\Phi$. Таким образом, *при соединении фаз треугольником и симметричной нагрузке линейные токи больше фазных в $\approx 1,73$ раз.*

Из диаграммы на рис. 2 видно, что *для активной нагрузки фазные (линейные) напряжения и соответствующие фазные токи совпадают по фазе.*

Из этой же диаграммы видно, что *сумма комплексных линейных (фазных) напряжений*, как симметричная система векторов *равна нулю:*

$$\dot{U}_{AB} + \dot{U}_{BC} + \dot{U}_{CA} = 0$$

Комплексная (векторная) сумма линейных токов равна нулю при любой трехфазной нагрузке соединенной треугольником, в частности, несимметричной:

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



Трехфазные цепи – треугольник

Несимметричная нагрузка фаз

На векторной диаграмме этому соответствует *замкнутая треугольная цепочка векторов линейных токов* I_A, I_B, I_C .

Несимметричная нагрузка фаз соединенных треугольником

В качестве примера рассмотрим следующую несимметрию электроприемников трехфазной нагрузки: $R_{AB} < R_{BC} = R_{CA}$.

В этом случае, на основании закона Ома фазные токи обратно пропорциональны их сопротивлениям, поэтому $I_{AB} > I_{BC} = I_{CA}$.

Соотношения между линейными и фазными токами в этом случае остаются такими же, как для симметричной нагрузки фаз (**см. выше**).

Поэтому векторная диаграмма линейных токов при данной несимметричной нагрузке фаз соединенных треугольником примет вид равнобедренного треугольника, вытянутого в сторону большего фазного тока I_{AB} , с соотношением линейных токов: $I_A = I_B > I_C$.

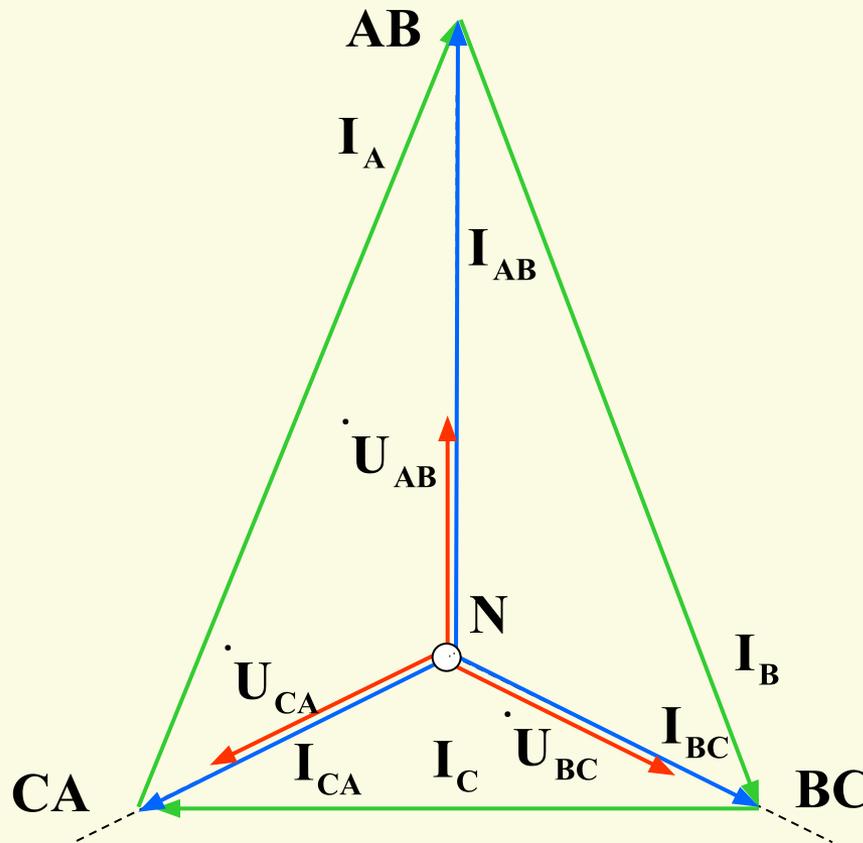
На следующем слайде показано построение *векторной диаграммы напряжений и токов для трехфазной несимметричной активной нагрузки, соединенной треугольником* при $R_{AB} < R_{BC} = R_{CA}$.



Трехфазные цепи – треугольник

Несимметричная нагрузка фаз

Построение векторной диаграммы для трехфазной несимметричной активной нагрузки соединенной треугольником



Трехфазные цепи – треугольник



Несимметричная нагрузка фаз

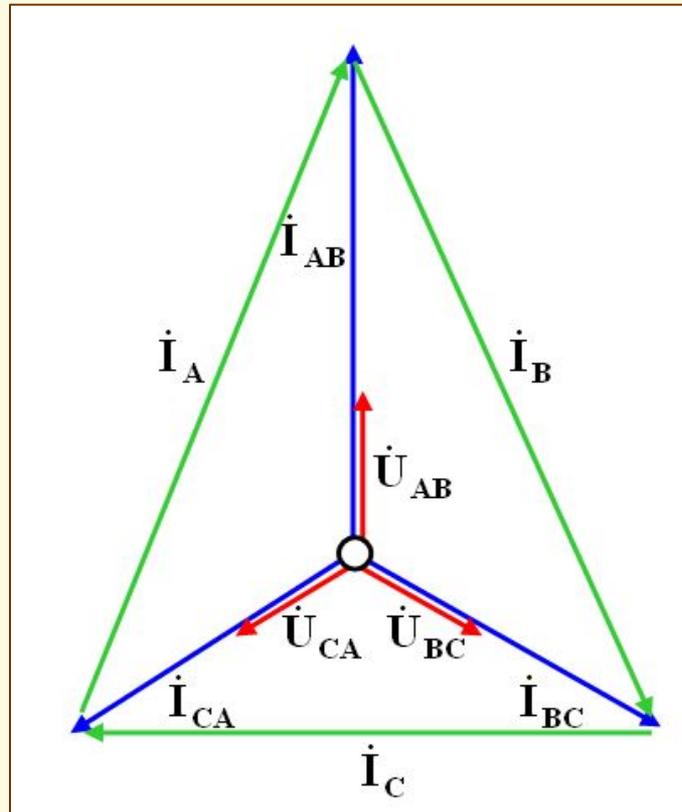


Рис. 3. Векторная диаграмма напряжений и токов для трехфазной несимметричной активной нагрузки соединенной треугольником (для случая $R_{AB} < R_{BC} = R_{CA}$)

Трехфазные цепи – треугольник



Несимметричная нагрузка фаз

Обрыв (отключение) линейного провода

Если в схеме нагрузки соединенной треугольником произойдет *обрыв (отключение) одного из линейных проводов*, например линии **С** (см. рис. 4), то *система трехфазного питания становится системой однофазного питания с двумя сетевыми проводами А и В*. При этом схема соединения электроприемников становится состоящей из двух параллельных ветвей. В одной ветви – сопротивление R_{AB} , а в другой – последовательное соединение двух сопротивлений R_{BC} и R_{CA} .

Для активной нагрузки, питаемой от однофазной сети, все токи в ветвях и падения напряжения на отдельных электроприемниках, как известно, [1], [2], совпадают по фазе. Поэтому для рассматриваемого случая *однофазного питания векторы всех напряжений и токов будут совпадать по направлению*.

Трехфазные цепи – треугольник



Несимметричная нагрузка фаз

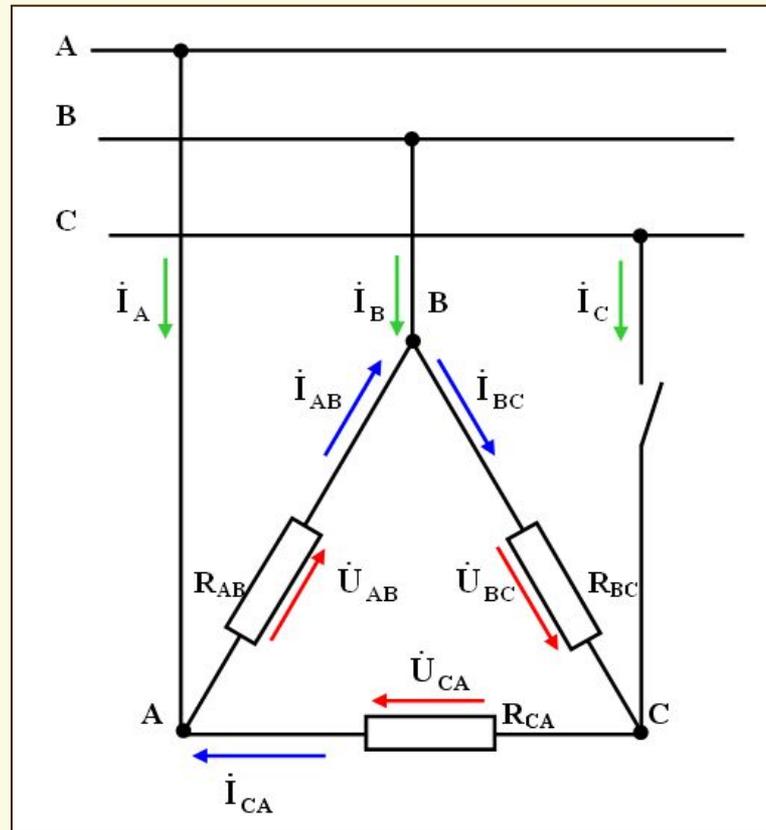


Рис. 4. Схема однофазной цепи несимметричной активной нагрузки соединенной треугольником при отключении линии С



Трехфазные цепи – треугольник

Мощности электроприемников в трехфазной нагрузке

Общую активную P , реактивную Q и полную S мощности электроприемников в трехфазной цепи при их соединении треугольником можно при любой несимметрии вычислить как арифметические суммы этих мощностей для отдельных фаз:

$$P = P_{AB} + P_{BC} + P_{CA};$$

$$Q = Q_{AB} + Q_{BC} + Q_{CA};$$

$$S = S_{AB} + S_{BC} + S_{CA} = \sqrt{P^2 + Q^2},$$

где мощности P_{Φ} , Q_{Φ} , S_{Φ} для отдельной фазы вычисляются по следующим формулам:

$$P_{\Phi} = U_{\Phi} I_{\Phi} \cos\phi = (U_{\Phi})^2 / R_{\Phi} = (I_{\Phi})^2 R_{\Phi};$$

$$Q_{\Phi} = U_{\Phi} I_{\Phi} \sin\phi = (U_{\Phi})^2 / X_{\Phi} = (I_{\Phi})^2 X_{\Phi};$$

$$S_{\Phi} = U_{\Phi} I_{\Phi} = (U_{\Phi})^2 / Z_{\Phi} = (I_{\Phi})^2 Z_{\Phi}.$$

Здесь R_{Φ} , X_{Φ} и Z_{Φ} – соответственно активное, реактивное и полное сопротивление фазы.



Трехфазные цепи – треугольник

Мощности электроприемников в трехфазной нагрузке

Для симметричной трехфазной нагрузки мощности вычисляются для одной фазы, а затем утраиваются:

$$P = 3P_{\phi};$$

$$Q = 3Q_{\phi};$$

$$S = 3S_{\phi}.$$

Для симметричной трехфазной нагрузки мощности P , Q , S также можно вычислить через *линейные напряжения* U_L и *линейные токи* I_L по формулам:

$$P = \sqrt{3}U_L I_L \cos \phi;$$

$$Q = \sqrt{3}U_L I_L \sin \phi;$$

$$S = \sqrt{3}U_L I_L.$$

где ϕ – угол сдвига по фазе между фазными током и напряжением



Трехфазные цепи – треугольник

Переключение фаз с треугольника на звезду

Рассмотрим, как меняются линейные токи и потребляемые мощности симметричной трехфазной активной нагрузки при пересоединении фаз с треугольника на звезду и обратно, решив следующую задачу.

Задача

Определить, как изменятся и во сколько раз токи в линии и потребляемая активная мощность при переключении трехфазной симметричной активной нагрузки фаз с треугольника на звезду:

$$\frac{I_{\text{Л}\Delta}}{I_{\text{ЛY}}} = ? \quad \frac{P_{\Delta}}{P_{Y}} = ?$$

Решение

Как было ранее сказано, при соединении электроприемников в треугольник величины линейных напряжений $U_{\text{Л}\Delta}$ равны соответствующим фазным напряжениям $U_{\text{Ф}\Delta}$:

$$U_{\text{Л}\Delta} = U_{\text{Ф}\Delta}.$$



Трехфазные цепи – треугольник

Переключение фаз с треугольника на звезду

Для схемы соединения треугольником и симметричной нагрузки фаз величины линейных токов $I_{Л\Delta}$ больше фазных токов $I_{\Phi\Delta}$ в $\sqrt{3}$ раз:

$$I_{\Phi} = \sqrt{3} I_{\Phi\Delta} .$$

При соединении электроприемников звездой (см. лекцию 5) величины линейных токов $I_{ЛY}$ равны соответствующим фазным токам $I_{\Phi Y}$:

$$I_{ЛY} = I_{\Phi Y} .$$

Для схемы соединения звездой и симметричной нагрузки фаз величины линейных напряжений $U_{ЛY}$ больше фазных напряжений $U_{\Phi Y}$ в $\sqrt{3}$ раз:

$$U_{ЛY} = \sqrt{3} U_{\Phi Y} .$$

Используя вышеприведенные соотношения и с учетом закона Ома, запишем выражения линейных токов для обоих схем включения трехфазной симметричной нагрузки.

Для схемы соединения фаз треугольником:

$$I_{\Phi} = \sqrt{3} I_{\Phi\Delta} = \sqrt{3} \frac{U_{\Phi}}{R} = \sqrt{3} \frac{U_{Л\Delta}}{R} = \sqrt{3} \frac{U_{Л}}{R} .$$



Трехфазные цепи – треугольник

Переключение фаз с треугольника на звезду

Для схемы соединения фаз звездой:

$$I_{Л\Upsilon} = I_{\Phi\Upsilon} = \frac{U_{\Phi\Upsilon}}{R} = \frac{1}{\sqrt{3}} \frac{U_{Л\Upsilon}}{R} = \frac{1}{\sqrt{3}} \frac{U_{Л}}{R}.$$

Деля левые и правые части обоих равенств друг на друга, получим в численном виде отношение линейных токов при переключении фаз с треугольника на звезду:

$$\frac{I_{\Delta}}{I_{Л\Upsilon}} = \frac{\sqrt{3} \frac{U_{Л}}{R}}{\frac{1}{\sqrt{3}} \frac{U_{Л}}{R}} = (\sqrt{3})^2 = 3.$$

Мощности для симметричной трехфазной *активной нагрузки* ($\cos\phi = 1$) для обеих схем включения фаз определяются следующими выражениями:

$$P_{\Delta} = \sqrt{3} U_{Л} I_{\Delta} \cos \phi_{Л \Delta}$$

$$P_{\Upsilon} = \sqrt{3} U_{Л\Upsilon} I_{Л\Upsilon} \cos \phi_{Л\Upsilon}$$



Трехфазные цепи – треугольник

Переключение фаз с треугольника на звезду

Деля левые и правые части двух последних равенств друг на друга, получим отношение потребляемых активных мощностей при переключении фаз с треугольника на звезду:

$$\frac{P_{\Delta}}{P_{\text{Y}} I} = \frac{I_{\text{л}}}{I} = 3.$$

Ответ

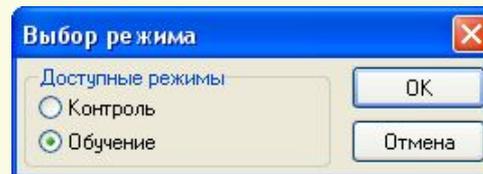
При переключении трехфазной симметричной активной нагрузки фаз с треугольника на звезду линейные токи и потребляемая активная мощность *уменьшаются в три раза*. При обратном переключении фаз со звезды на треугольник линейные токи и потребляемая активная мощность *увеличиваются в три раза*.

Трехфазные цепи – треугольник



ТЕСТ – Трехфазные цепи при соединении треугольником

При нажатии на расположенную внизу кнопку-гиперссылку «ТЕСТ» запускается тестирующая программа и предоставляет пользователю выборку пяти вопросов и задач из общего количества 39 по теме раздела. При этом появляется окно *Выбор режима*.



В этом окне следует отметить пункт *Обучение* и после – нажать кнопку *Ок*, так как тестирование в настоящем пособии проводится только в режиме *Обучение*. При ошибочных ответах пользователя на вопросы теста приводятся подсказки в виде правильных ответов (в режиме контроля подсказки отсутствуют).



Трехфазные цепи – треугольник



Литература и электронные средства обучения

Основная литература

1. Касаткин А.С. Электротехника: учеб. для вузов / А.С. Касаткин, М.В. Немцов. – 10-е изд. стер. – М.: Изд. Центр «Академия», 2007. – 544с.
2. Вильданов К.Я., Забора И.Г., Чернов Р.О. Электротехника. Часть 1. Общие сведения. Цепи синусоидального тока. Электронное учебно-методическое пособие / под общ. ред. И.Г. Заборы. – М.: МГСУ, 2015 – 188 с.
3. К.Я. Вильданов, С.Т. Гейдаров, И.Г. Забора и др. Электротехника и электроника. Элементы теории и задания к контрольным работам: Учебно-методическое пособие для студентов строительных специальностей. – М.: МГАКХиС, 2011. – 89 с.

Электронные средства обучения

1. А.С. Касаткин, М.В. Немцов. Электротехника. Электронная версия учебника по электротехнике и электронике, 2009. (формат – веб-страницы).
2. И.Г. Забора. Инженерные системы и оборудование зданий. Электротехника и электроснабжение. Электронный курс. 2016.
http://cito.mgsu.ru/subject/index/card/switcher/list/subject_id/1185.



ЛЕКЦИЯ ОКОНЧЕНА

Благодарю за внимание!