

Лекция 9

Модуль I. Электрические цепи

Трёхфазные электрические цепи (продолжение).

Содержание

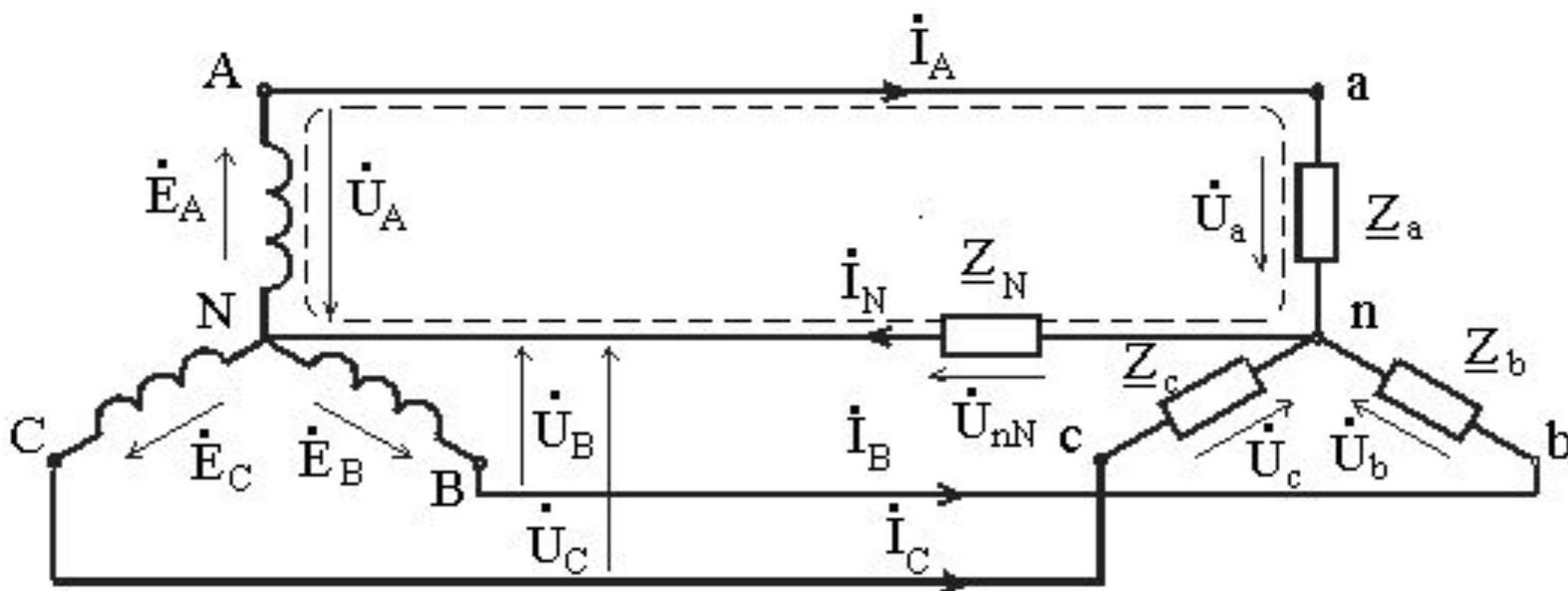


1. Значение нейтрального провода
2. Расчет трехфазной цепи при соединении фаз приемника «треугольником»
3. Мощность трехфазной цепи

1. Значение нейтрального провода



- При достаточной протяженности нейтрального провода он обладает существенным сопротивлением, которое оказывает определенное влияние на работу цепи. Это учтено в схеме введением в нейтральный провод резистора с сопротивлением нейтрального провода \underline{Z}_N



1. Значение нейтрального провода (продолжение)

Схема

- При появлении тока в нейтральном проводе сопротивление \underline{Z}_N обуславливает дополнительное напряжение \underline{U}_{nN} , которое искажает напряжения фаз приемника.

- На основании II закона Кирхгофа для контура фазы А, обозначенного пунктиром можно записать

$$-\underline{U}_A + \underline{U}_a + \underline{U}_{nN} = 0$$

- Для двух других фаз можно записать аналогичные уравнения, из которых получим:

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

- Очевидно, что при этом фазные напряжения приемника несимметричны.



1. Значение нейтрального провода (продолжение)

- Напряжение \underline{U}_{nN} между нейтралью приемника и источника согласно методу узлового напряжения

$$\underline{U}_{nN} = \frac{\underline{U}_A \underline{Y}_a + \underline{U}_B \underline{Y}_b + \underline{U}_C \underline{Y}_c}{\underline{Y}_a + \underline{Y}_b + \underline{Y}_c + \underline{Y}_N}$$

где $\underline{Y}_a = \frac{1}{\underline{Z}_a}$; $\underline{Y}_b = \frac{1}{\underline{Z}_b}$; $\underline{Y}_c = \frac{1}{\underline{Z}_c}$ – комплексные проводимости фаз приемника;

$\underline{Y}_N = \frac{1}{\underline{Z}_N}$ – комплексная проводимость нейтрального провода.



1. Значение нейтрального провода (продолжение)

- Напряжения фаз источника равны их ЭДС



$$\underline{U}_{nN} = \frac{\underline{U}_A \underline{Y}_a + \underline{U}_B \underline{Y}_b + \underline{U}_C \underline{Y}_c}{\underline{Y}_a + \underline{Y}_b + \underline{Y}_c + \underline{Y}_N}$$

- При небольшом сопротивлении нейтрального провода проводимость \underline{Y}_N можно принять равной бесконечности. Тогда напряжение $\underline{U}_{nN} = 0$. **Фазные напряжения приемника не искажаются и остаются симметричными, равными фазным напряжениям источника.**
- С возрастанием сопротивления нейтрального провода напряжение \underline{U}_{nN} также возрастает и фазные напряжения приемника искажаются.



1. Значение нейтрального провода (продолжение)

- Зная фазные напряжения приемника, можно определить ток в каждой фазе

$$\underline{I}_a = \frac{\underline{U}_a}{\underline{Z}_a}; \underline{I}_b = \frac{\underline{U}_b}{\underline{Z}_b}; \underline{I}_c = \frac{\underline{U}_c}{\underline{Z}_c},$$

- Значение тока в нейтральном проводе

$$\underline{I}_N = \frac{\underline{U}_{nN}}{\underline{Z}_N} = \underline{Y}_N \underline{U}_{nN}$$

или в соответствии с первым законом Кирхгофа

$$\underline{I}_N = \underline{I}_a + \underline{I}_b + \underline{I}_c = \underline{I}_A + \underline{I}_B + \underline{I}_C$$



Роль нейтрального провода при симметричном приемнике

$$\underline{Z}_a = \underline{Z}_b = \underline{Z}_c = \underline{Z}_\phi = Z_\phi e^{\pm j\varphi} \quad \text{или} \quad \underline{Y}_a = \underline{Y}_b = \underline{Y}_c = \underline{Y}_\phi$$

$$\underline{U}_{nN} = \frac{\underline{Y}_\phi (\underline{U}_A + \underline{U}_B + \underline{U}_C)}{3\underline{Y}_\phi + \underline{Y}_N} = 0$$

- Сумма фазных напряжений симметричного источника:

$$\underline{U}_A + \underline{U}_B + \underline{U}_C = 0 \quad \longrightarrow \quad \underline{U}_N = 0$$

- Так как $\underline{U}_{nN} = 0 \quad \longrightarrow \quad \underline{U}_a = \underline{U}_A; \underline{U}_b = \underline{U}_B; \underline{U}_c = \underline{U}_C$



Роль нейтрального провода при симметричном приемнике (продолжение)

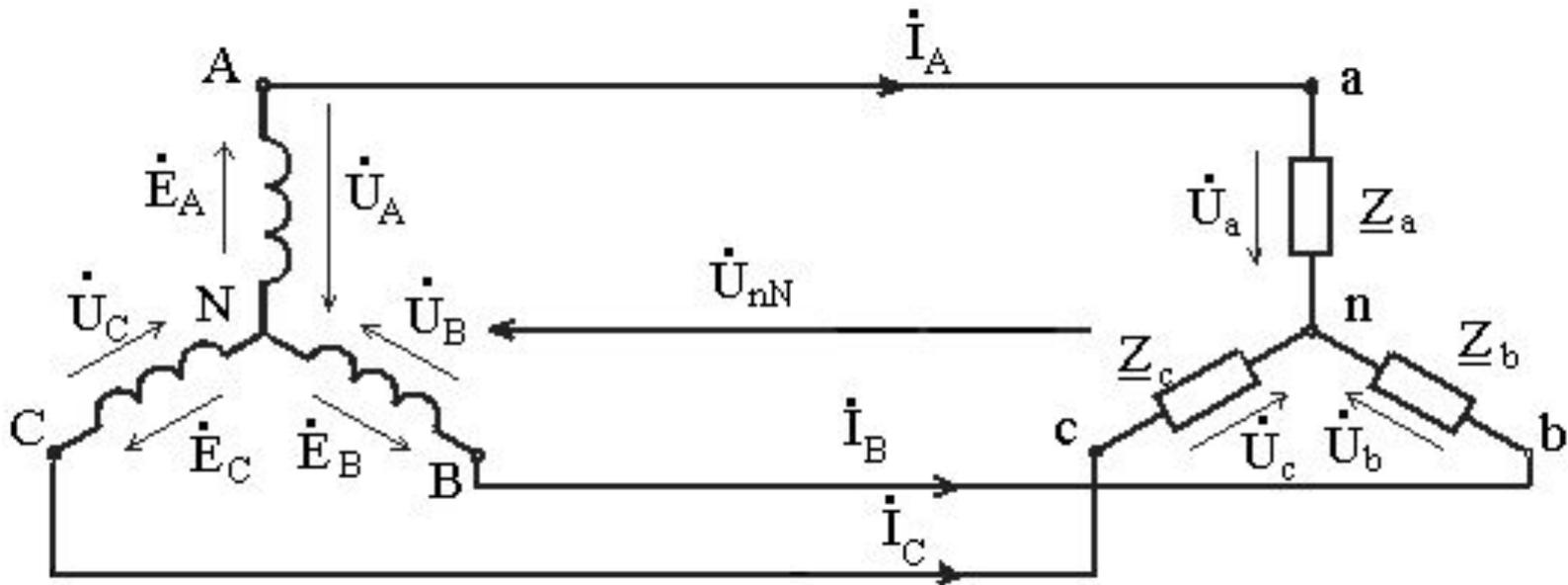
- При симметричном приемнике, соединенном "звездой", **нейтральный провод не оказывает влияния на его работу.** При этом остается справедливым соотношение , полученное ранее для трехфазного генератора.

$$U_{Л} = \sqrt{3}U_{\phi}, \quad U_{\phi} = \frac{U_{Л}}{\sqrt{3}}$$



Трехпроводная электрическая цепь при несимметричном приемнике, соединенном "звездой"

- При отсутствии нейтрального провода можно принять его сопротивление бесконечно большим, а проводимость равной нулю $\underline{Y}_N = 0$



Трехпроводная электрическая цепь при несимметричном приемнике, соединенном "звездой" (продолжение)

- При этом в соответствии с напряжением смещения нейтрали \underline{U}_{nN} оказывается максимальным:

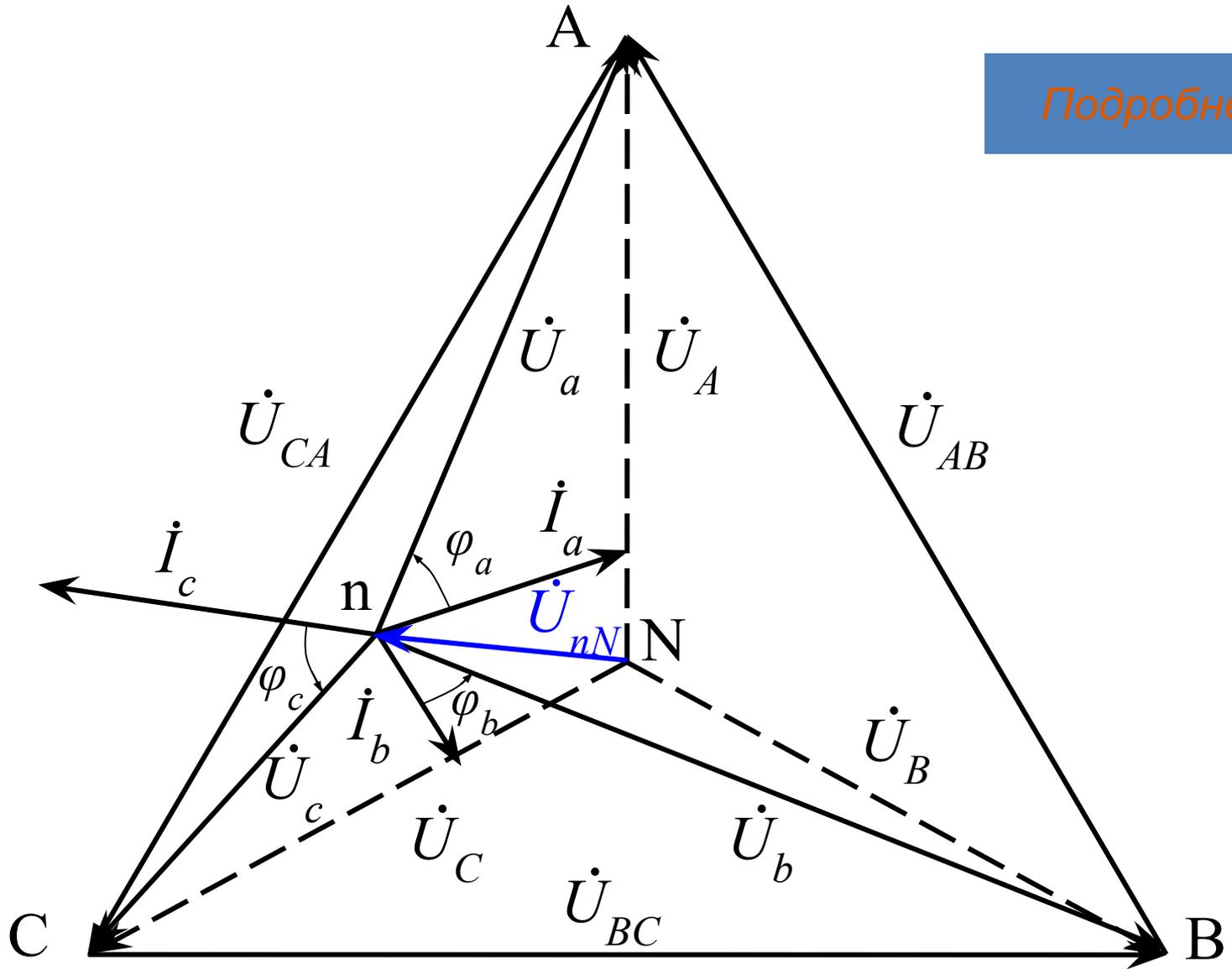
$$\underline{U}_{nN} = \frac{\underline{U}_A \underline{Y}_a + \underline{U}_B \underline{Y}_b + \underline{U}_C \underline{Y}_c}{\underline{Y}_a + \underline{Y}_b + \underline{Y}_c}$$

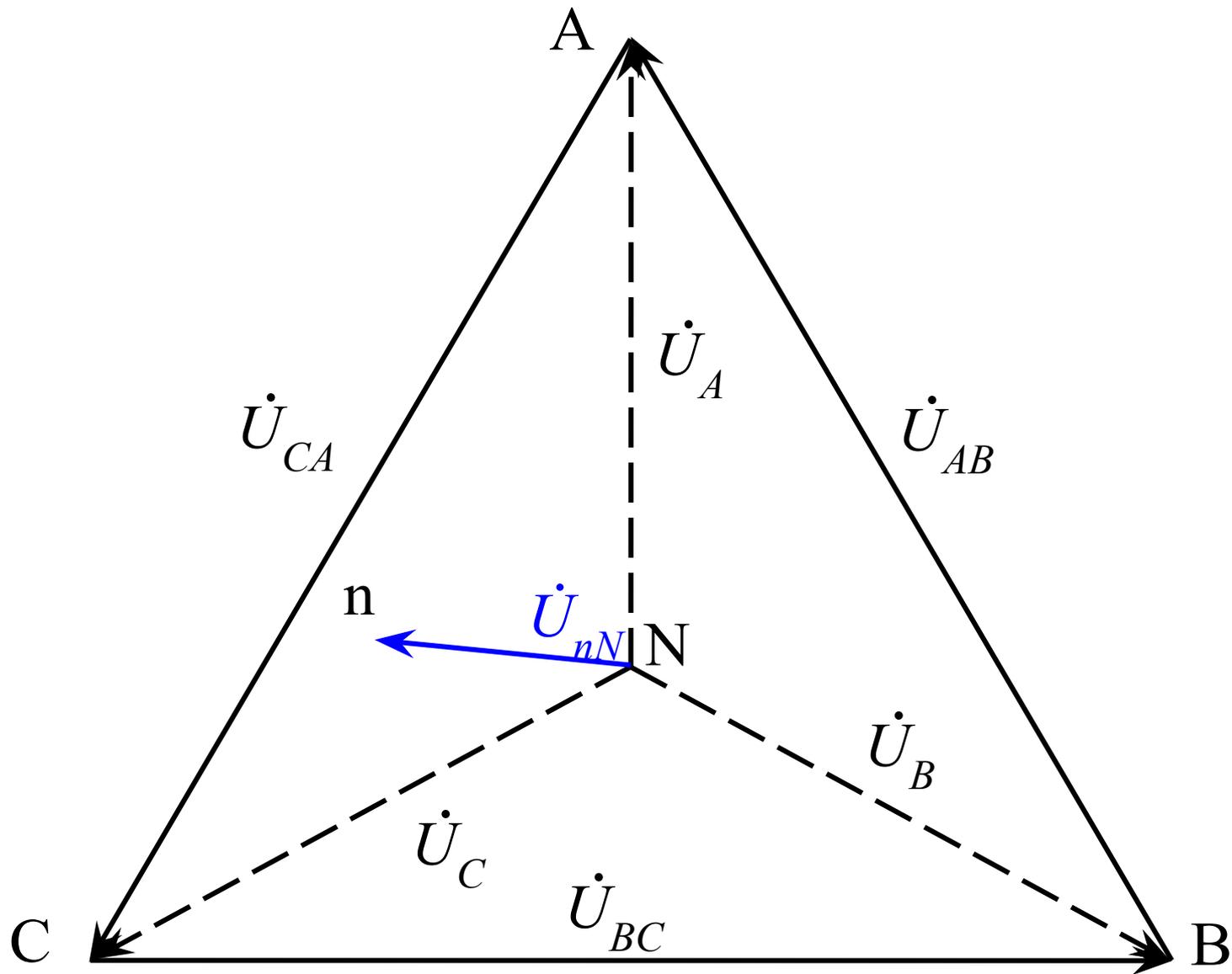
- Искажения фазных напряжений приемника также максимальны.
- Векторы фазных напряжений можно определить графически, построив векторную диаграмму фазных напряжений источника питания и

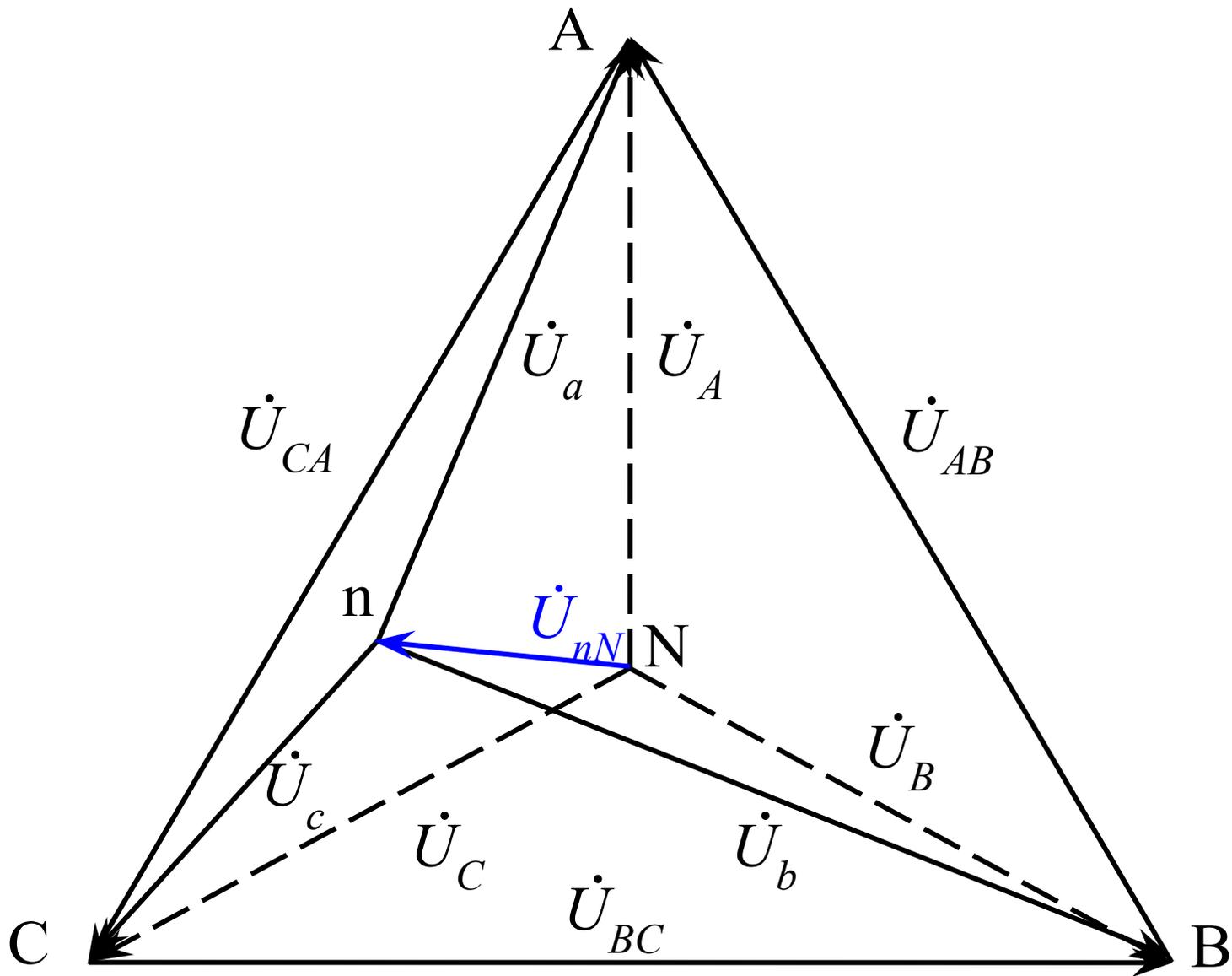
$$\underline{U}_{nN}$$

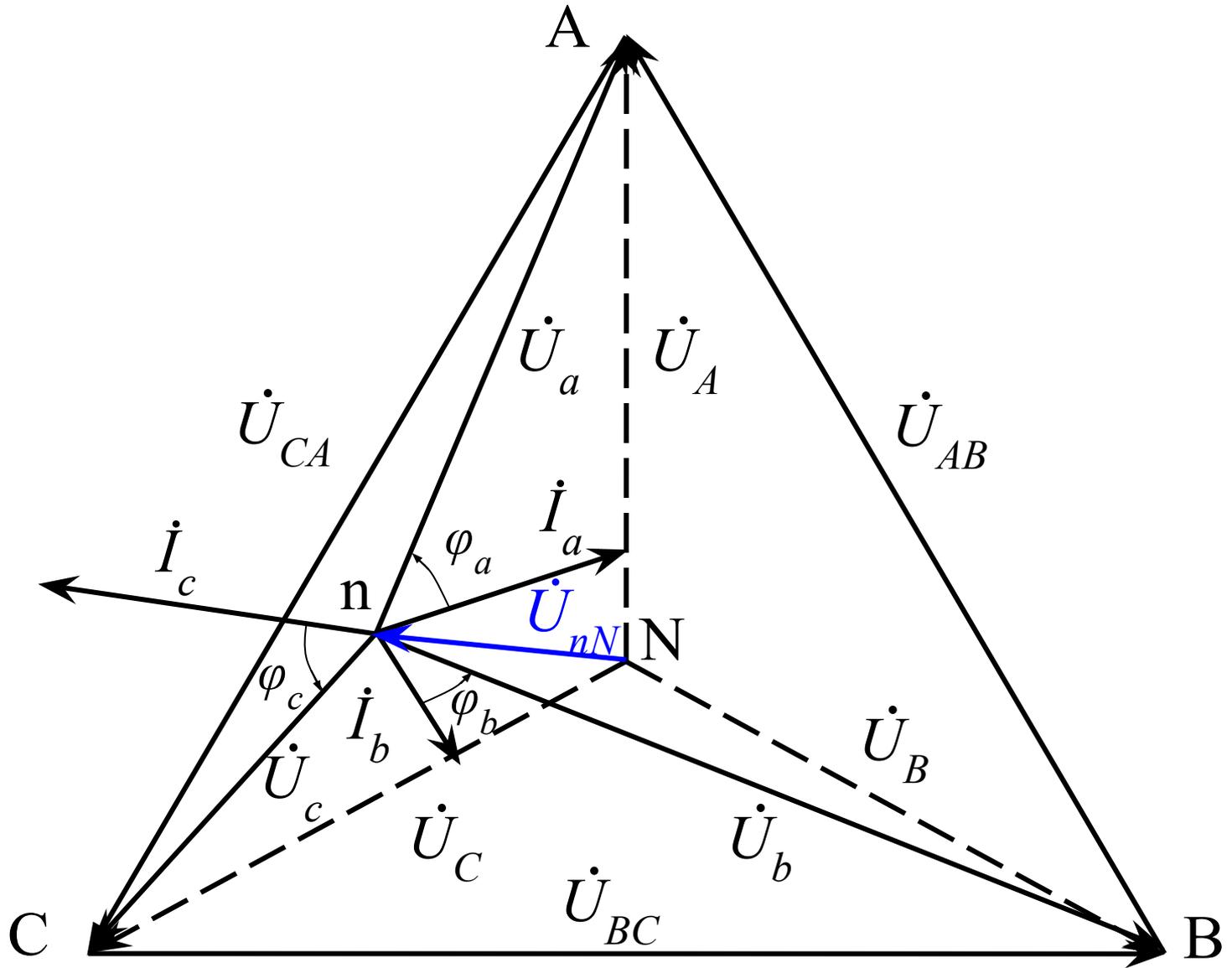


Подробнее









Трехпроводная электрическая цепь при несимметричном приемнике, соединенном "звездой" (продолжение)

- При изменении величины (или характера) фазных сопротивлений напряжение смещений нейтрали может изменяться в широких пределах. При этом нейтральная точка приемника n на диаграмме может занимать разные положения, а фазные напряжения приемника могут отличаться друг от друга весьма существенно.
- **Несимметричная нагрузка вызывает несимметрию ее фазных напряжений** и смещение ее нейтральной точки n из центра треугольника напряжений (смещение нейтрали).
- Направление смещения нейтрали зависит от последовательности фаз системы и характера нагрузки.



Значение нейтрального провода

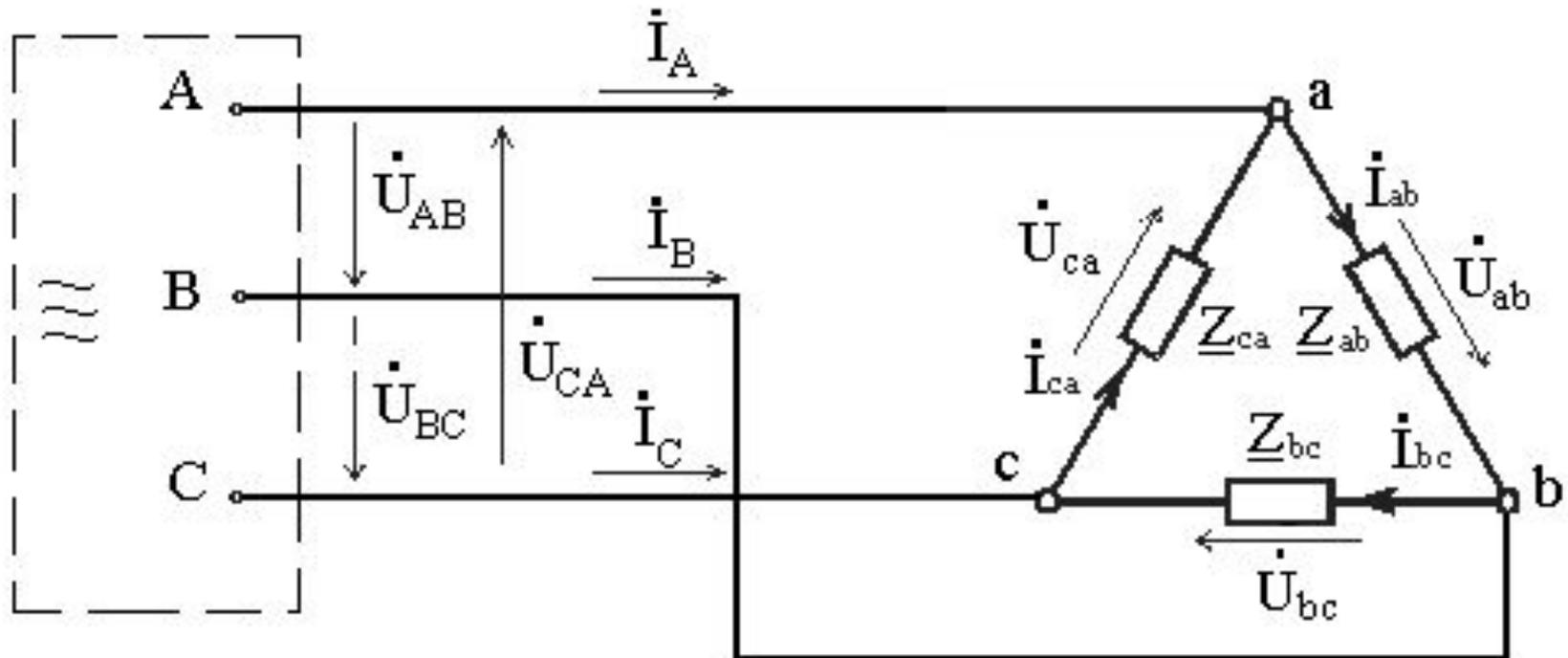
Нейтральный провод необходим для того, чтобы:

- **выравнивать фазные напряжения приемника при несимметричной нагрузке;**
- **подключать к трехфазной цепи однофазные приемники с номинальным напряжением в $\sqrt{3}$ раз меньше номинального линейного напряжения трехфазной сети.**

В цепь нейтрального провода нельзя ставить предохранитель, так как перегорание предохранителя приведет к разрыву нейтрального провода и появлению значительных перенапряжений на фазах нагрузки.



2. Расчет трехфазной цепи при соединении фаз приемника «треугольником»



2. Расчет трехфазной цепи при соединении фаз приемника «треугольником» (продолжение)

- Симметричный трехфазный источник представлен его зажимами A, B, C, N .
- К зажимам источника с помощью проводов линии передачи присоединены три фазы приемника, соединенные между собой способом «треугольник».
- В линии передачи три провода, соединяющие приемник с тремя зажимами источника A, B, C .
- Нейтральная точка источника не используется и **нейтрального провода** в такой трехфазной цепи **нет**.
- Задача расчета трехфазной цепи состоит в определении фазных и линейных токов при заданных напряжении трехфазного источника и сопротивлениях фаз приемника



2. Расчет трехфазной цепи при соединении фаз приемника «треугольником» (продолжение)

- Напряжение между концом и началом фазы при соединении треугольником – это **напряжение между линейными проводами**. Поэтому при соединении треугольником линейное напряжение равно фазному напряжению.

$$U_L = U_\phi.$$

- Пренебрегая сопротивлением линейных проводов, линейные напряжения потребителя можно приравнять линейным напряжениям источника питания:

$$U_{AB} = U_{ab}; \quad U_{BC} = U_{bc}; \quad U_{CA} = U_{ac}$$



2. Расчет трехфазной цепи при соединении фаз приемника «треугольником» (продолжение)

- По фазам $\underline{Z}_{ab}, \underline{Z}_{bc}, \underline{Z}_{ca}$ приемника замыкаются фазные токи $\underline{I}_{ab}, \underline{I}_{bc}, \underline{I}_{ca}$. Положительное направление фазных токов принимают от начала к концу фазы в соответствии с фазными напряжениями.
- Условное положительное направление линейных токов $\underline{I}_A, \underline{I}_B, \underline{I}_C$ принято от источников питания к приемнику.
- Токи в фазах приемника определяются по закону Ома:

$$\underline{I}_{ab} = \frac{\underline{U}_{ab}}{\underline{Z}_{ab}}; \underline{I}_{bc} = \frac{\underline{U}_{bc}}{\underline{Z}_{bc}}; \underline{I}_{ca} = \frac{\underline{U}_{ca}}{\underline{Z}_{ca}},$$



2. Расчет трехфазной цепи при соединении фаз приемника «треугольником» (продолжение)

- При соединении треугольником фазные токи не равны линейным. Линейные токи можно определить по фазным, составив уравнения по первому закону Кирхгофа для узлов a, b и c

$$I_A = I_{ab} - I_{ca}; I_B = I_{bc} - I_{ab}; I_C = I_{ca} - I_{bc},$$



$$I_A + I_B + I_C = 0$$

- **Сумма комплексных линейных токов равна нулю как при симметричной, так и при несимметричной нагрузке.**



Симметричная нагрузка

$$\underline{Z}_a = \underline{Z}_b = \underline{Z}_c = \underline{Z}_\phi = Z_\phi e^{\pm j\varphi}$$

- Линейные (они же фазные) напряжения U_{AB} , U_{BC} , U_{CA} симметричны, то и фазные токи образуют симметричную систему

$$\underline{I}_{ab} = \frac{\underline{U}_{ab}}{\underline{Z}_{ab}}; \underline{I}_{bc} = \frac{\underline{U}_{bc}}{\underline{Z}_{bc}}; \underline{I}_{ca} = \frac{\underline{U}_{ca}}{\underline{Z}_{ca}},$$

- Абсолютные значения их равны, а сдвиги по фазе относительно друг друга составляют 120° .
- Линейные токи $I_A = I_B = I_C = I_L$ образуют также симметричную систему токов.



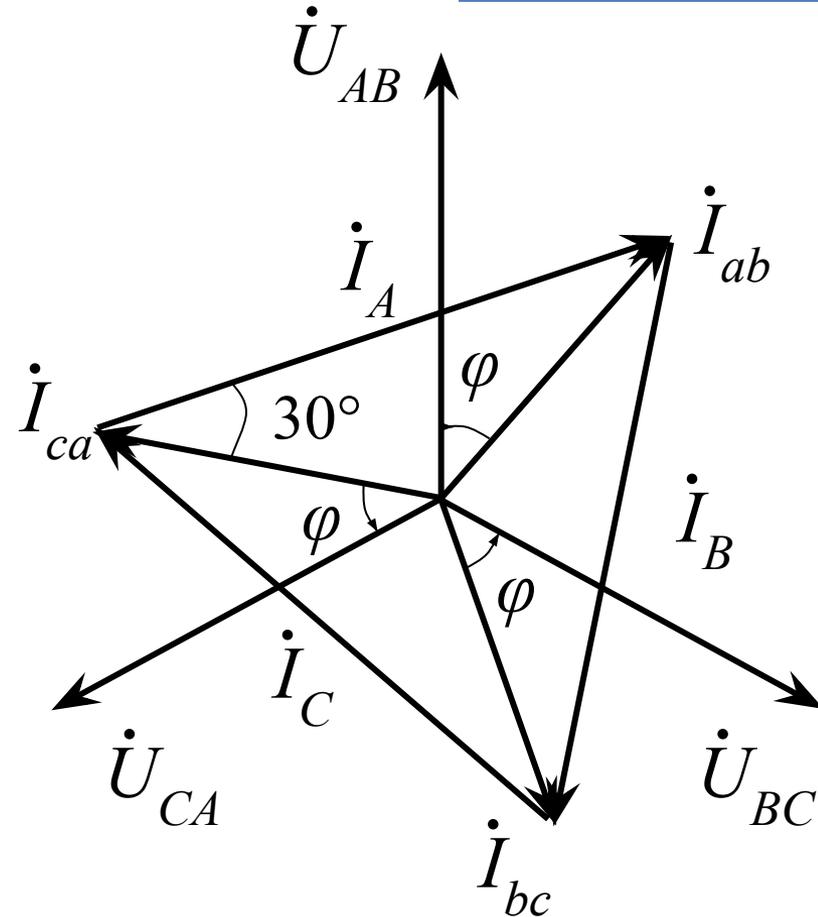
Симметричная нагрузка (продолжение)

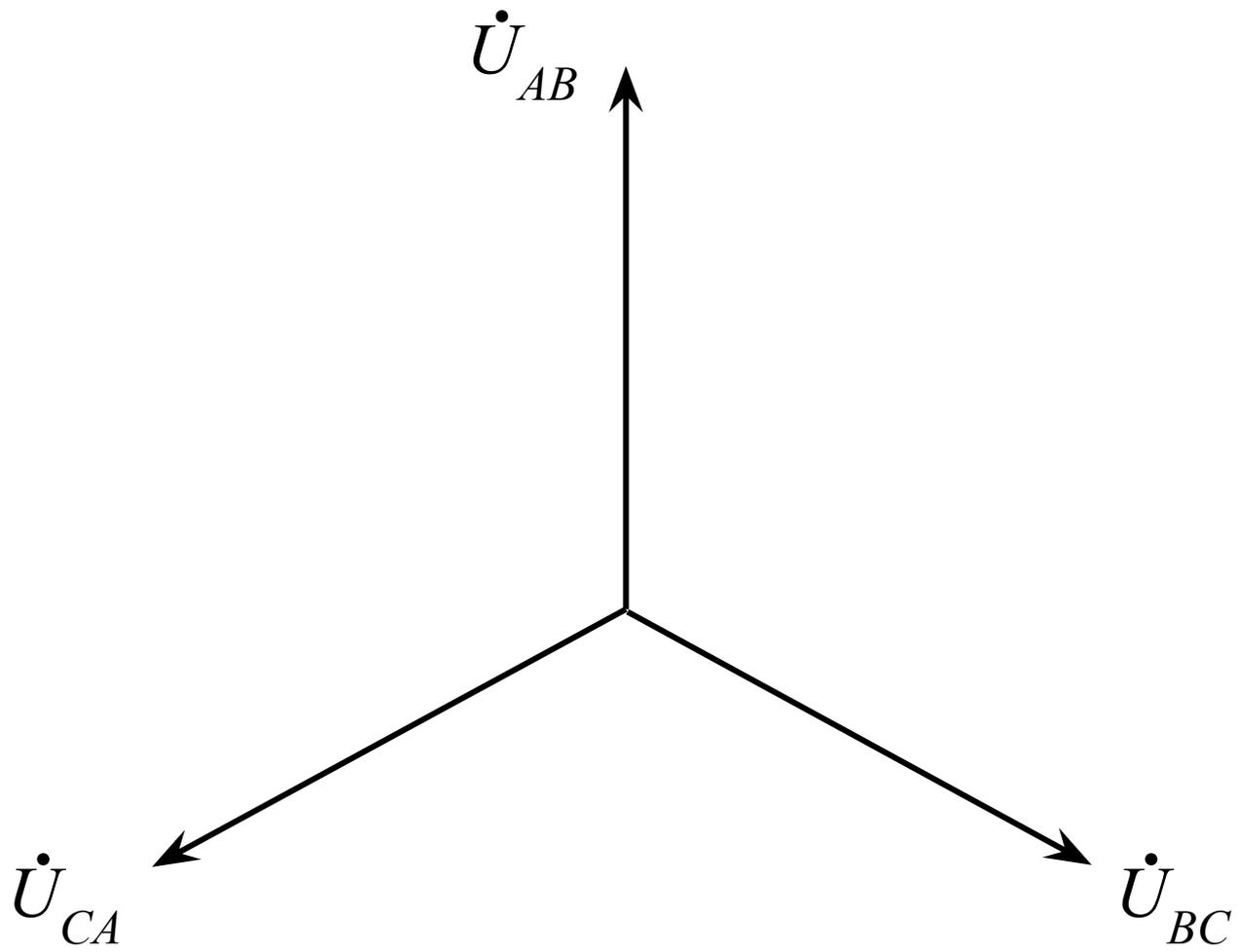
[Подробнее](#)

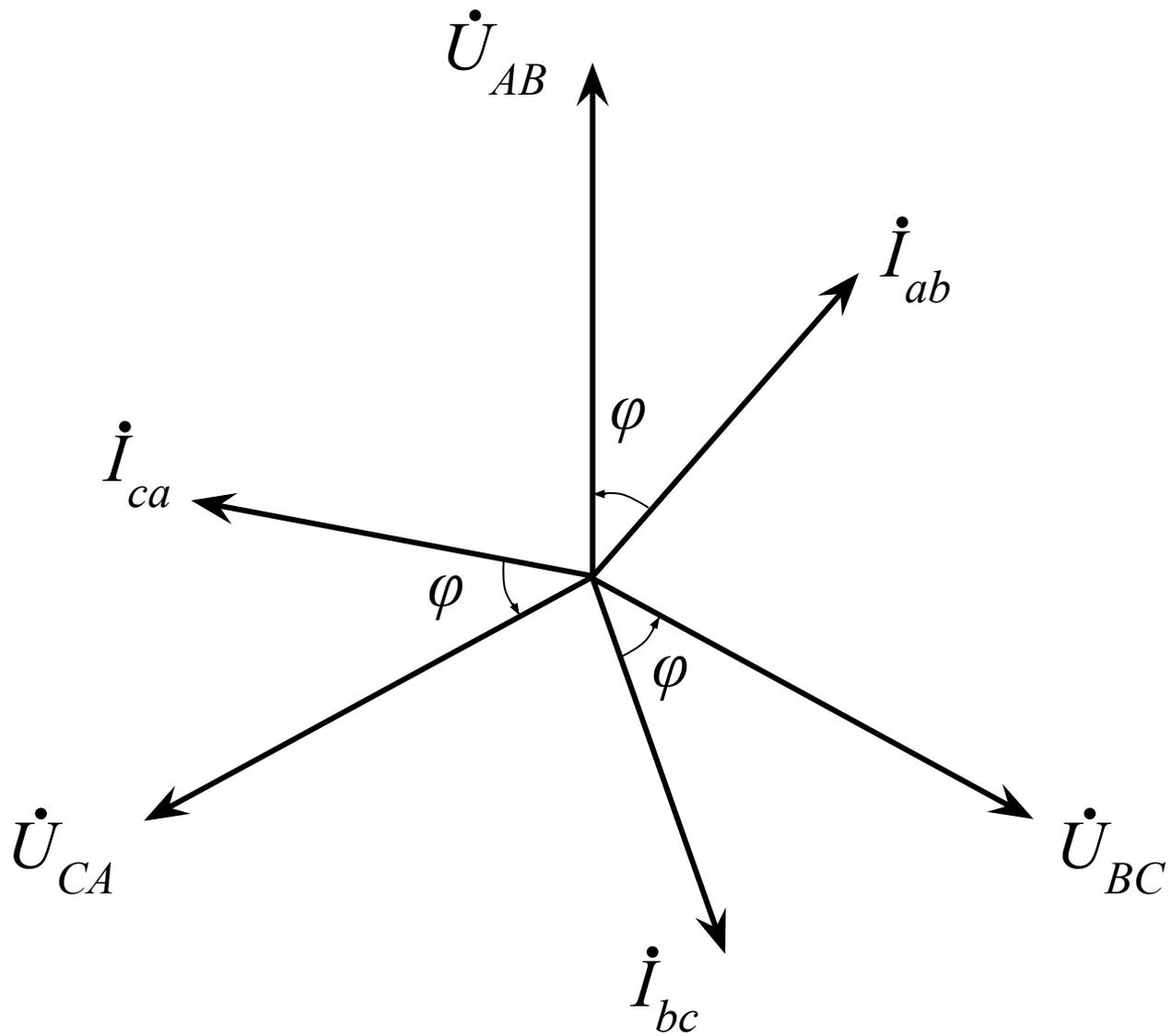
- На векторной диаграмме фазные токи отстают от фазных напряжений на угол φ ($\varphi > 0$). Напряжение \dot{U}_{AB} имеет нулевую фазу.
- Соотношение между линейными и фазными токами можно определить воспользовавшись векторной диаграммой

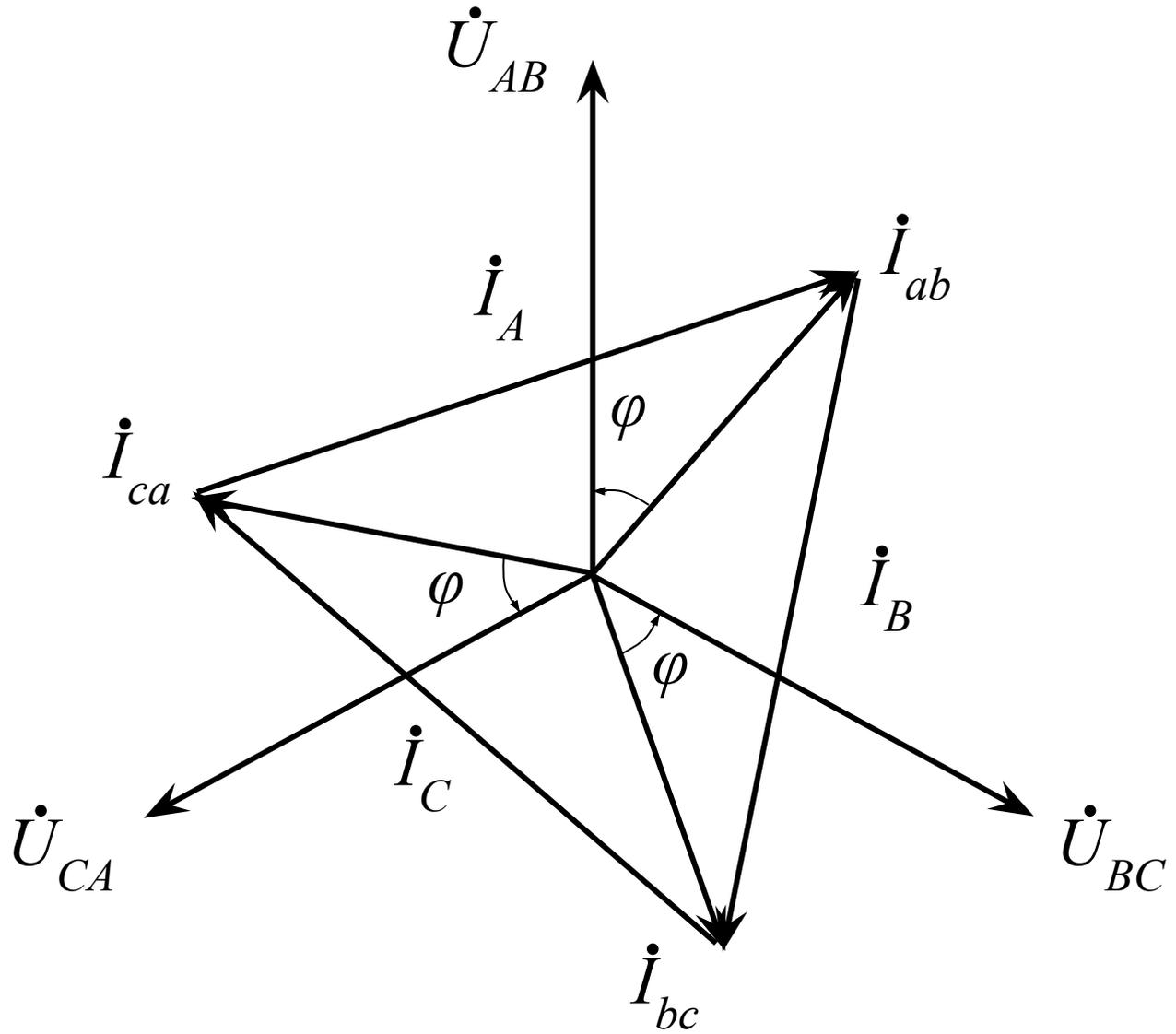
$$I_A = 2I_{ab} \cos 30^\circ = \sqrt{3}I_{ab}$$

$$I_L = \sqrt{3}I_\varphi, \quad I_\varphi = \frac{I_L}{\sqrt{3}}$$









Симметричная нагрузка (продолжение)

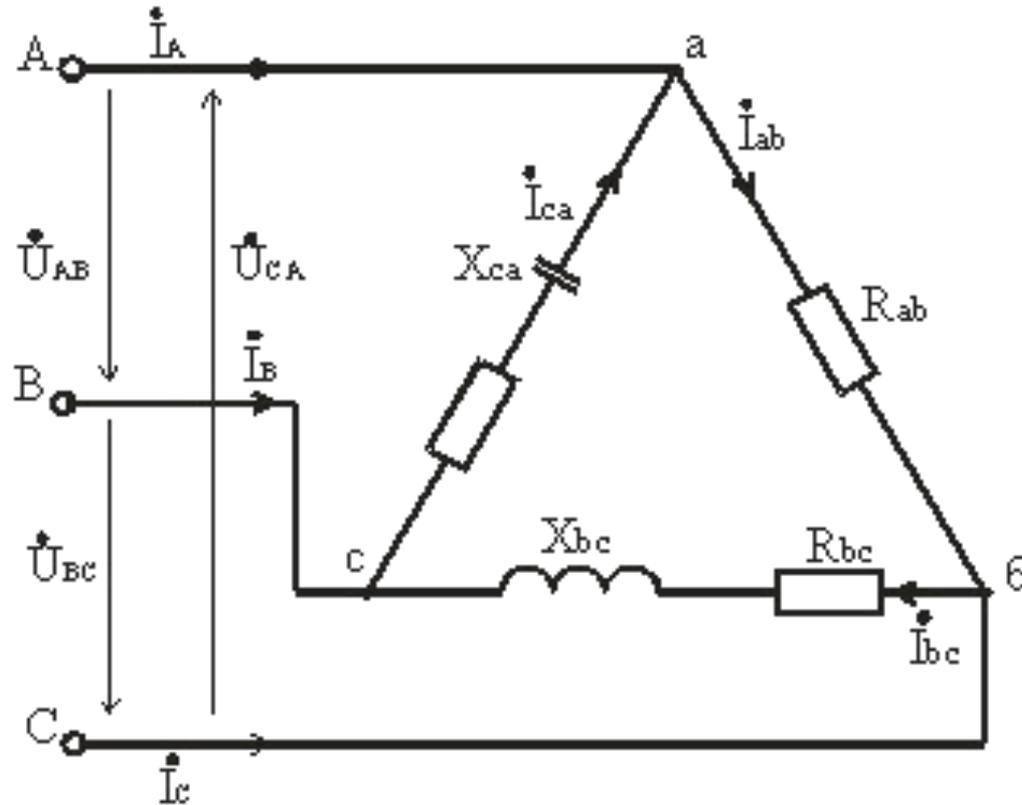
При симметричной нагрузке фаз расчет трехфазной цепи соединенной треугольником, можно свести к расчету одной фазы.

- Фазное напряжение $U_{\text{Л}} = U_{\text{Ф}}$.
- Фазный ток $I_{\text{Ф}} = U_{\text{Ф}} / Z_{\text{Ф}}$,
- Линейный ток $I_{\text{Л}} = I_{\text{Ф}}$,
- Угол сдвига по фазе $\varphi = \text{arctg} (X_{\text{Ф}} / R_{\text{Ф}})$.



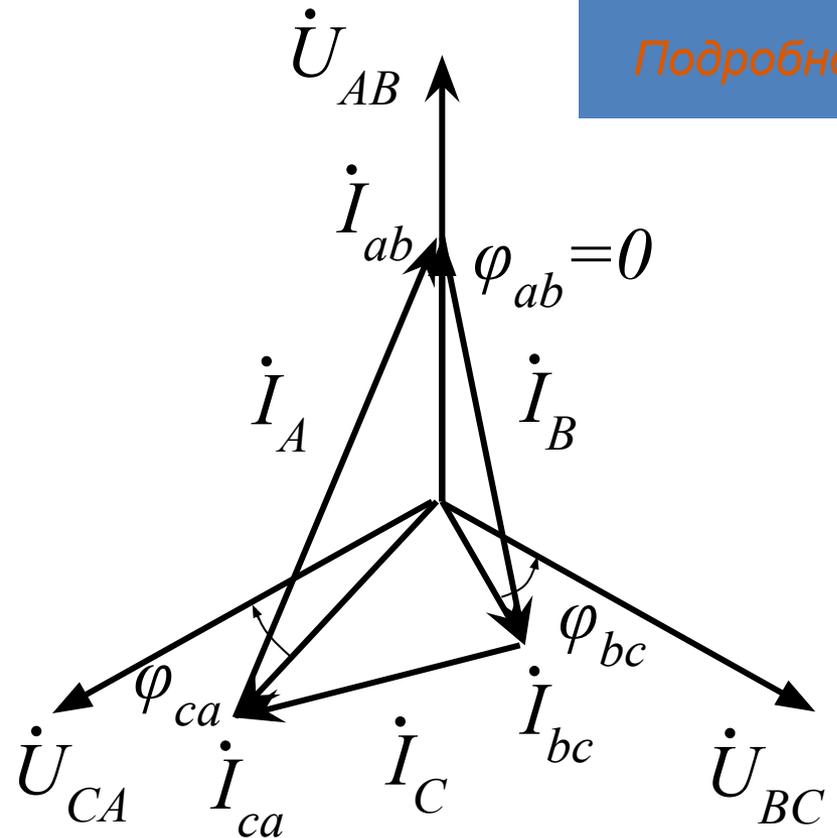
Несимметричная нагрузка

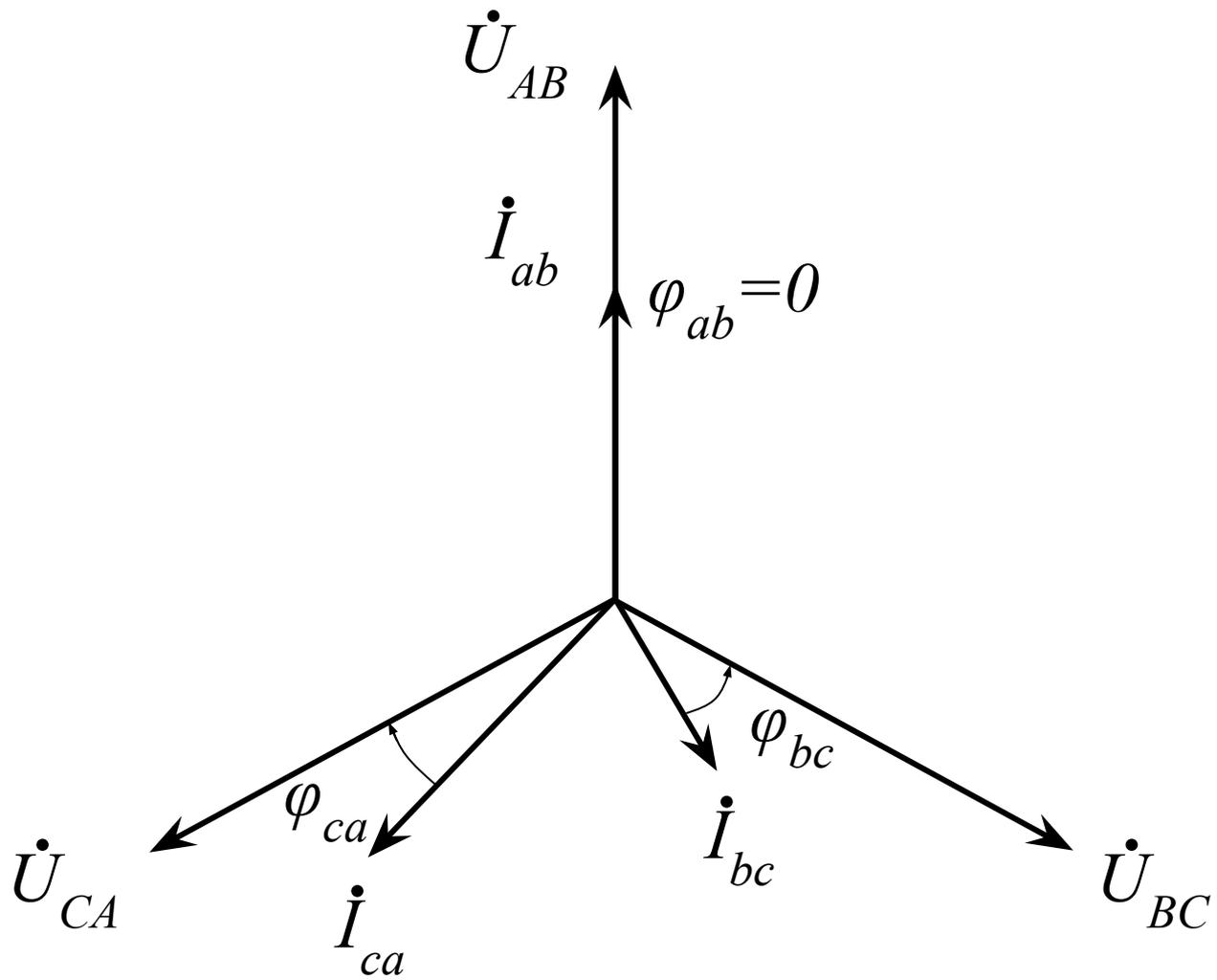
$$\underline{Z}_a \neq \underline{Z}_b \neq \underline{Z}_c$$

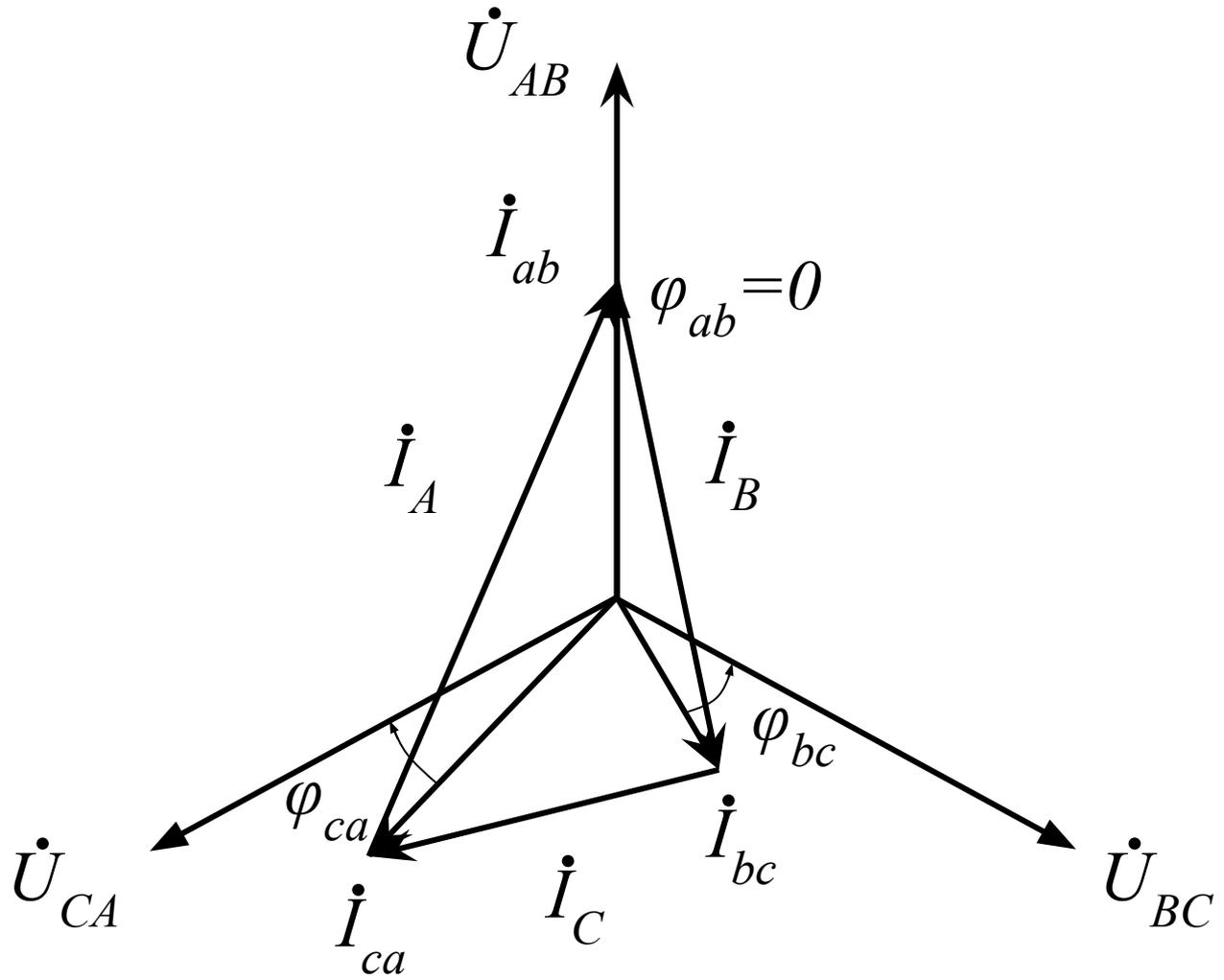


Несимметричная нагрузка (продолжение)

- При несимметричной нагрузке симметрия фазных токов \dot{I}_{ab} , \dot{I}_{bc} , \dot{I}_{ca} нарушается, поэтому линейные токи \dot{I}_A , \dot{I}_B , \dot{I}_C можно определить только расчетом или найти графически путем построений на векторной диаграмме







Несимметричная нагрузка (продолжение)

- Важная особенность соединения фаз приемника треугольником – **при изменении сопротивления одной из фаз режим работы других фаз остается неизменным**, так как линейные напряжения генератора являются неизменными. Будет изменяться только ток данной фазы и линейные токи в проводах линии, соединенных с этой фазой.
- Поэтому схема соединения треугольником широко используется для включения несимметричной нагрузки.
- При расчете для несимметричной нагрузки сначала определяют значения фазных токов и соответствующие им сдвиги фаз. Затем определяют линейные токи в комплексной форме или с помощью векторной диаграммы



3. Мощность трехфазной цепи

Активная мощность

$$P = P_a + P_b + P_c = U_a I_a \cos \varphi_a + U_b I_b \cos \varphi_b + U_c I_c \cos \varphi_c$$

Реактивная мощность

$$Q = Q_a + Q_b + Q_c = U_a I_a \sin \varphi_a + U_b I_b \sin \varphi_b + U_c I_c \sin \varphi_c$$

При соединении фаз приемников в треугольник в выражения фазных мощностей надо подставлять соответствующие фазные величины

$$P_{ab} = U_{ab} I_{ab} \cos \varphi_{ab}$$



3. Мощность трехфазной цепи (продолжение)

Полная мощность отдельных фаз

$$S_a = U_a I_a; S_b = U_b I_b; S_c = U_c I_c$$

Полная мощность трехфазного приемника

$$S = \sqrt{P^2 + Q^2}$$

В симметричном приемнике

$$P = 3P_\phi = 3U_\phi I_\phi \cos \varphi$$

$$Q = 3Q_\phi = 3U_\phi I_\phi \sin \varphi$$



3. Мощность трехфазной цепи (продолжение)

Для симметричного приемника независимо от способа соединения фаз

$$P = \sqrt{3}U_{Л} I_{Л} \cos \varphi$$

$$Q = \sqrt{3}U_{Л} I_{Л} \sin \varphi$$

$$S = \sqrt{3}U_{Л} I_{Л}$$



Заключение

1. При несимметричном приемнике, соединенном способом "звезда", сопротивление нейтрального провода оказывает существенное влияние на работу трехфазной цепи. При этом напряжение нейтрального провода искажает напряжения фаз приемника, создавая несимметрию фазных напряжений. При отсутствии нейтрального провода в цепи с несимметричным приемником фазные напряжения приемника искажаются в наибольшей степени.

Наличие нейтрального провода обеспечивает симметрию фазных напряжений приемника в соответствии с фазными напряжениями трехфазного источника.
2. При симметричном приемнике, соединенном "звездой", нейтральный провод не оказывает влияния на его работу. При этом фазные напряжения приемника остаются симметричными и соотносятся с линейными напряжениями: $U_L = \sqrt{3}U_\phi$

Заключение

3. При соединении фаз приемника способом "треугольник" фазные напряжения приемника определяются линейными напряжениями источника. Фазные токи могут быть определены по закону Ома для каждой из фаз. Линейные токи определяются фазными токами в соответствии с первым законом Кирхгофа.
4. При симметричном трехфазном приемнике, соединенном способом "треугольник", линейные токи симметричны. Соотношение линейных и фазных токов по величине: $I_L = \sqrt{3}I_\phi$
5. Мощность трехфазного приемника определяется суммарной мощностью фаз. При симметричном приемнике независимо от способа соединения фаз мощность трехфазного приемника определяется выражениями:

$$P = \sqrt{3}U_L I_L \cos \varphi$$

$$Q = \sqrt{3}U_L I_L \sin \varphi$$

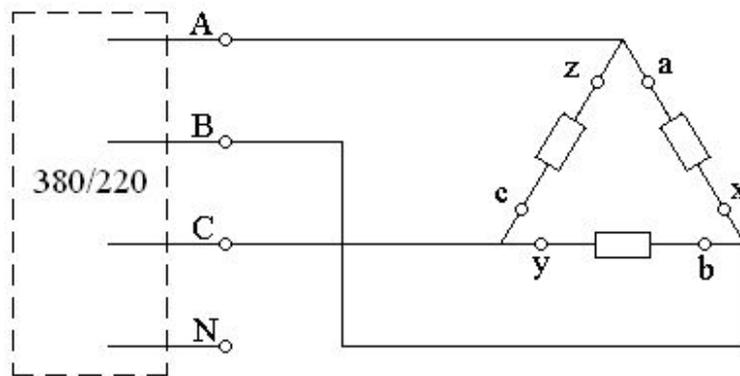
$$S = \sqrt{3}U_L I_L$$

Контрольные вопросы

Назначение нейтрального провода в трехфазной цепи при способе соединения фаз "звезда" -

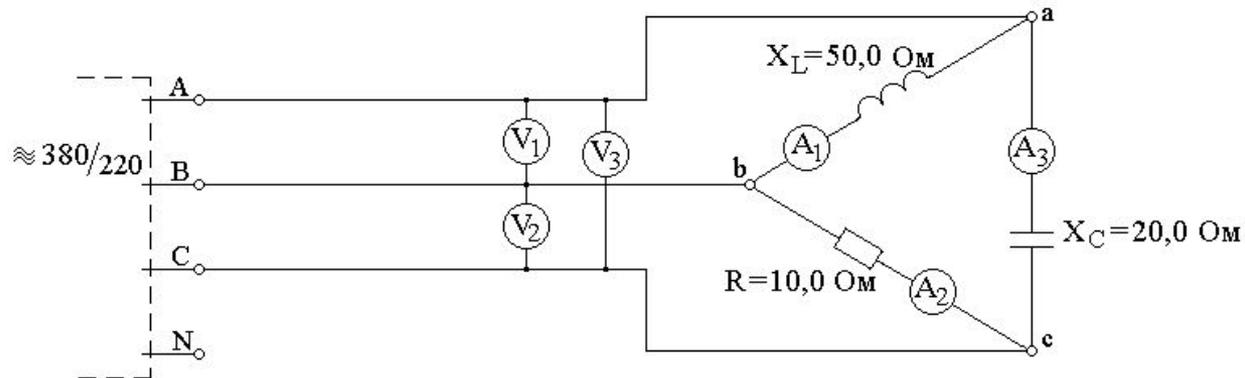
- уравнивание фазных напряжений
- уменьшение токов в фазах
- ограничение токов в линейных проводах
- увеличение КПД приемника
- обеспечение симметрии фазных напряжений

Напряжение между точками "а" и "х" в трехфазной электрической цепи равно ... Вольт.



Контрольные вопросы

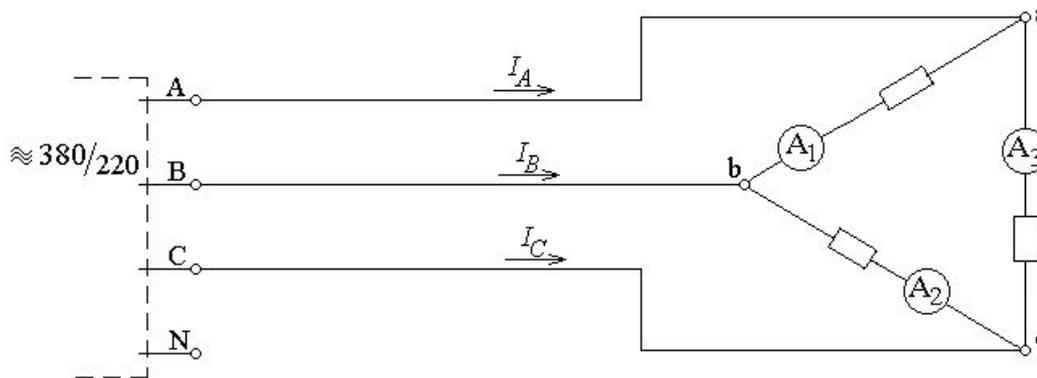
Определить показания приборов.



V_1	V_2	A_1	A_2
658 В	658 В	7,6 А	38,0 А
380 В	380 В	4,4 А	22,0 А
220 В	220 В	38,0 А	19,0 А

Контрольные вопросы

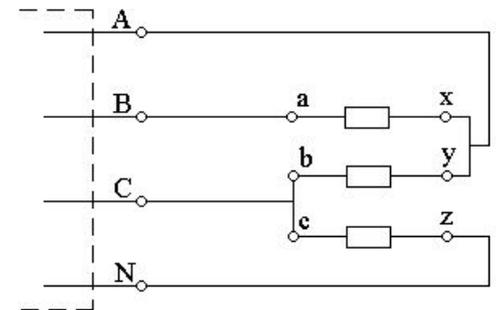
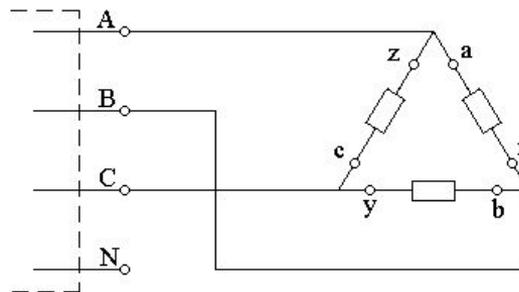
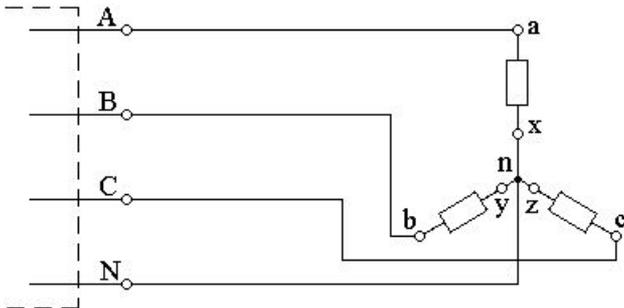
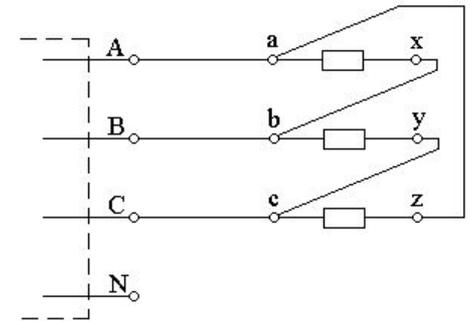
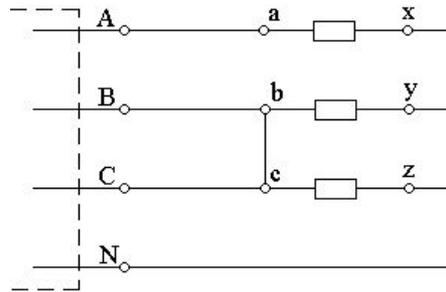
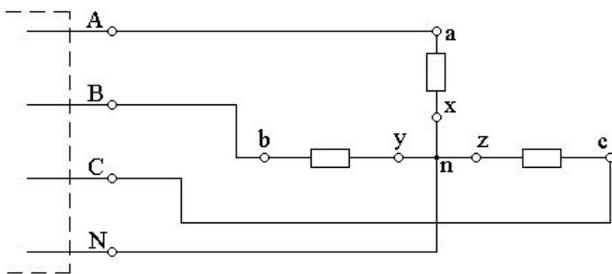
**Показания амперметров в трехфазной цепи: $I_{ab} = I_{bc} = I_{ca} = 10 \text{ A}$.
Определить линейный ток I_A .**



- $I_A = 30 \text{ A};$
- $I_A = 0;$
- $I_A = 3,33 \text{ A};$
- $I_A = 17,3 \text{ A};$
- $I_A = 5,78 \text{ A}.$

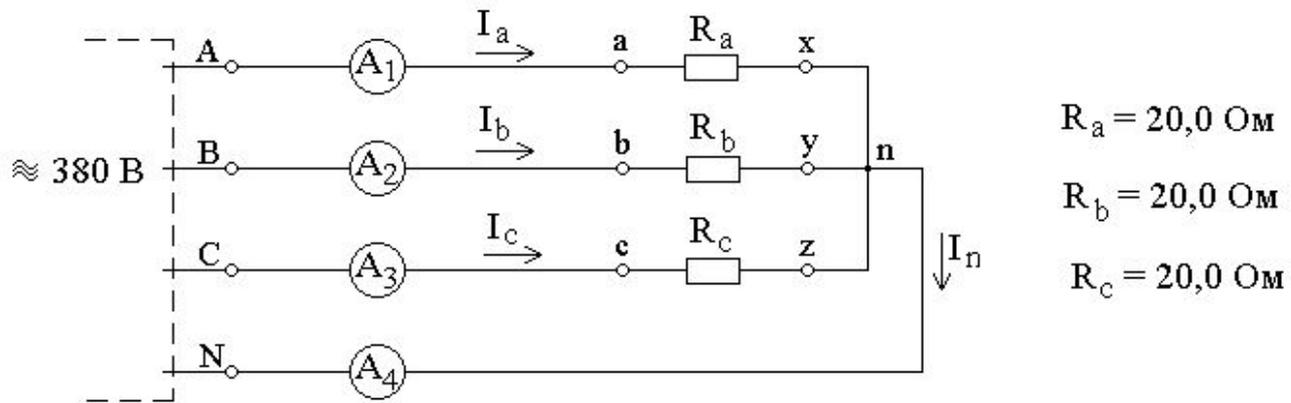
Контрольные вопросы

Указать схему, соответствующую способу соединения фаз приемника «треугольник».



Контрольные вопросы

Определить показания приборов в трехфазной цепи:



A_1	A_2	A_3	A_4
11,0 A	11,0 A	11,0 A	0,0 A
19,0 A	19,0 A	19,0 A	33,0 A
32,9 A	32,9 A	32,9 A	57,0 A