

ТРЕХФАЗНЫЕ ЦЕПИ ПЕРЕМЕННОГО ТОКА

9.1 Определение трехфазной системы. Получение 3фазного тока

Трёхфазной электрической системой называется совокупность трёх электрически связанных однофазных систем, в которых с одинаковой частотой действуют одинаковые по величине ЭДС, сдвинутые относительно друг друга на 120 градусов и генерируемые одним генератором.

Трёхфазная система переменного тока была разработана, а затем практически освоена выдающимся русским инженером-электротехником М. О. Доливо-Добровольским (1862 — 1919) в 1891 г. Им были разработаны трёхфазные генератор, трансформатор и асинхронный двигатель. Простое устройство, относительная дешевизна, высокая надёжность в эксплуатации трёхфазных генераторов, трансформаторов и двигателей, более экономичная передача энергии на расстояние по сравнению с однофазной системой способствовали широкому промышленному внедрению трёхфазной системы переменного тока.

Простейший трёхфазный генератор показан на рисунке 9.1, состоит из двух основных частей: статора и ротора.

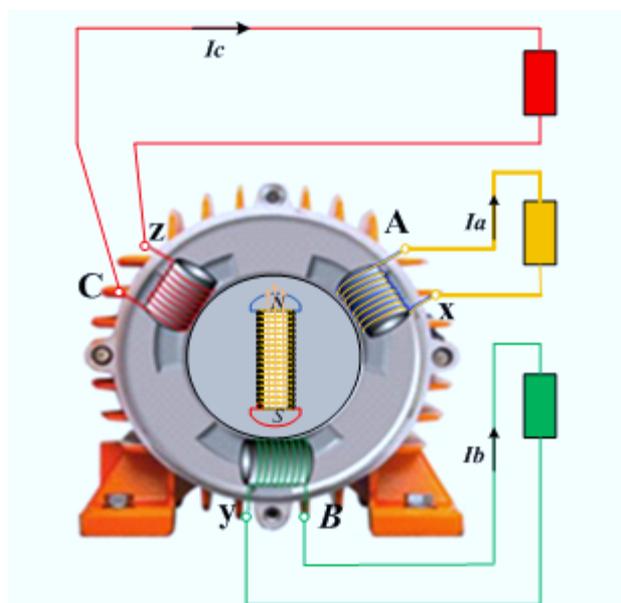


Рисунок 9.1- Простейший трёхфазный генератор.

На статоре – неподвижная часть генератора, расположены три одинаковые обмотки, смещенные одна относительно другой на 120° по внутренней поверхности сердечника.

Начала обмоток обозначают буквами *A, B, C*, а их концы — буквами *X, Y, Z*.

Каждую обмотку генератора и её электрическую цепь называют фазой.

Подвижная часть генератора — ротор — мощный электромагнит с обмоткой, получающей питание от источника постоянного тока.

На практике все начала и концы фазных обмоток статора выводятся в коробку или на щиток выводов и расположены в порядке показанной на рисунке 9.2. Указанное расположение выводов на щитке, как будет показано ниже, удобно для включения обмоток заданным способом.

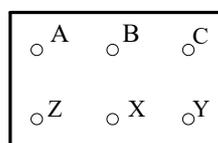


Рисунок 9.2 - Щиток выводов обмоток статора

Нужно заметить, что для удобства технического обслуживания и для маркировки на станциях и подстанциях электрические фазы имеют строгую расцветку.

Цвета шин фаз стандартизованы: Ах- **желтый**, Ву – **зелёный**, Cz - **красный**.

При вращении ротора будет вращаться и его магнитный поток. В результате этого, в каждой обмотке статора наводится синусоидальная ЭДС с максимальной амплитудой E_{mA} , E_{mB} , E_{mC} , следовательно считаем: $E_{mA} = E_{mB} = E_{mC} = E_m$

Таким образом, амплитудные значения ЭДС всех фаз имеют одинаковые значения. Между ЭДС соседних фаз образуется угол сдвига по фазе относительно ЭДС соседней обмотки на 120° . Частота изменения ЭДС - f , пропорциональна скорости вращения ротора.

Принимая за начало отсчета момент времени, когда ЭДС - E_A , в обмотке Ах равна нулю, то при вращении ротора против часовой стрелки уравнения ЭДС можно записать в следующем виде:

ЭДС первой обмотки описывается уравнением:

$$e_A = E_m \sin \omega t \quad 9.1$$

тогда ЭДС второй обмотки:

$$e_B = E_m \sin(\omega t - 120^\circ) \quad 9.2$$

а ЭДС третьей обмотки:

$$e_C = E_m \sin(\omega t - 240^\circ) \quad 9.3$$

Этим уравнениям соответствуют векторная диаграмма и графики изменения ЭДС, изображенные на рисунках 9.3 и 9.4

Если принять за исходный вектор ЭДС E_A , то ЭДС E_B отстает от E_A , а ЭДС E_C отстает от E_B . Следовательно, максимальных значений ЭДС в фазах достигают в таком порядке: сначала в фазе А, затем в В и далее в С.

Векторы ЭДС вращаются против часовой стрелки, а мимо неподвижной вертикальной оси они будут проходить в следующем порядке:

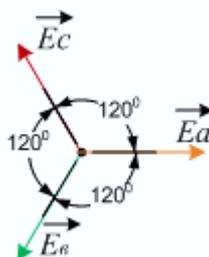


Рисунок 9.3 – Векторная диаграмма ЭДС в обмотках статора

Трехфазная симметричная систем ЭДС — это совокупность трех ЭДС имеющих одинаковую частоту и амплитуду, сдвинутых по фазе относительно друг друга на углы 120° .

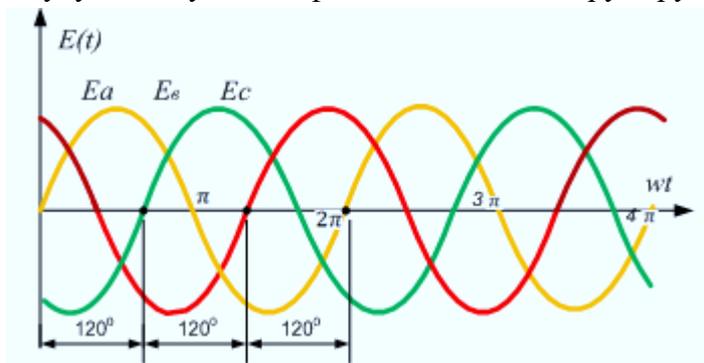


Рисунок 9.4 – Графики изменения ЭДС в фазных обмотках генератора

Для расчетов, обычно, строят векторную диаграмму токов и напряжений изображая вектор напряжения на фазе А - \vec{U}_A , направленным вертикально вверх.

На рисунке 9.5 показаны: а — векторная диаграмма трехфазной симметричной системы ЭДС генератора, б — векторная диаграмма напряжений на равномерной нагрузке – трёхпалая звезда.

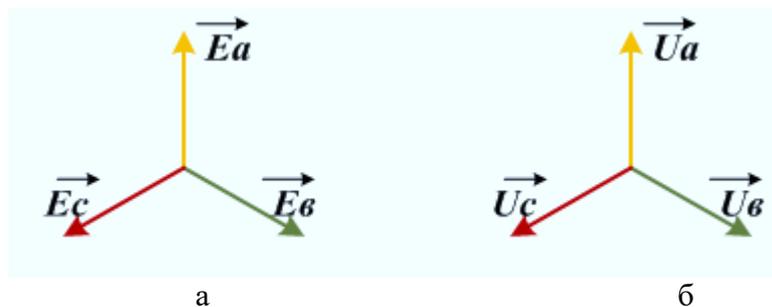


Рисунок 9.5 - Векторная диаграмма ЭДС трехфазного генератора и напряжений на нагрузке

ЭДС всех фаз трехфазного генератора принимают максимальные (амплитудные) значения в определенной последовательности. Рассмотренную последовательность *A-B-C* принято называть *прямой последовательностью фаз ЭДС*.

Различают симметричный и несимметричный режимы работы трехфазной цепи. При симметричном режиме сопротивления трех фаз одинаковы и ЭДС образуют трехфазную симметричную систему. В этом случае токи фаз I_A, I_B, I_C будут равны по величине и сдвинуты по углу 120 градусов.

При несимметричном (неравномерном) режиме комплексные сопротивления фаз не равны друг другу, токи и их фазные сдвиги при этом будут различными.

Признаком не симметрии трехфазной системы ЭДС является неравенство амплитуд или неравенство углов сдвига фаз между каждой парой ЭДС.

Основное свойство симметричных трехфазных систем синусоидальных величин заключается в том, что алгебраическая сумма мгновенных значений этих величин в любой момент времени равна нулю.

Значит, при симметричной трехфазной системе ЭДС :

$$e_A + e_B + e_C = 0 \quad 9.4$$

а при симметричной трехфазной системе токов :

$$I_A + I_B + I_C = 0 \quad 9.5$$

9.2 Соединение обмоток генератора

9.2.1 Способы соединения обмоток

Если к каждой обмотке генератора присоединить отдельную нагрузку с сопротивлениями Z_A , Z_B , Z_C как показано на рисунке 9.1, то в результате образуются три самостоятельные однофазные электрические цепи с токами генерируемыми одним генератором рисунок 9.6. В такой несвязанной системе работают шесть проводов. Это экономически не выгодно и неэффективно.

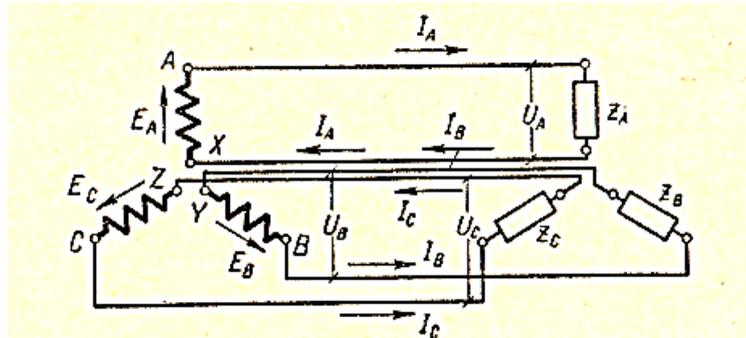


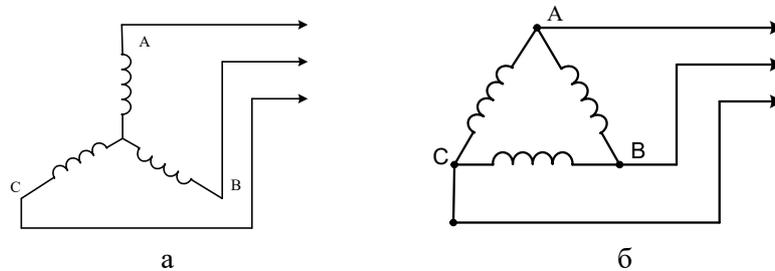
Рисунок 9.6 – Несвязанная трёхфазная цепь

В несвязанной системе генератор с приемником энергии соединяется шестью проводами. Большое число соединительных проводов — основной недостаток несвязанных систем, которые поэтому и не применяются. Сокращение числа соединительных проводов достигается в связанных системах, где обмотки генератора, как и отдельные фазы приемника, электрически связаны между собой и образуют трехфазные цепи.

Для этой цели выдающимся М.О.Доливо-Добровольским предложены две схемы соединения — **звездой** и **треугольником**, которые применяются и в настоящее время.

При соединении звездой, концы обмоток статора соединяются в одной точке, называемой нулевой N, а начала обмоток выходят на линии электропередач рис. 9.7(а).

При соединении треугольником конец одной обмотки статора соединяются с началом другой обмотки. Ответвления от начала обмоток выходят на линии электропередач рисунок 9.7(б).



На рисунке 9.7 - Способы соединения обмоток генератора

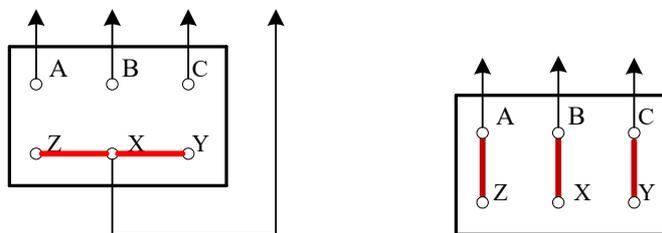


Рисунок 9.8 - Щиток выводов генератора, при разных способах соединения обмоток: а - соединение «звезда», б – соединение «треугольник»

9.2 Способы соединения обмоток трехфазного генератора

9.2.1 Соединение обмоток звездой - «Звезда с нулевым проводом»

На электрической схеме (рисунок 9.9) обмотки статора трехфазного генератора располагают под углом 120° . При соединении обмоток звездой их концы X , Y и Z соединяют в одну точку O , называемую нулевой точкой или нейтралью (N) генератора. От нулевой точки к потребителям энергии прокладывают нулевой или нейтральный провод. Кроме нулевого к потребителям энергии прокладывают три линейных провода, которые соединяются с началами обмоток A , B и C .

Каждый линейный провод представляет собой отдельную фазу.

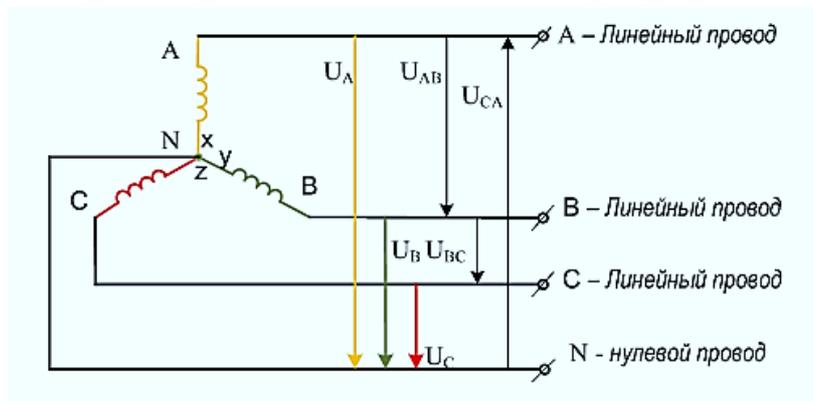


Рисунок 9.9 – Линейные и фазные напряжения при соединении «Звезда с нулевым проводом»

Полученная таким образом система называется звездой с нулевым проводом – четырёхпроводная линия. В случае отсутствия нулевого провода цепь получает название – «Трёхпроводная звезда».

Фазные напряжения и токи

Если от начала и конца обмотки (фазы генератора) перейти в линию электропередачи, то окажется, что фазное напряжение – это напряжение между линейным проводом (фазой) и нулевым проводом (нейтралью). Напряжения между началом и концом обмоток генератора называют **фазными напряжениями** и обозначают U_A , U_B , U_C (в общем виде (U_ϕ)).

При работе на нагрузку фазные напряжения отличаются от значения фазных ЭДС на величину потерь напряжения в обмотках (или внутреннего падения напряжения в обмотках). В режиме холостого хода фазное напряжение равно фазным ЭДС. При незначительных сопротивлениях обмоток и малых токах внутреннее падение напряжения можно не учитывать. При этом фазные напряжения будут мало отличаться от соответствующих ЭДС. Обратите внимание на стрелки (рисунок 9.9), указывающие положительное направление фазных напряжений.

Токи в фазных обмотках генератора называются **фазными токами** I_A , I_B , I_C .

Линейные напряжения и токи

Напряжения между линейными проводами (т. е. между началами обмоток) называют линейными напряжениями и обозначают U_{AB} , U_{BC} , U_{CA} (в общем виде U_L). Причем порядок индексов указывает положительное направление этих напряжений во внешней цепи, например U_{AB} направлено от А к В.

Токи в линейных проводах называются линейными токами I_A , I_B , I_C .

Обмотки статора синхронного генератора выведены на шесть контактных зажимов. Соединение этих зажимов при включении обмоток звездой показано на рисунок 9.8а.

Связь между линейными и фазными напряжениями

На рисунке 9.10 показана векторная диаграмма фазных и линейных напряжений. Выясним связь между фазными и линейными напряжениями.

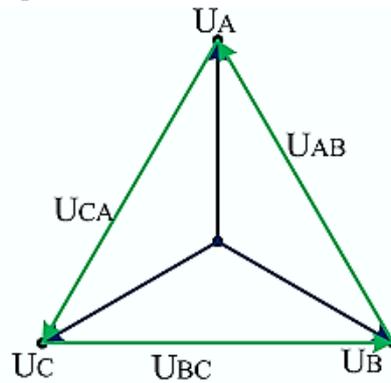


Рисунок 9.10 – Векторная диаграмма линейных и фазных напряжений

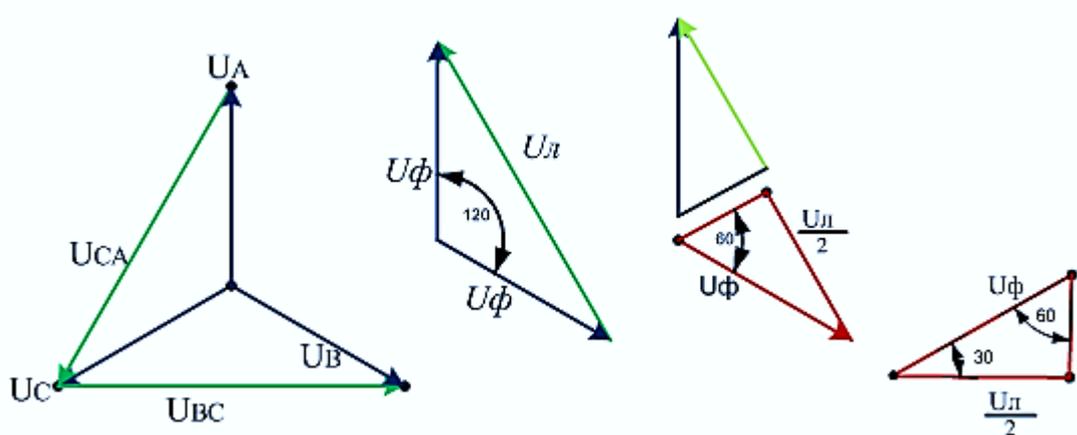


Рисунок 9.11.1 - Определение связи между U_L и U_ϕ

Выделим из векторной диаграммы, показанной на рисунке 9.11.1 треугольник образуемый парой векторов фазных напряжений и вектором линейного напряжения.

Выделенный треугольник – с тупым углом, мы не умеем решать такие треугольники, поэтому разделим его на два прямоугольных треугольника. Полученные прямоугольные треугольники образуются векторами одного фазного напряжения и половиной вектора линейного напряжения. Кроме этого известны все его углы. Сейчас построить связь между фазным и линейным напряжениями очень просто, а именно следующим образом.

По известным соотношениям прямоугольного треугольника, имеем:

$$\sin 60 = \frac{\frac{U_L}{2}}{U_\phi} \text{ или } \cos 30 = \frac{\frac{U_L}{2}}{U_\phi} \quad 9.6$$

Так как: $\sin 60 = \sqrt{3}/2$, $\cos 30 = \sqrt{3}/2$, тогда получим:

$$\frac{\sqrt{3}}{2} = \frac{\frac{U_L}{2}}{U_\phi} = \frac{U_L}{2U_\phi} \quad 9.7$$

Умножим обе части равенства на 2, получаем:

$$\sqrt{3} = \frac{U_L}{U_\phi} \text{ или } U_L = \sqrt{3} \cdot U_\phi \quad 9.8$$

Что касается связи между линейными и фазными токами, то нетрудно заметить, что фазные токи протекающие по обмоткам генератора после выхода в ЛЭП (линию электропередачи) становятся линейными, то есть справедливо:

$$I_\phi = I_L \quad 9.9$$

Полученные соотношения 9.8 и 9.9 справедливы для случая соединения обмоток генератора «звездой».

Важно ! Особенностью трёхфазной системы с соединением «звезда» является возможность двух значений напряжения.

Для «Звезды» справедливо: $U_{\text{л}} = \sqrt{3} \cdot U_{\text{ф}}$, $I_{\text{ф}} = I_{\text{л}}$

На практике существуют стандартные значения номинального напряжения сети :
660/380 В; 380/220 В, 220/127 В.

9.2.2 Соединение обмоток трехфазного генератора треугольником

Электрическая схема соединения обмоток генератора треугольником.

Для соединения обмоток генератора треугольником (рисунок 9.12) конец первой обмотки X соединяют с началом второй обмотки B , конец второй обмотки Y с началом третьей обмотки C и конец третьей обмотки Z с началом первой обмотки A . От начала каждой обмотки A, B, C к потребителям энергии прокладывают линейный провод. Нулевой провод при этом соединении отсутствует. Таким образом, при соединении обмоток генератора треугольником получают трехпроводную, электрически связанную трехфазную систему.

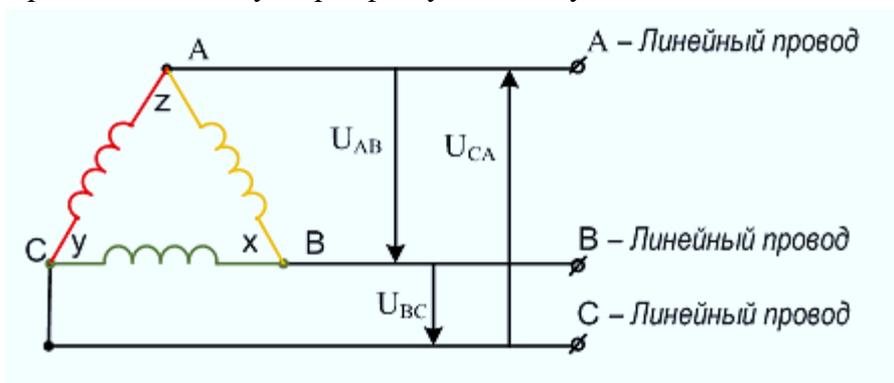


Рисунок 9.12 – Линейные и фазные напряжения при соединении «Треугольник»

На рисунке 9.12 показаны напряжения, действующие в трёхфазной системе при соединении обмоток треугольником. Обозначим линейные напряжения генератора U_{AB} , U_{BC} и U_{CA} . Напомним, что фазное напряжение измеряется между началом и концом обмотки одной из фаз генератора, а линейные — между линейными проводами или началами двух фазных обмоток.

Связь между фазными и линейными напряжениями, при этом способе соединения обмоток очевидна: укажем линейное напряжение – это напряжение между линейными проводами U_{AB} , U_{BC} , U_{CA} . А сейчас проследим это напряжение двигаясь по линиям проводов к генератору. В результате указатели выведут к фазной обмотке – то есть линейное напряжение оказывается равным фазному напряжению, на выходе генератора. Каждая обмотка генератора выведена к соответствующим линейным проводам. Например, к линейным проводам A и B включена обмотка $A — X$, а к линейным проводам B и C — обмотка $B — Y$. Поэтому линейное напряжение в то же время является и фазным. Таким образом получена связь напряжений:

$$U_{\text{л}} = U_{\text{ф}} \quad \mathbf{9.10}$$

Связь между фазными и линейными токами можно выяснить, проанализировав их направления в некоторый момент времени рисунок 9.13

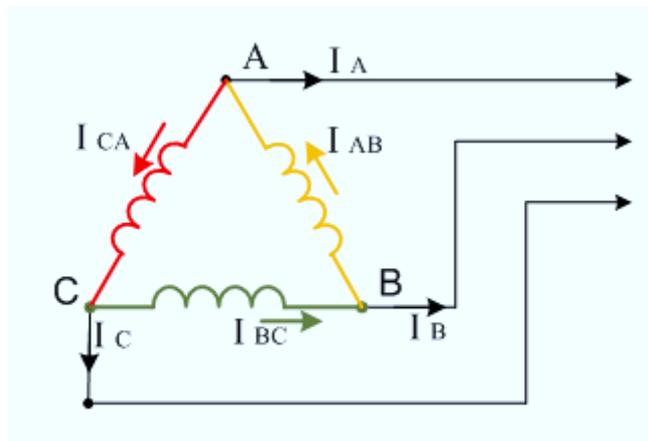


Рисунок 9.13 – Токи в трёхфазной системе при соединении обмоток генератора «треугольником»

Построим уравнения, связывающие линейные и фазные токи применяя первый закон Кирхгофа для векторов токов в виде таблицы 9.1

Таблица 9.1 – Линейные и фазные токи в системе «Треугольник»

Узел А:	$\vec{I}_{AB} = \vec{I}_A + \vec{I}_{CA}$	$\vec{I}_A = \vec{I}_{AB} - \vec{I}_{CA}$	9.11
Узел В:	$\vec{I}_{BC} = \vec{I}_B + \vec{I}_{AB}$	$\vec{I}_B = \vec{I}_{BC} - \vec{I}_{AB}$	9.12
Узел С:	$\vec{I}_{CA} = \vec{I}_C + \vec{I}_{BC}$	$\vec{I}_C = \vec{I}_{CA} - \vec{I}_{BC}$	9.13

Построим векторную диаграмму токов и напряжений для соединения «треугольник».

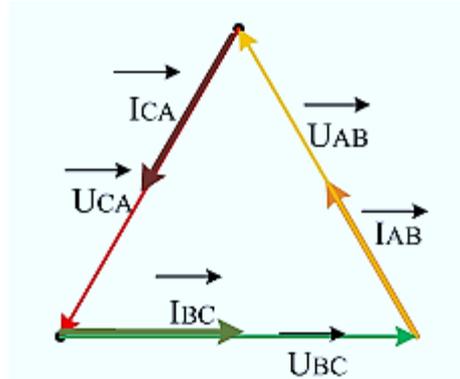


Рисунок 9.14- Векторная диаграмма токов и напряжений соединеник «Треугольник»

Пусть токи совпадают по фазе с напряжением одноименных фаз. Вынесем вектора токов параллельно себе и преобразуем их в трёхпалую звезду фазных токов (рисунок 9.15).

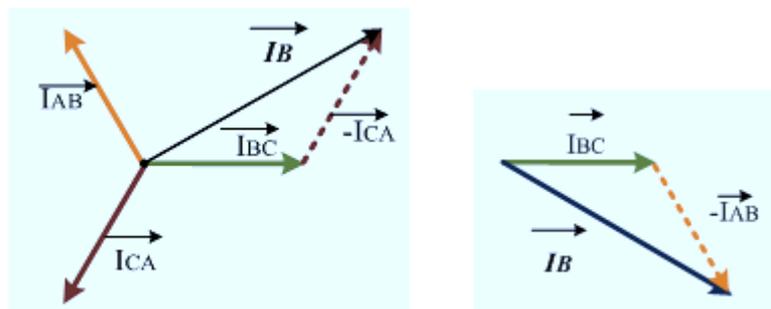


Рисунок 9.15 – Определение связи между линейными и фазными токами при соединении «Треугольник»

После чего построим вектор любого линейного тока, например линейного тока I_B (в проводе В) по уравнению $\vec{I}_B = \vec{I}_{BC} - \vec{I}_{AB}$, или $\vec{I}_B = \vec{I}_{BC} + (-\vec{I}_{AB})$.

После выполнения указанных выше операций, получает треугольник, аналогичный треугольнику напряжений (рисунок 9.11.1) при исследовании соединения «звезда». Проведя аналогичные рассуждения по формулам 9.6-9.8. получим соотношение между фазными и линейными токами:

$$I_{л} = \sqrt{3} \cdot I_{\phi} \quad 9.14$$

Важно !

Особенности трёхфазной системы «Треугольник»:

- $I_{л} = \sqrt{3} \cdot I_{\phi}$; $U_{л} = U_{\phi}$ – соотношения для токов и напряжений.
- В системе нет нулевого провода.