

## Лекция 8

# Модуль I. Электрические цепи

## Трёхфазные электрические цепи.

# Содержание



1. Основные понятия и определения
2. Создание трехфазной системы ЭДС
3. Способы соединения фаз в трехфазной цепи
4. Напряжения трехфазного источника
5. Классификация приемников в трехфазной цепи.
6. Расчет трехфазной цепи при соединении фаз приемника «звездой»

# 1. Основные понятия и определения

**Трехфазная цепь** – это совокупность трех электрических цепей, в которых действуют синусоидальные ЭДС, одинаковые по амплитуде и частоте, сдвинутые по фазе одна от другой на угол  $2\pi/3 = 120^\circ$  создаваемые общим источником энергии.

Каждую отдельную цепь, входящую в трехфазную цепь принято называть **фазой**.

Трехфазная цепь является частным случаем многофазных систем переменного тока.



# 1. Основные понятия и определения (продолжение)

## *Преимущества трехфазных цепей*

- экономичность производства и передачи энергии по сравнению с однофазными цепями;
- возможность простого получения кругового вращающегося магнитного поля, необходимого для трехфазного асинхронного двигателя;
- возможность получения в одной установке двух эксплуатационных напряжений – фазного и линейного.



# 1. Основные понятия и определения (продолжение)

Каждая фаза трехфазной цепи имеет стандартное наименование:

- первая фаза – фаза "A";
- вторая фаза – фаза "B";
- третья фаза – фаза "C".

Начала первой, второй и третьей фаз обозначаются соответственно  $A$ ,  $B$ ,  $C$ , а концы фаз –  $X$ ,  $Y$ ,  $Z$ .



# 1. Основные понятия и определения (продолжение)

Основными элементами трехфазной цепи являются:

- **трехфазный генератор**, преобразующий механическую энергию в электрическую;
- **линии электропередач**;
- **приемники** (потребители), которые могут быть как трехфазными (например, трехфазные асинхронные двигатели), так и однофазными (например, лампы накаливания).



## 2. Создание трехфазной системы ЭДС

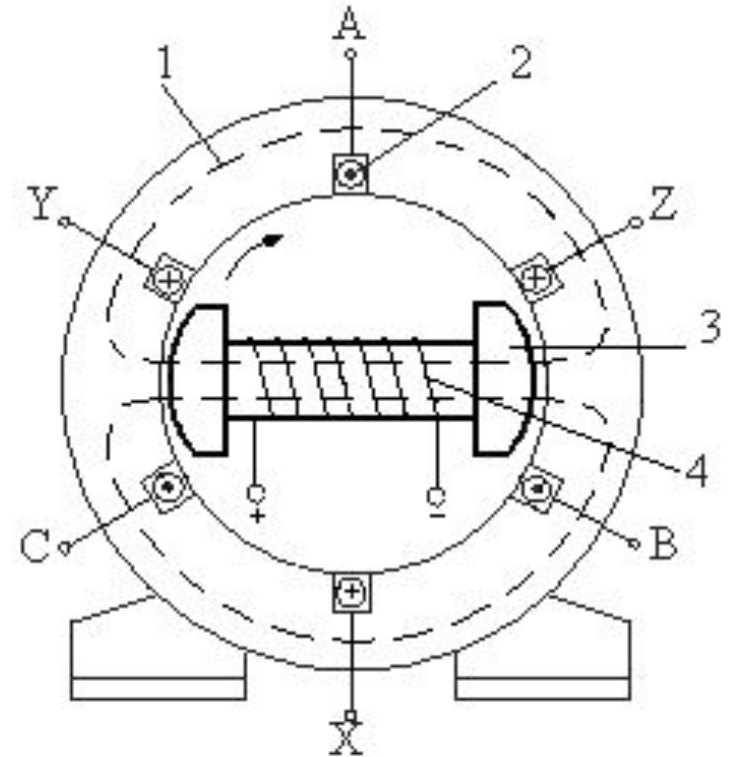
- Трехфазный генератор создает одновременно три ЭДС, одинаковые по величине и отличающиеся по фазе на  $120^\circ$ .
- Создание трехфазной системы ЭДС основано на принципе электромагнитной индукции, используемом в трехфазном генераторе.
- Трехфазный генератор представляет собой синхронную электрическую машину.



## 2. Создание трехфазной системы ЭДС (продолжение)

- На статоре **1** генератора размещается трехфазная обмотка **2**. Каждая фаза трехфазной обмотки статора – совокупность нескольких катушек с определенным количеством витков, расположенных в пазах статора. Магнитные оси фаз повернуты в пространстве на угол

$$2\pi/3 = 120^\circ$$



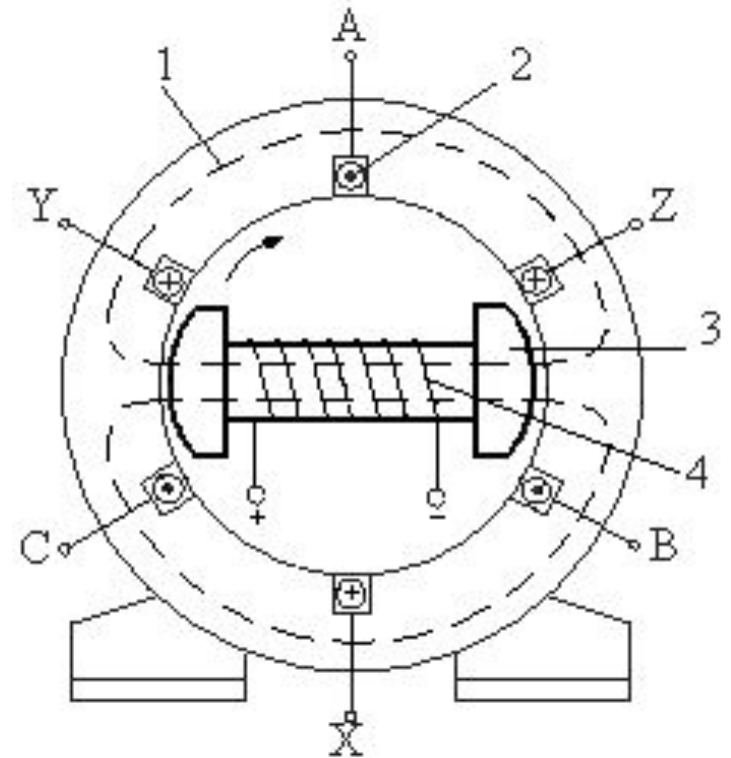
1 – статор; 2 – трехфазная обмотка; 3 – ротор; 4 – обмотка возбуждения





## 2. Создание трехфазной системы ЭДС (продолжение)

- Ротор 3 генератора представляет собой постоянный электромагнит, возбуждаемый постоянным током обмотки возбуждения 4. Ротор создает постоянное магнитное поле, силовые линии которого показаны на пунктиром. При работе генератора это магнитное поле вращается вместе с ротором.



1 – статор; 2 – трехфазная обмотка; 3 – ротор; 4 – обмотка возбуждения



## 2. Создание трехфазной системы ЭДС (продолжение)

- При вращении ротора турбиной с постоянной скоростью происходит пересечение проводников обмотки статора с силовыми линиями магнитного поля. При этом в каждой фазе индуцируется синусоидальная ЭДС.
- Величина этой ЭДС определяется интенсивностью магнитного поля ротора и количеством витков в обмотке.
- Частота этой ЭДС определяется частотой вращения ротора.
- ЭДС всех фаз имеют одинаковую амплитуду  $E_m$  и частоту  $\omega$ , поскольку все фазы обмотки статора имеют одинаковое количество витков и взаимодействуют с одним и тем же магнитным полем вращающегося ротора.



## Изображение трехфазной симметричной системы ЭДС тригонометрическими функциями

- Примем начальную фазу ЭДС фазы А, равной нулю, то есть  $\psi_{e_A} = 0$

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

- ЭДС фазы В отстает от ЭДС фазы А на  $2\pi/3$

$$e_B = E_m \sin\left(\omega t - \frac{2\pi}{3}\right) = E_m \sin(\omega t - 120)$$

- ЭДС фазы С отстает от ЭДС фазы В на  $2\pi/3$

$$e_C = E_m \sin\left(\omega t - \frac{4\pi}{3}\right) = E_m \sin(\omega t - 240)$$

$$E_A = E_B = E_C = \frac{E_m}{\sqrt{2}} = E$$



## Изображение трехфазной симметричной системы ЭДС функциями комплексного переменного

- В комплексном виде ЭДС фаз изображаются их комплексными действующими значениями:

$$\underline{E}_A = E e^{j0^\circ} = E$$

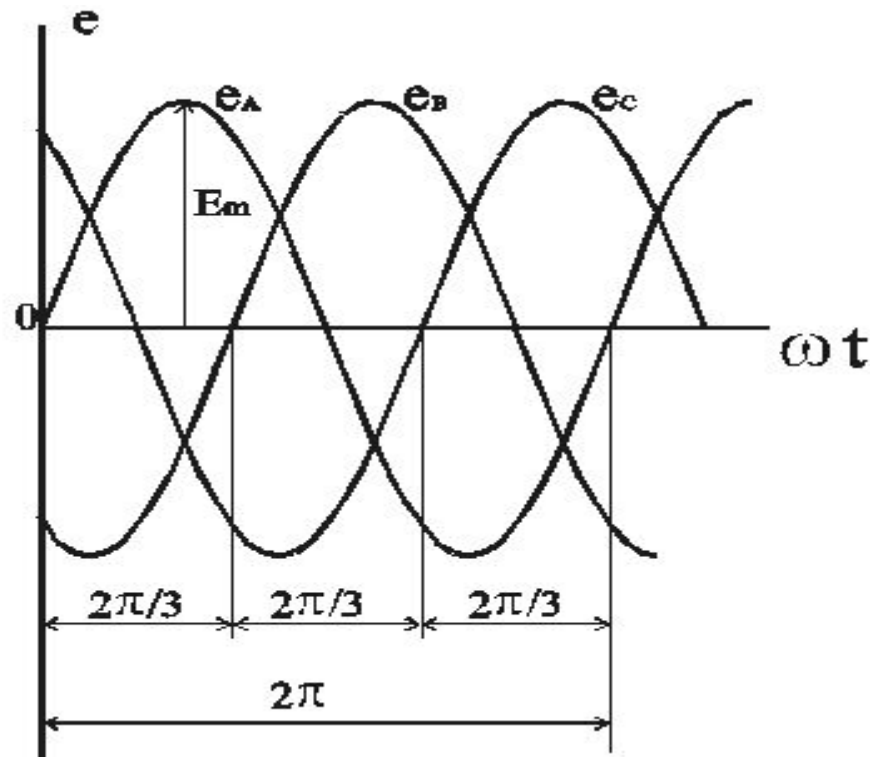
$$\underline{E}_B = E e^{-j120^\circ}$$

$$\underline{E}_C = E e^{-j240^\circ}$$



# Изображение трехфазной симметричной системы ЭДС графиками на временных диаграммах

- Графики представляют из себя три синусоиды, сдвинутые друг относительно друга на  $1/3$  часть периода.



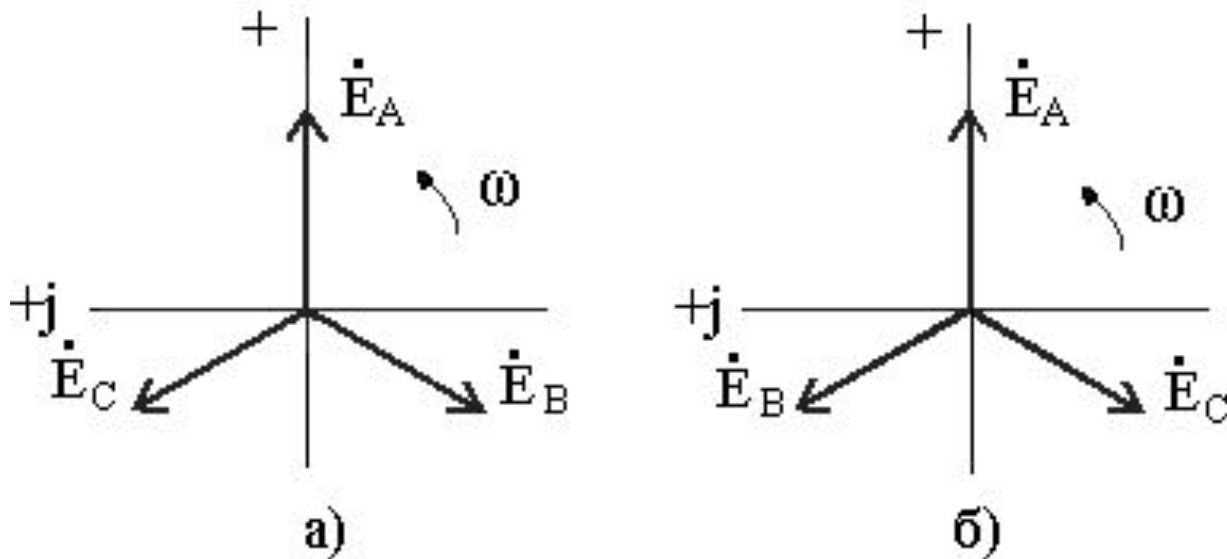
Графики мгновенных значений трехфазной симметричной системы ЭДС



# Изображение трехфазной симметричной системы ЭДС векторами на векторных диаграммах



- На векторной диаграмме ЭДС фаз изображаются векторами одинаковой длины, повернутыми друг относительно друга на угол  $120^\circ$



а – прямая последовательность фаз;  
б – обратная последовательность фаз.

# Изображение трехфазной симметричной системы ЭДС векторами на векторных диаграммах (Продолжение)

- Трехфазная система ЭДС является **симметричной**, так как ЭДС имеют одинаковые амплитуды и сдвинуты по фазе относительно друг друга на один и тот же угол  $120^\circ$ .
- При вращении ротора по часовой стрелке полученная симметричная трехфазная система ЭДС имеет **прямое** чередование (А – В – С) **рис.а** При вращении ротора против часовой стрелки образуется также симметричная трехфазная система ЭДС, но чередование фазных ЭДС во времени изменяется. Такое чередование называется **обратным** (А – С – В).

рис.б



# Изображение трехфазной симметричной системы ЭДС векторами на векторных диаграммах

(Продолжение)

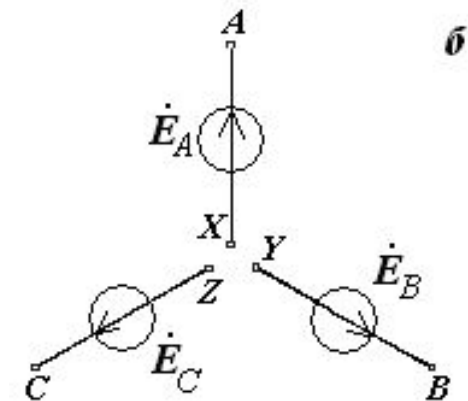
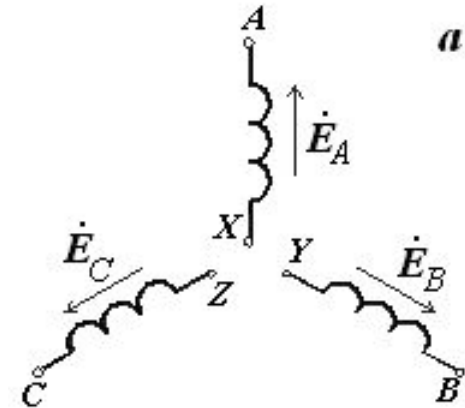
- Чередование фазных ЭДС важно учитывать при анализе трехфазных цепей и устройств. Например, последовательность фаз определяет направление вращения трехфазных двигателей, и т.п.
- Для практического определения последовательности фаз используются специальные приборы – **фазоуказатели**.
- По умолчанию при построении трехфазных цепей и их анализе принимается прямое чередование фазных ЭДС трехфазного источника.





## Условное изображение обмотки статора генератора

- На схемах обмотку статора генератора изображают (рис. а) с использованием принятых обозначений начал и концов фаз.
- На схеме замещения трехфазный источник представлен тремя идеальными источниками ЭДС (рис. б)
- За условное положительное направление ЭДС в каждой фазе принимают направление от конца фазы к началу.



## 3. Способы соединения фаз в трехфазной цепи

- Для построения трехфазной цепи к каждой фазе трехфазного источника присоединяется отдельный приемник электроэнергии, либо одна фаза трехфазного приемника.
- Представим трехфазный источник тремя идеальными источниками ЭДС. Три фазы приемника – условно идеальными элементами с полными комплексными сопротивлениями. В такой цепи три фазы объединены лишь конструктивно и не имеют между собой электрической связи. Такая цепь называется **несвязанной трехфазной цепью** и практически не используется.



### 3. Способы соединения фаз в трехфазной цепи (продолжение)

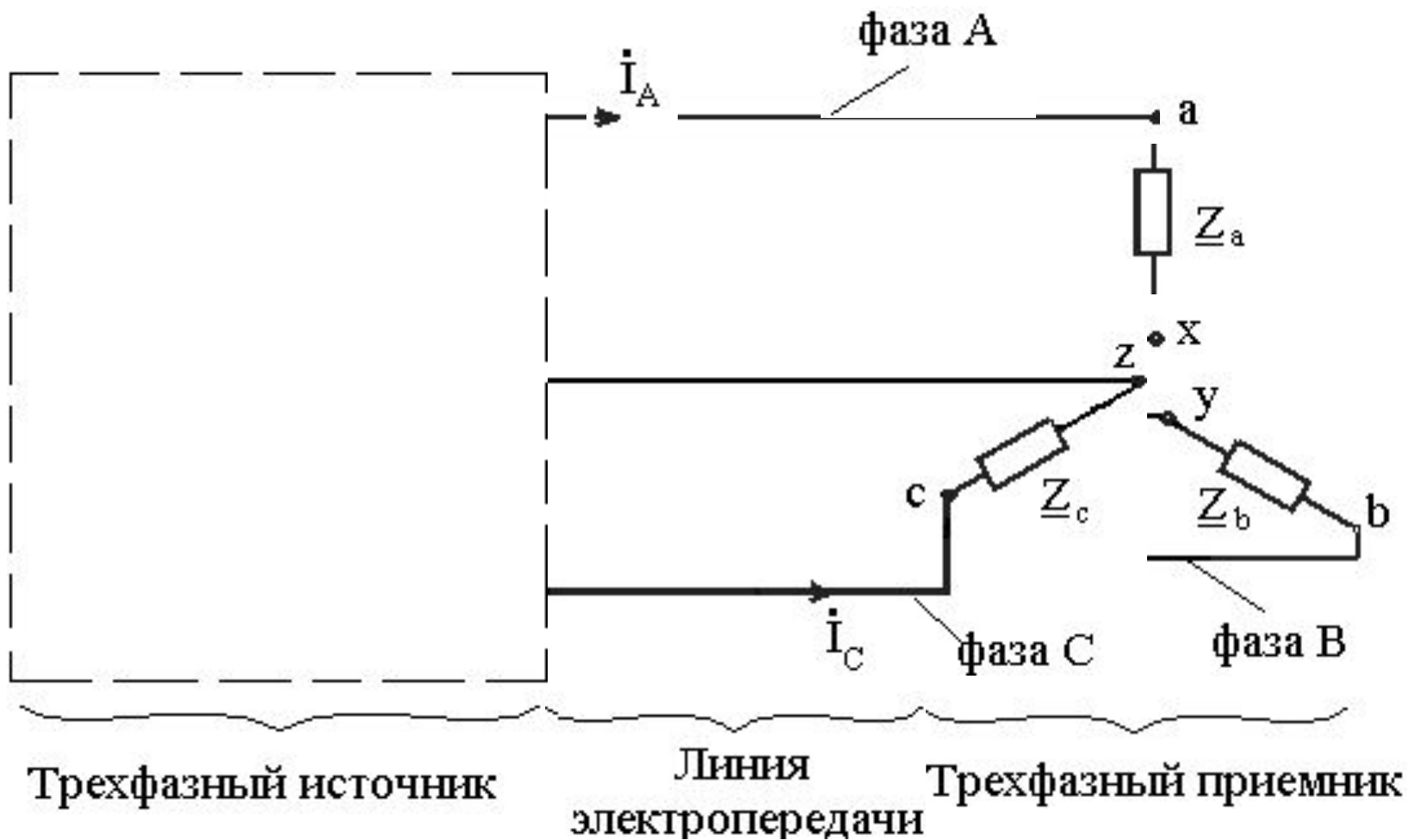


Схема несвязанной трехфазной цепи



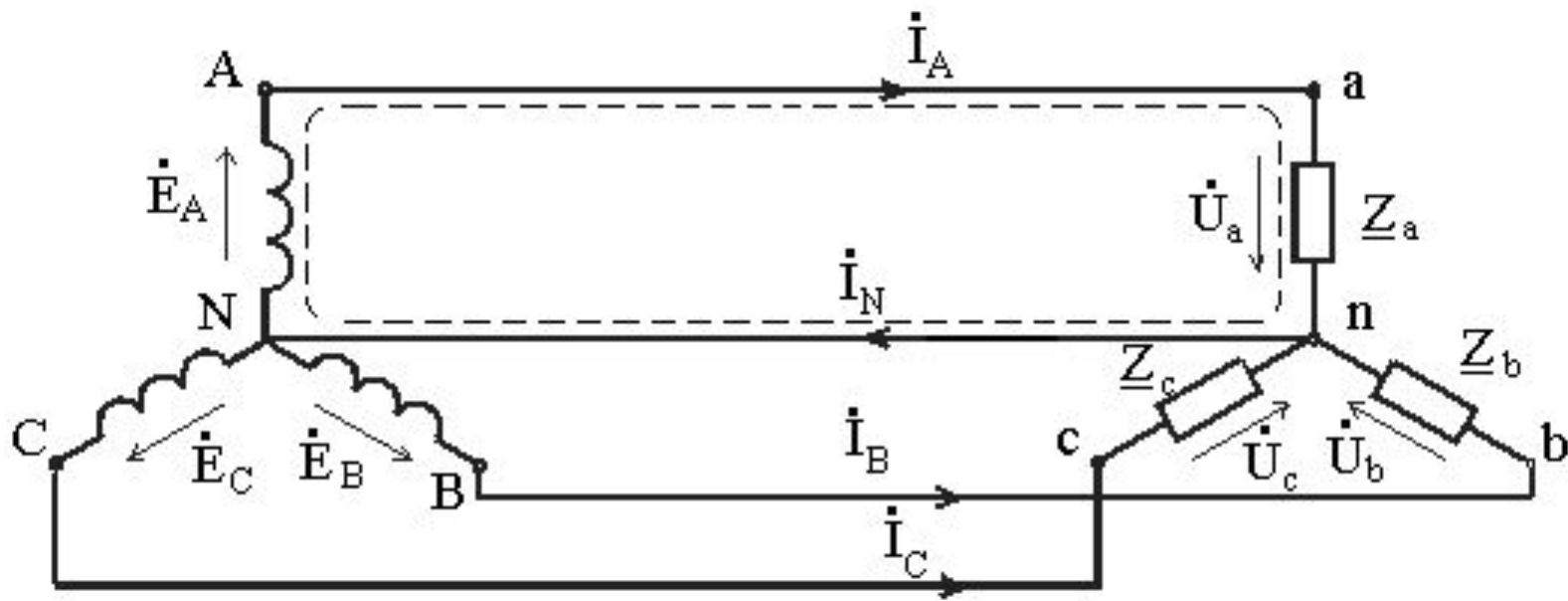
### 3.Способы соединения фаз в трехфазной цепи (продолжение)

- На практике три фазы трехфазной цепи соединены между собой (электрически связаны).
- Наиболее распространенными способами соединения фаз трехфазных источников и трехфазных потребителей электроэнергии являются соединения "**звезда**" и "**треугольник**".
- При этом способ соединения фаз источников и фаз потребителей в трехфазных системах могут быть различными. Фазы источника обычно соединены "звездой", фазы потребителей соединяются либо "звездой", либо "треугольником".



## Соединение "звезда".

- При соединении фаз обмотки генератора (или трансформатора) "звездой" их концы  $X$ ,  $Y$  и  $Z$  соединяют в одну общую точку  $N$  – нейтральную точку (или нейтраль)
- Концы фаз приемников  $x$ ,  $y$ ,  $z$  соединяют в одну точку  $n$  (нейтральная точка приемника)



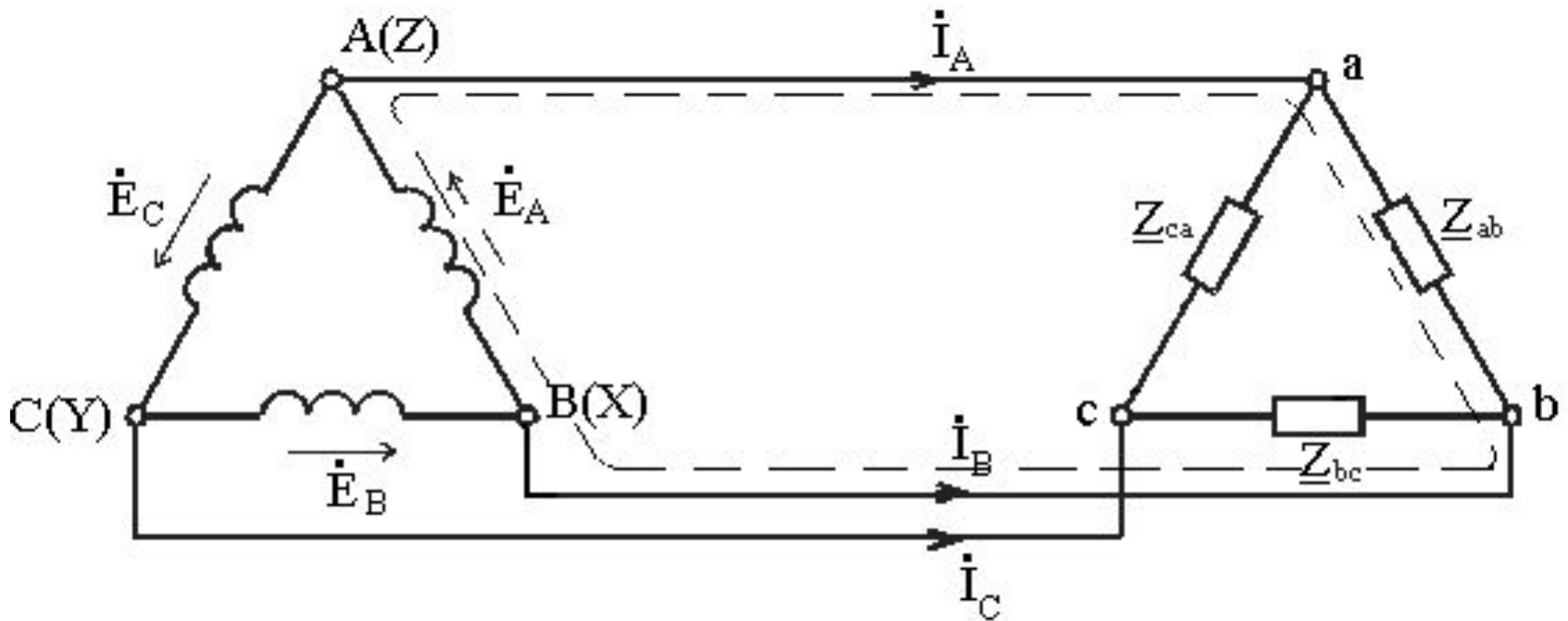
## Соединение "звезда" (продолжение).

- Провода  $A-a$ ,  $B-b$  и  $C-c$ , соединяющие начала фаз генератора и приемника, называются **линейными проводами**. Провод  $N-n$ , соединяющий точку  $N$  генератора с точкой  $n$  приемника, называют **нейтральным проводом**.
- Каждая фаза представляет собой электрическую цепь.
- В отличие от несвязанной трехфазной цепи, в линии передачи используется меньшее количество проводов. Это определяет одно из преимуществ трехфазных цепей – экономичность передачи энергии.



## Соединение "треугольник".

- конец  $X$  одной фазы соединяется с началом  $B$  второй фазы, конец  $Y$  второй фазы – с началом  $C$  третьей фазы, конец третьей фазы  $Z$  – с началом первой фазы  $A$
- Фазы приемника соединены способом "треугольник"



## Соединение "треугольник" (продолжение).

- Каждая фаза представляет собой электрическую цепь, в которой приемник подключен к соответствующей фазе источника посредством двух линейных. Однако в линии передачи используется еще меньшее количество проводов. Это делает передачу электроэнергии еще более экономичной
- При способе соединения "треугольник" фазы приемника именуют двумя символами в соответствии с линейными проводами, к которым данная фаза подключена: фаза "*ab*", фаза "*bc*", фаза "*ca*". Параметры фаз обозначают соответствующими индексами:

$$\underline{Z}_{ab}, \underline{Z}_{bc}, \underline{Z}_{ca}$$



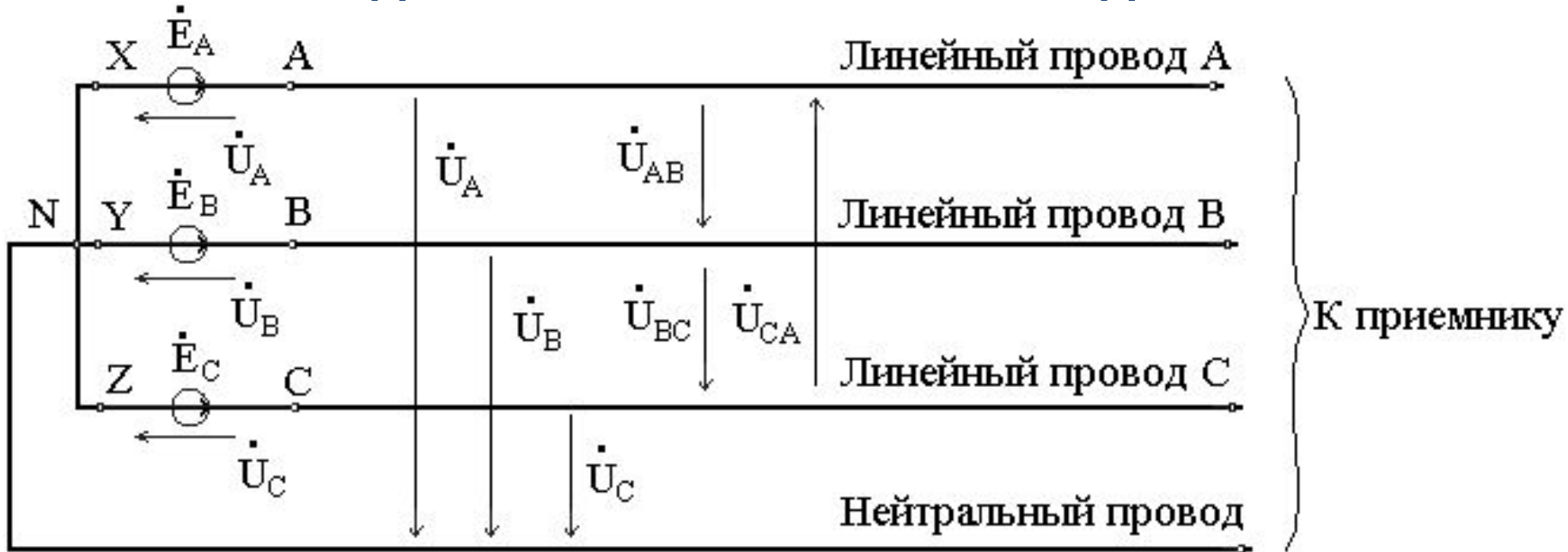


## 4. Напряжения трехфазного источника

- Напряжения трехфазного источника, соединенного способом «звезда»
- Напряжения трехфазного источника, соединенного способом «треугольник»



## Напряжения трехфазного источника, соединенного способом «звезда» (Продолжение)



- $\dot{U}_A, \dot{U}_B, \dot{U}_C$  **фазное напряжение**  $U_\phi$  – напряжение между началом и концом фазы или между линейным проводом и нейтралью
- $\dot{U}_{AB}, \dot{U}_{BC}, \dot{U}_{CA}$  **линейное напряжение**  $U_\Delta$  – напряжение между линейными проводами или между началами фаз



## Напряжения трехфазного источника, соединенного способом «звезда» (Продолжение)

$$\underline{E}_A = \underline{U}_A; \quad \underline{E}_B = \underline{U}_B; \quad \underline{E}_C = \underline{U}_C;$$

$$\underline{U}_A = U_\phi e^{j0^\circ}; \quad \underline{U}_B = U_\phi e^{-j120^\circ}; \quad \underline{U}_C = U_\phi e^{-j240^\circ}$$

Если принять потенциал нейтрали генератора  $\underline{\varphi}_N = 0$

$$\underline{U}_A = \underline{\varphi}_A - \underline{\varphi}_N = \underline{\varphi}_A; \quad \underline{U}_B = \underline{\varphi}_B - \underline{\varphi}_N = \underline{\varphi}_B; \quad \underline{U}_C = \underline{\varphi}_C - \underline{\varphi}_N = \underline{\varphi}_C$$

Тогда

$$\underline{U}_{AB} = \underline{\varphi}_A - \underline{\varphi}_B = \underline{U}_A - \underline{U}_B; \quad \underline{U}_{BC} = \underline{\varphi}_B - \underline{\varphi}_C = \underline{U}_B - \underline{U}_C;$$

$$\underline{U}_{CA} = \underline{\varphi}_C - \underline{\varphi}_A = \underline{U}_C - \underline{U}_A$$

По этим уравнениям построим топографическую  
векторную диаграмму

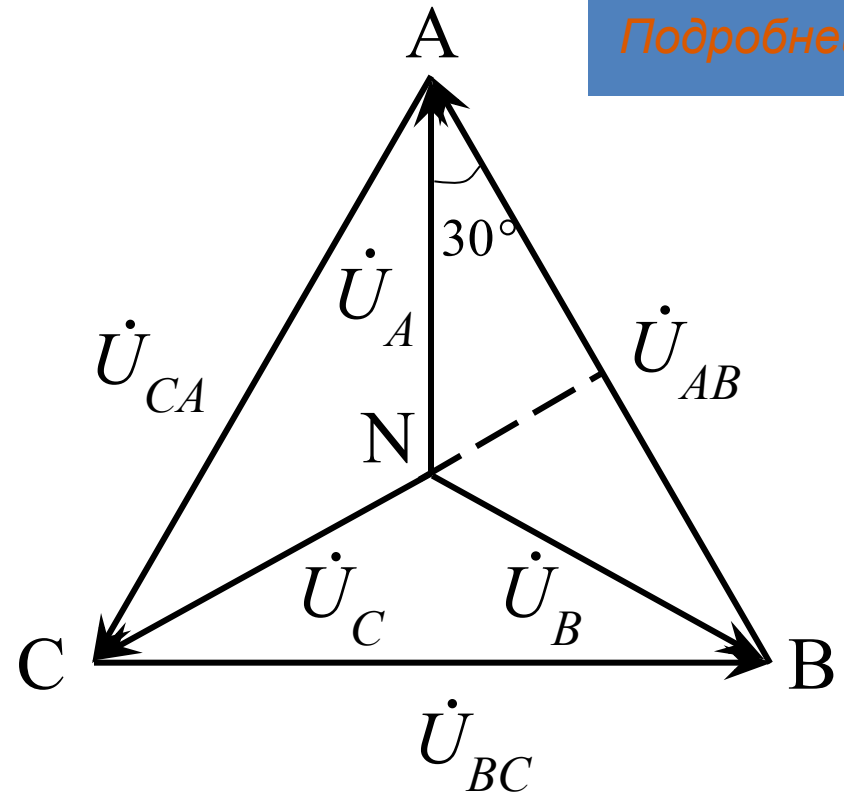


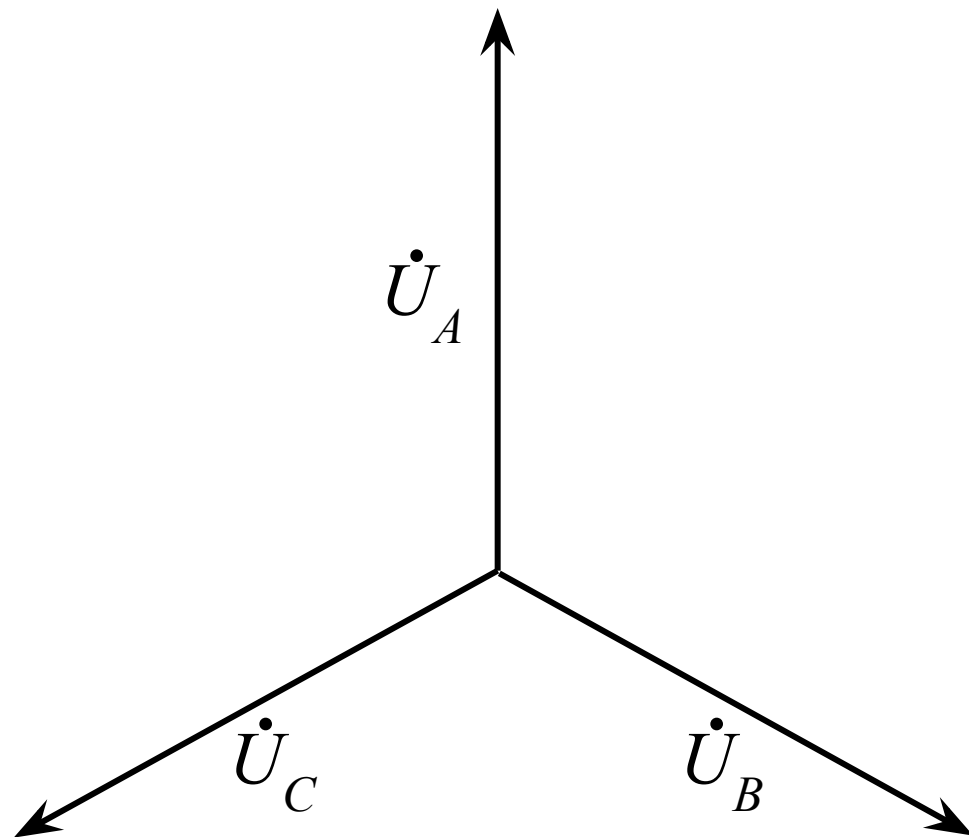
## Напряжения трехфазного источника, соединенного способом «звезда» (Продолжение)

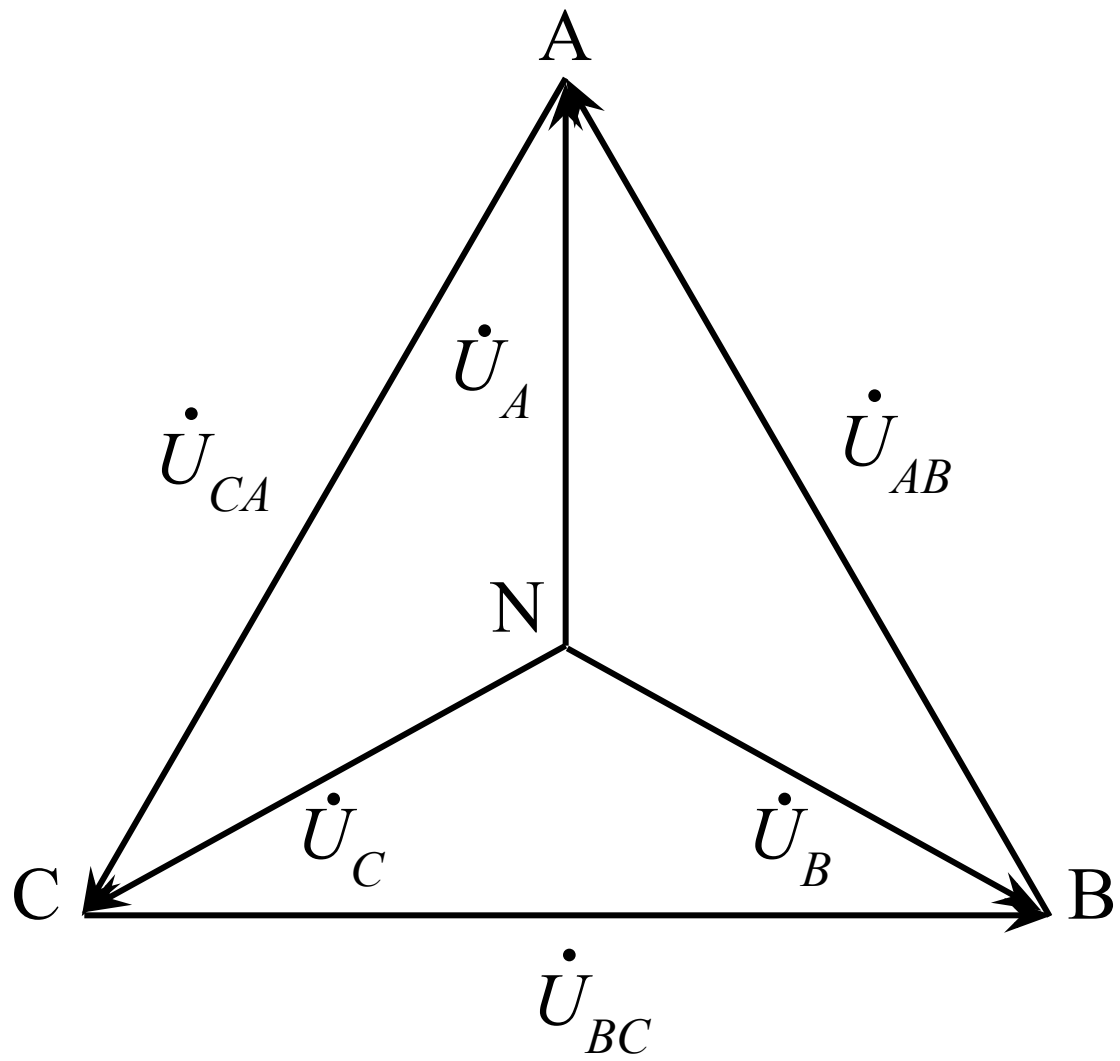
Соотношение по величине между линейным и фазным напряжениями легко определить по диаграмме из треугольника ANB.

$$U_{AB} = 2U_A \cos 30^\circ = \sqrt{3}U_A$$

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







## 5. Классификация приемников в трехфазной цепи.

- Приемники могут быть однофазными, либо трехфазными. К однофазным приемникам относятся электрические лампы накаливания, различные бытовые приборы, однофазные двигатели и т.д. К трехфазным приемникам относятся трехфазные асинхронные двигатели и индукционные печи.
- Приемники делятся на

**симметричные**

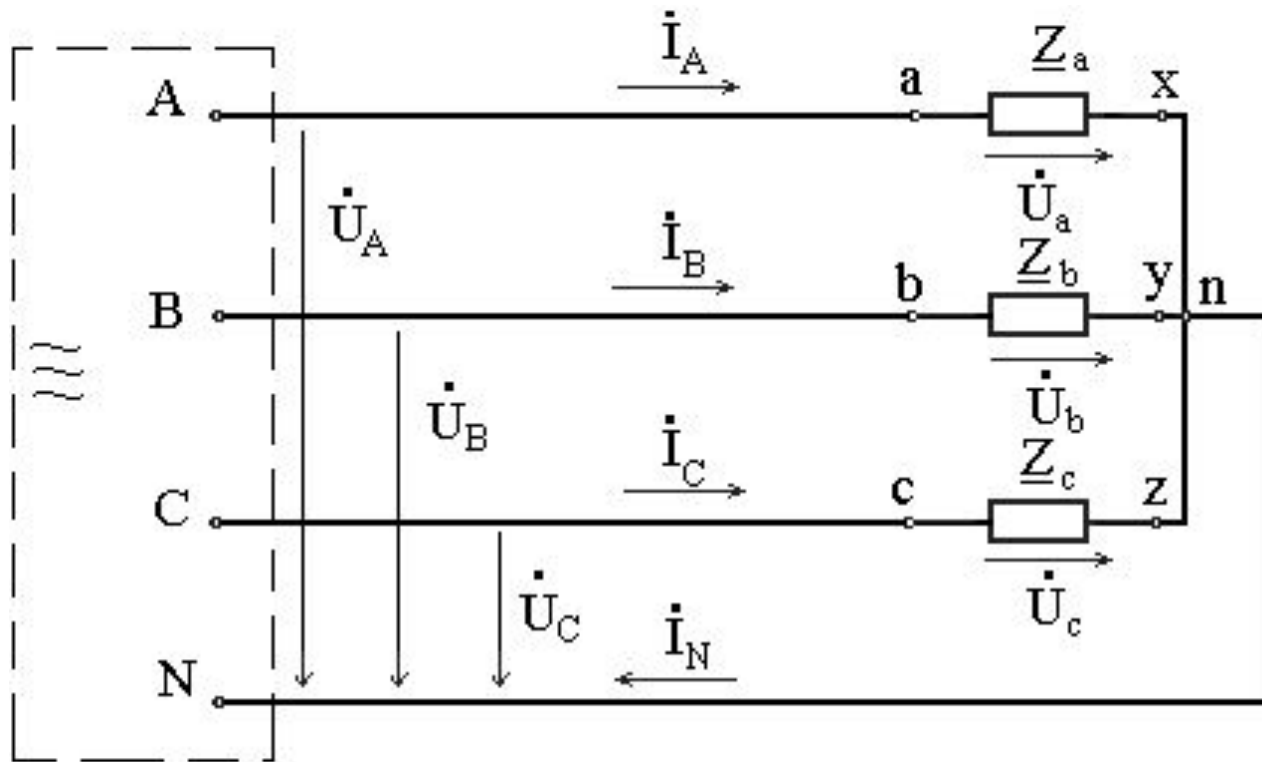
$$\underline{Z}_a = \underline{Z}_b = \underline{Z}_c = Ze^{j\varphi}$$

**несимметричные**

$$\underline{Z}_a \neq \underline{Z}_b \neq \underline{Z}_c \neq Ze^{j\varphi}$$



## 6. Расчет трехфазной цепи при соединении фаз приемника «звездой»





## 6. Расчет трехфазной цепи при соединении фаз приемника «звездой» (продолжение)

- **Фазными токами** ( $I_a, I_b, I_c$ ) называют токи в каждой фазе приемника. Положительное направление принимают от начала к концу фазы в соответствии с фазными напряжениями.
- **Линейные токи** – токи в линейных проводах ( $I_A, I_B, I_C$ ). Положительное направление принимают от источника к приемнику.
- При соединении «звездой» линейные токи равны фазным.
- Возникает ток в нейтральном проводе  $I_N$ , положительное направление которого принимают от приемника к источнику.



## Четырехпроводная цепь с симметричной системой напряжений и несимметричной нагрузкой

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

- Фазные напряжения приемника при включенном нейтральном проводе будут равны фазным напряжениям источника

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

- Ток в фазах приемника можно определить по закону Ома:

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

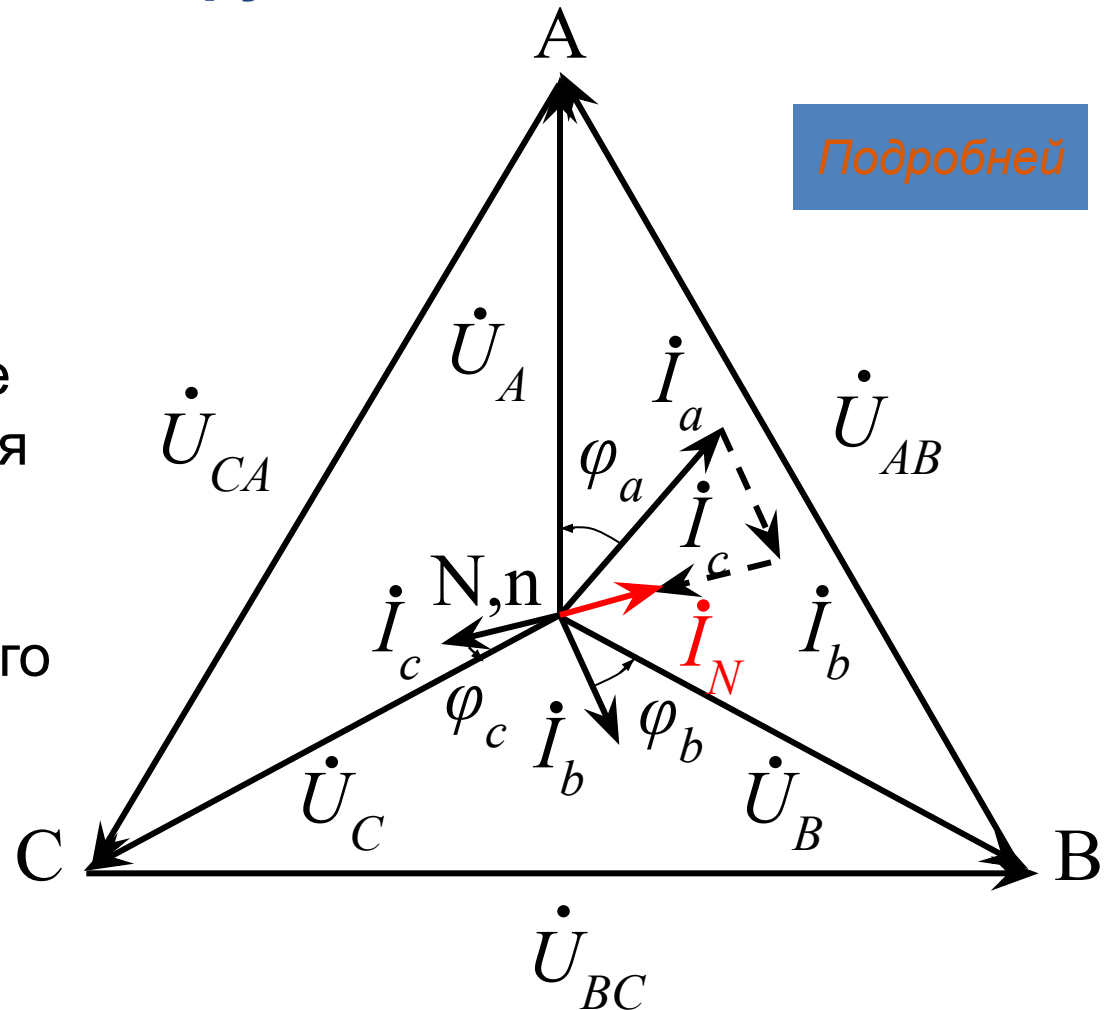
- Ток в нейтральном проводе определяется первым законом Кирхгофа для нейтральной точки  $n$ :

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



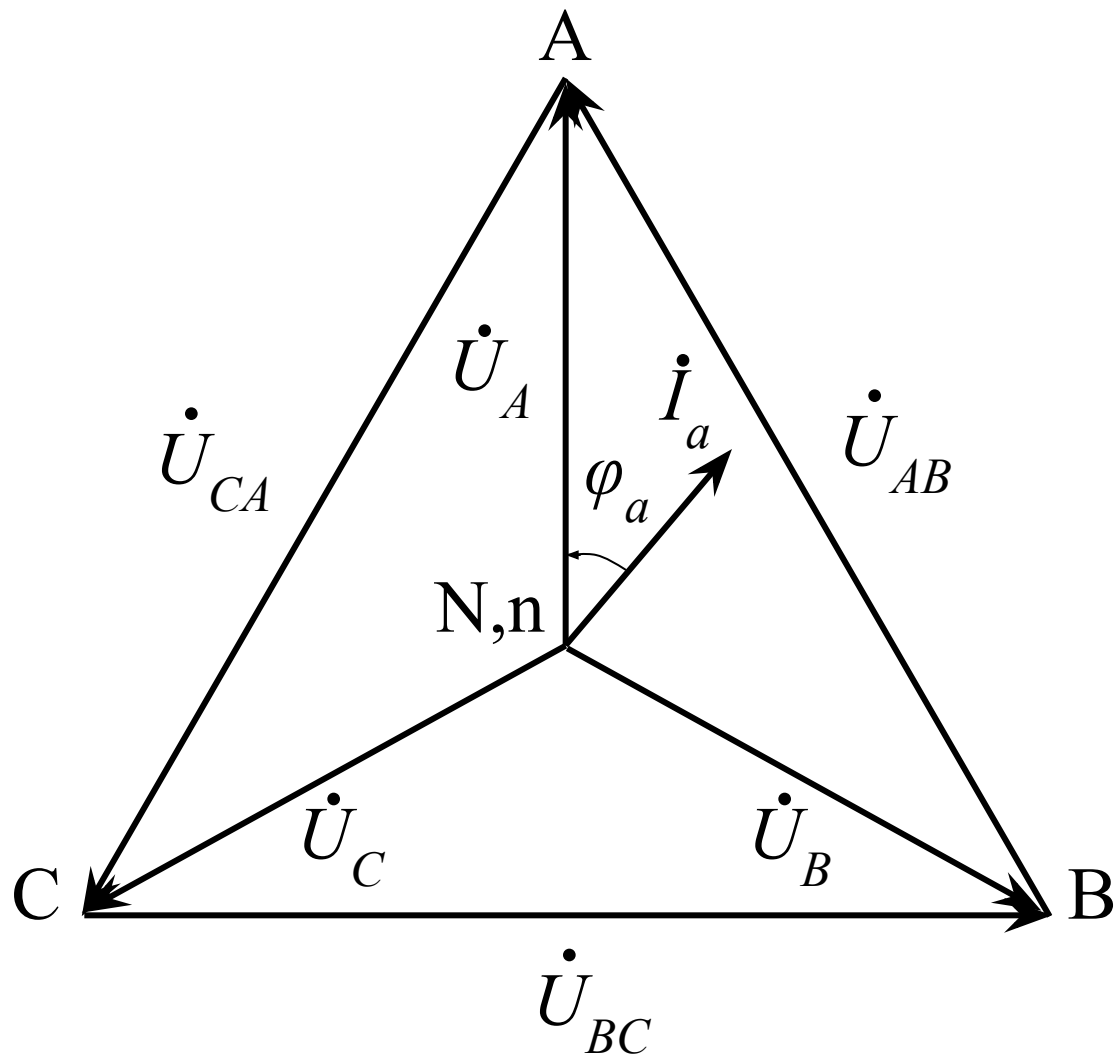
## Четырехпроводная цепь с симметричной системой напряжений и несимметричной нагрузкой (продолжение)

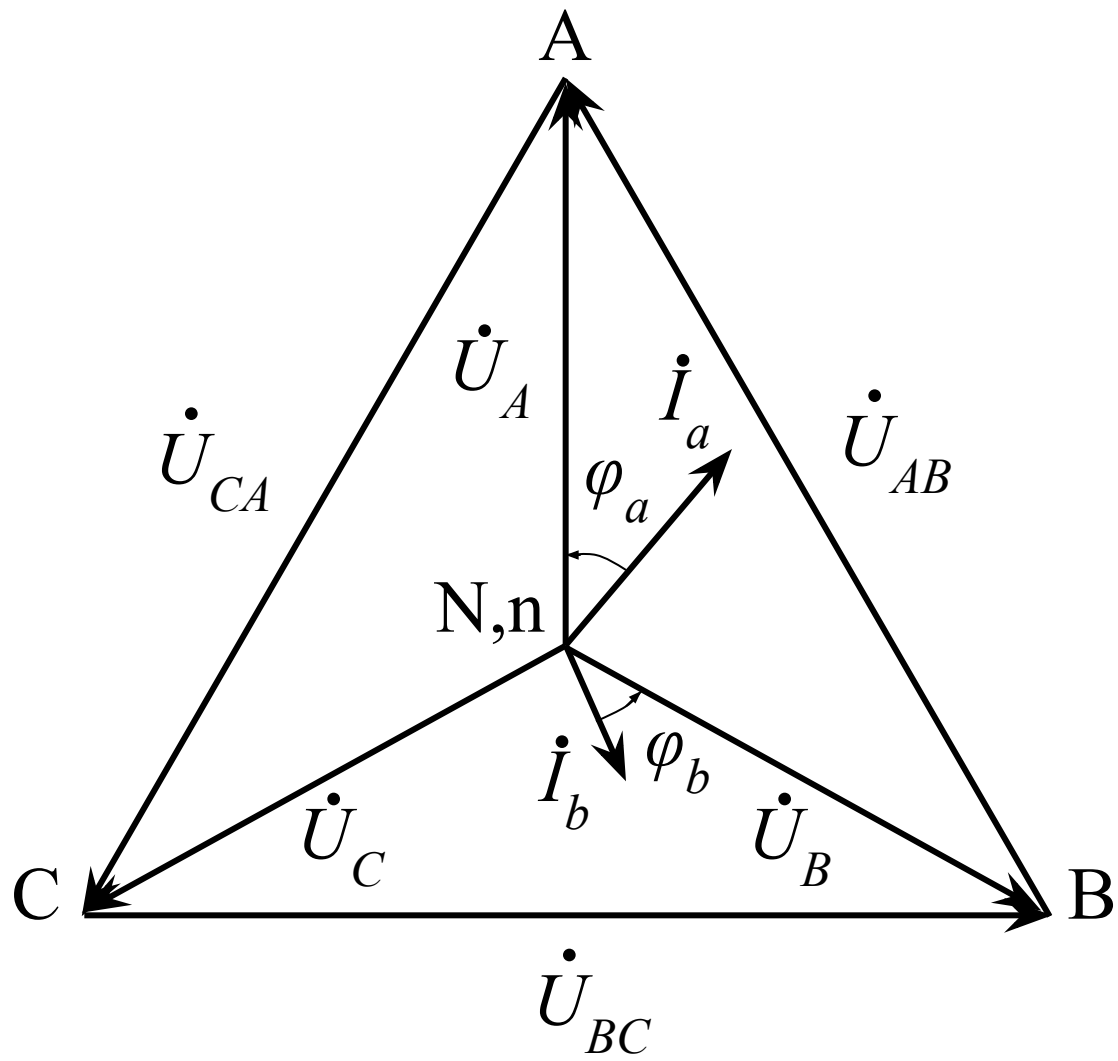
- Векторная диаграмма построена предположении, что приемник в общем случае несимметричный и каждая фаза приемника имеет активно-индуктивный характер. Ток нейтрального провода определяется суммой фазных токов

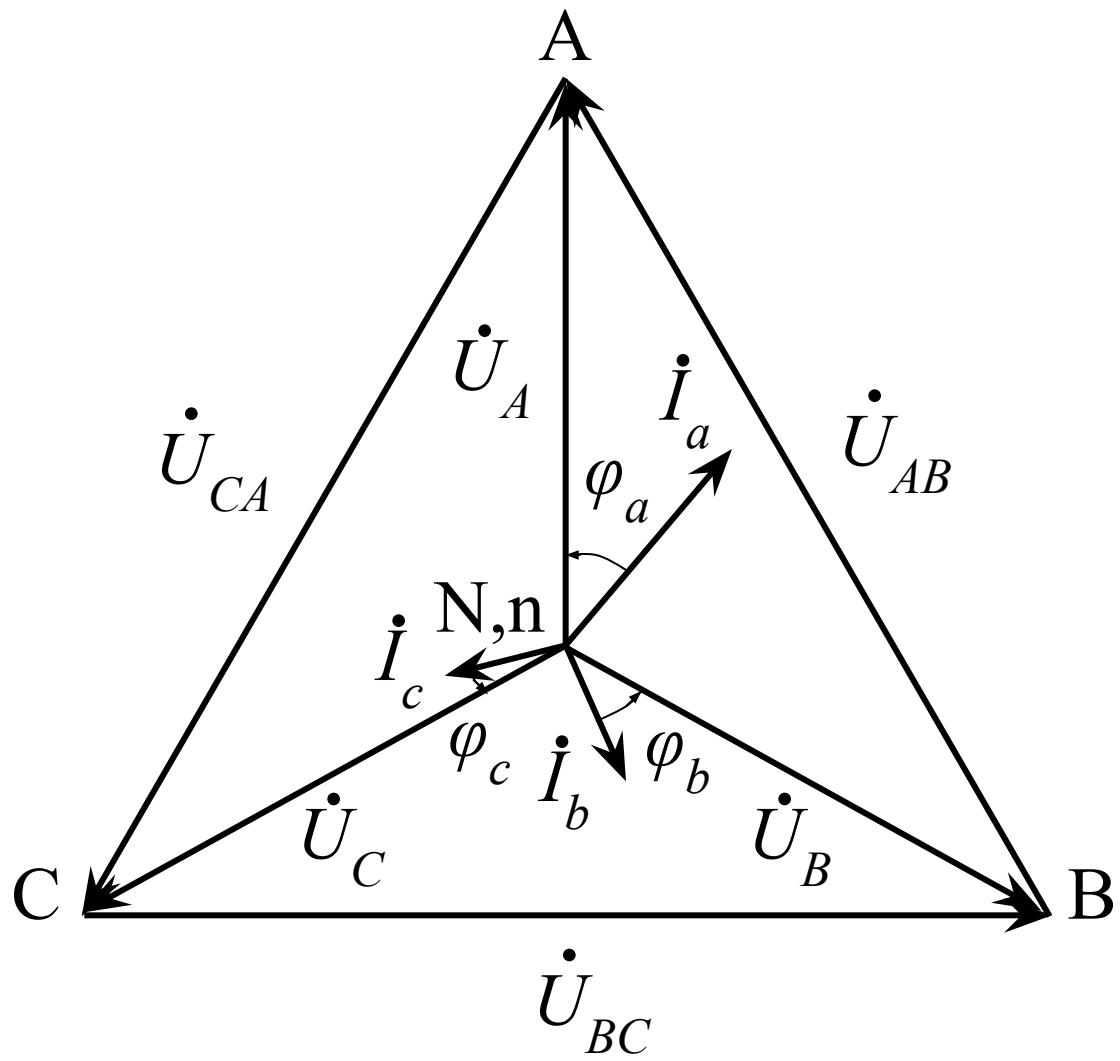


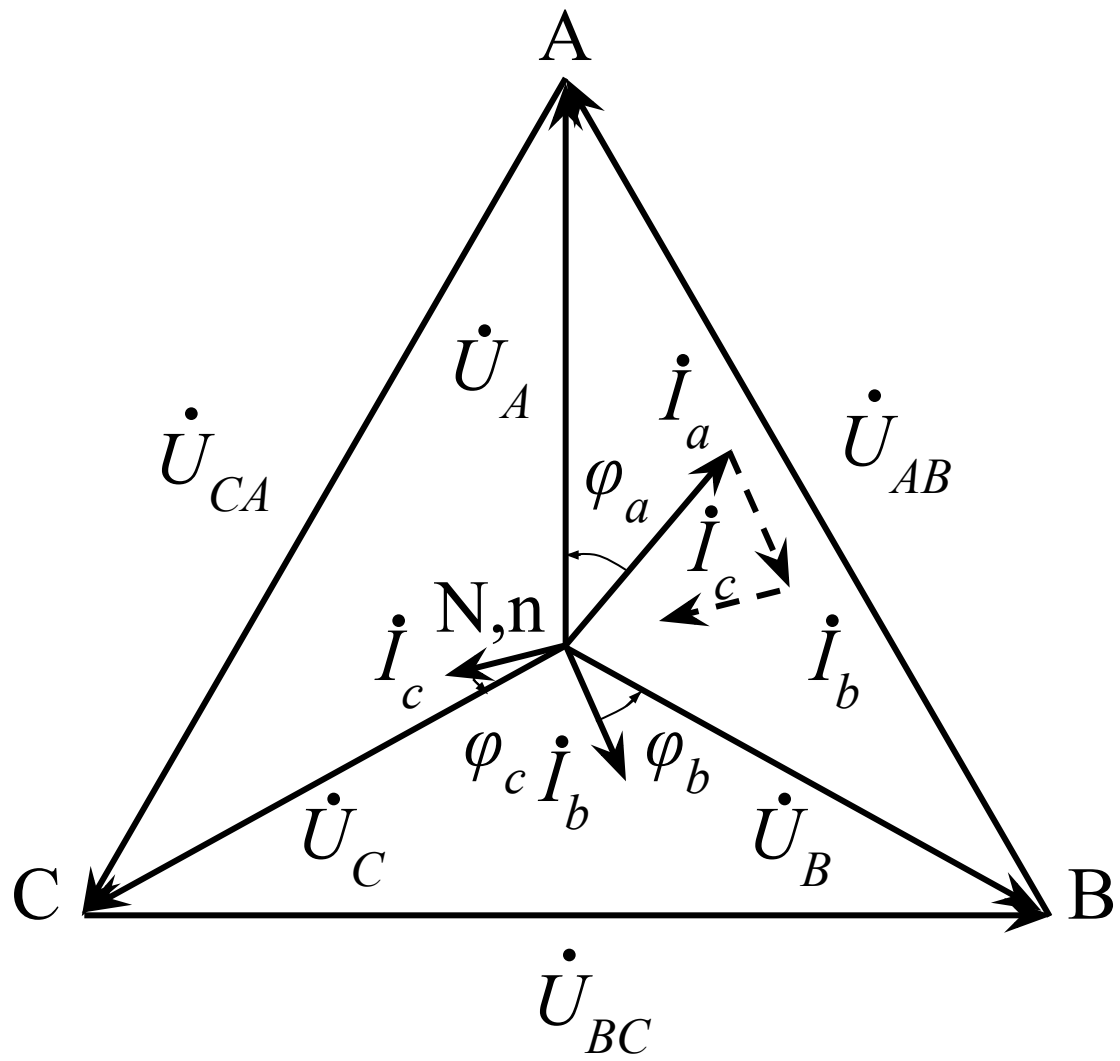
Подробнее

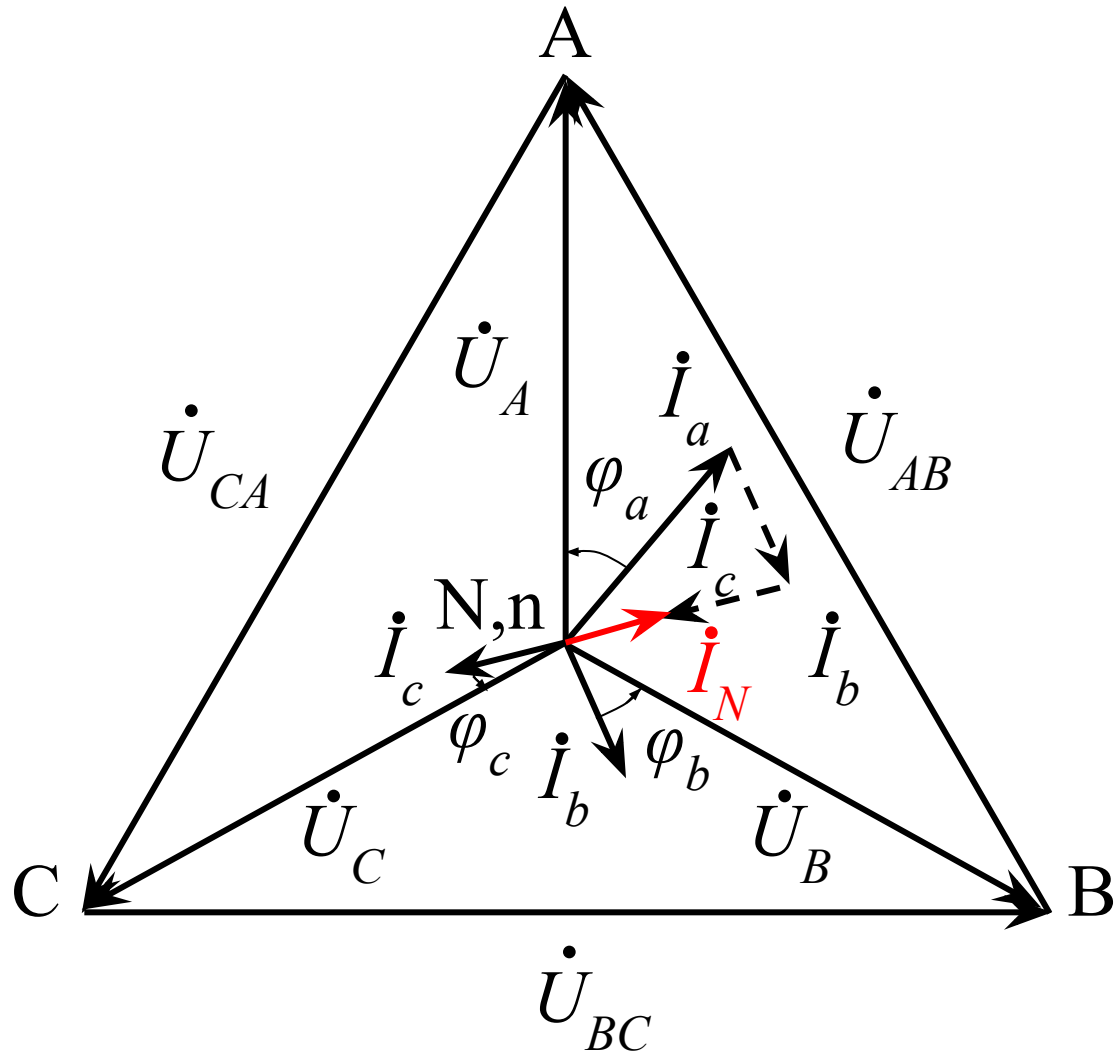












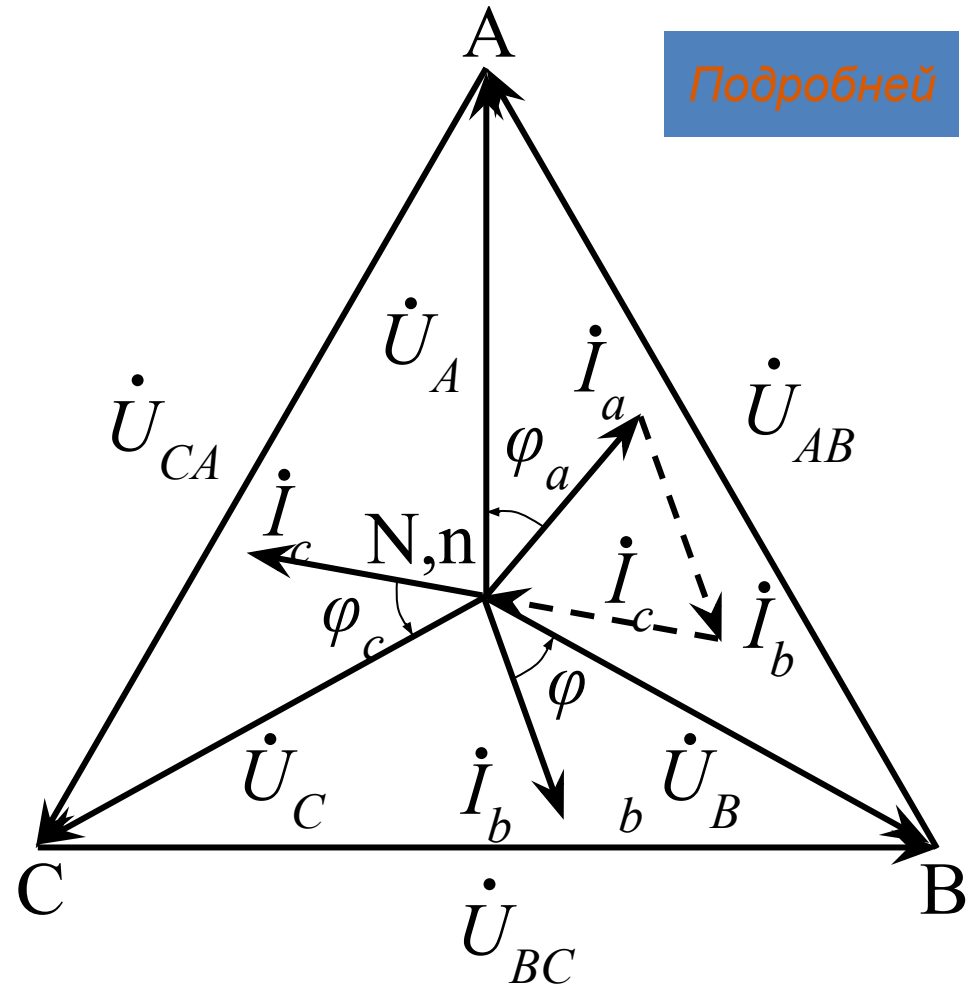


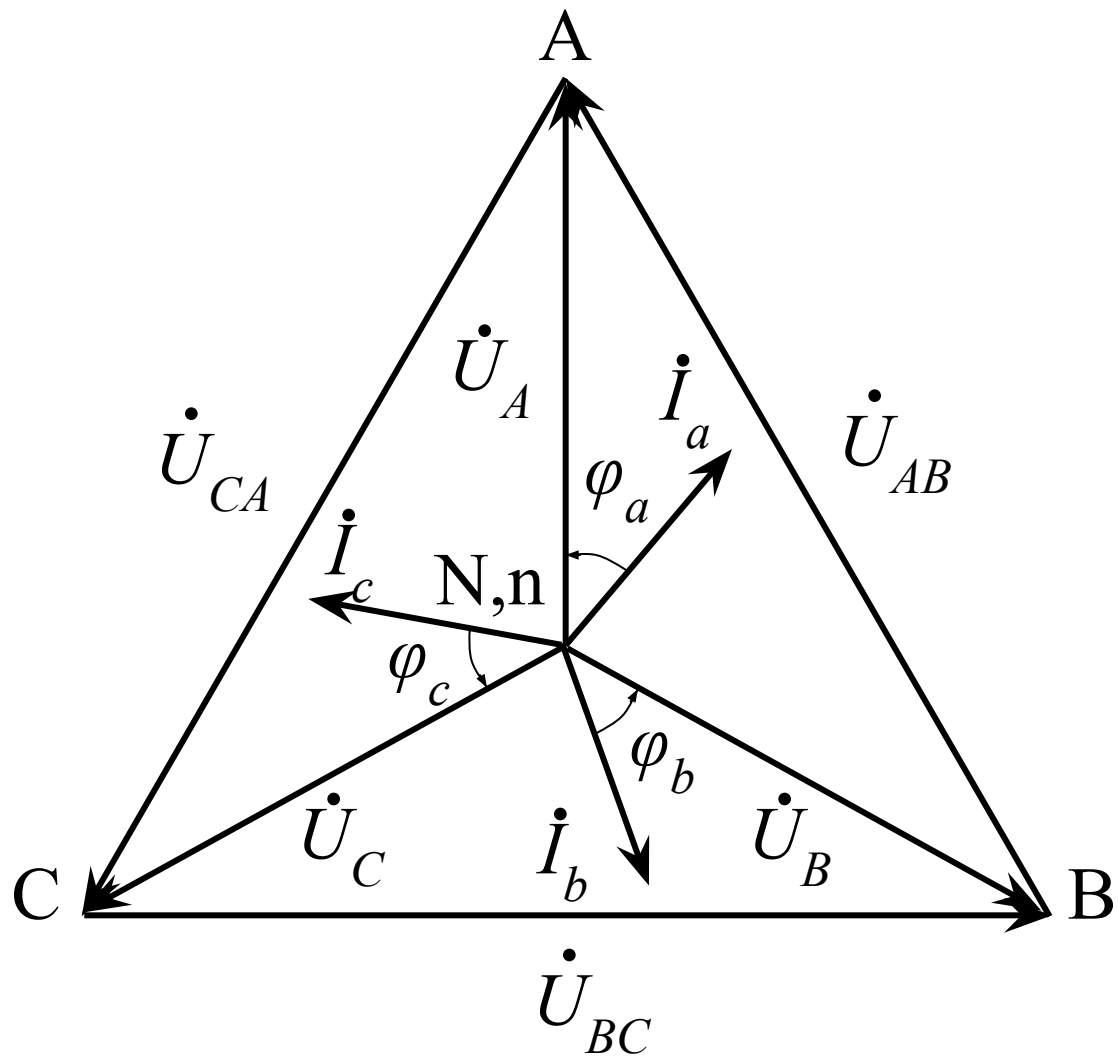
## Особенности симметричного приемника, соединенного "звездой"

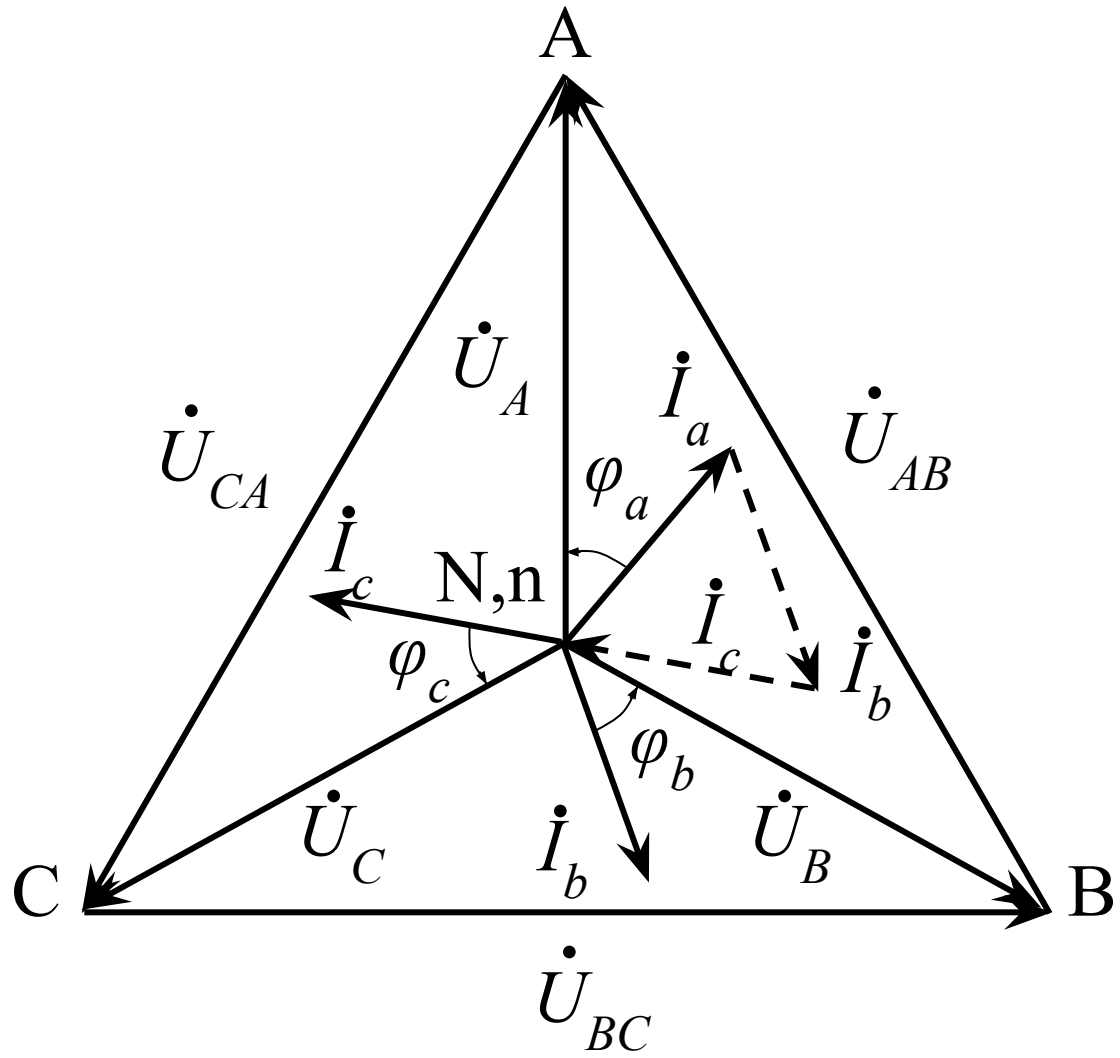
- Построим векторную диаграмму напряжений и токов. Примем сопротивление каждой фазы равным

$Z_a = Z_b = Z_c = Ze^{j\varphi} \equiv R + jX_L$   
(активно-индуктивный приемник,  $\varphi > 0$ ).

- Ток каждой фазы отстает на угол  $\varphi$  от соответствующего фазного напряжения и имеет одинаковую величину.







## Особенности симметричного приемника, соединенного "звездой" (продолжение)

- Ток в нейтральном проводе  $I_N = I_a + I_b + I_c = 0$
- При соединении в звезду фаз симметричного приемника нейтральный провод не оказывает влияния на работу цепи и может быть исключен.
- Т.е. при симметричном приемнике может использоваться трехпроводная трехфазная цепь.
- Трехфазная цепь при соединении приемника "звездой" без нейтрального провода называется трехпроводной (условное обозначение такого соединения – (  $\Upsilon$  Трехфазная цепь с нейтральным проводом называется четырехпроводной цепью (  $\Upsilon$  ).



## Заключение

1. Трехфазная цепь –совокупность трех электрических цепей, в которых действуют синусоидальные ЭДС, одинаковые по амплитуде и частоте, сдвинутые по фазе одна от другой на угол  $120^\circ$  и создаваемые одним источником энергии.
2. Преимущества трехфазной цепи:
  - экономичность производства и передачи электроэнергии;
  - возможность создания вращающегося магнитного поля;
  - возможность получения в одной установке двух эксплуатационных напряжений (фазного и линейного).
3. В связанной трехфазной цепи три фазы соединены способом "звезда" либо "треугольник".

## Заключение

4. Трехфазный источник, соединенный способом "звезда", создает две трехфазные системы напряжения разной величины – фазные напряжения и линейные напряжения.  
Линейные напряжения больше фазных в  $\sqrt{3}$  раз.  
Номинальным напряжением трехфазного источника считается линейное напряжение.
5. При соединении фаз приемника способом "звезда" линейные токи равны фазным и могут быть определены по закону Ома для каждой из фаз.  
Ток нейтрального провода определяется по второму закону Кирхгофа суммой трех фазных токов.
6. При симметричном трехфазном приемнике ток нейтрального провода равен нулю.

# Контрольные вопросы

## Что такое трехфазный источник электроэнергии?

- Генератор электроэнергии, создающий одновременно три синусоидальные ЭДС, равные по величине и отличающиеся по фазе на 120 градусов;
- Генератор электроэнергии, ЭДС которого определяется выражением  $e = E \cdot \sin(\omega t + \pi/3)$ ;
- Генератор электроэнергии, создающий одновременно три напряжения, отличающиеся по величине в три раза.

## Фазное напряжение в трехфазной цепи – это напряжение между ... .

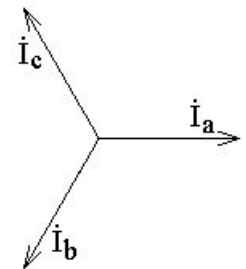
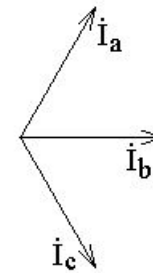
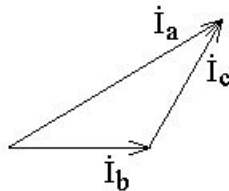
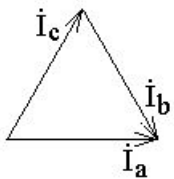
- началом и концом линейного провода;
- линейным и нейтральным проводами;
- началами двух фаз;
- двумя линейными проводами;
- началом и концом одной фазы;
- началами фаз приемника и источника;
- концами двух фаз;
- началом фазы и нейтральной точкой.

## Контрольные вопросы

**Линейное напряжение в трехфазной цепи это напряжение между ....**

- началом фазы и нейтральной точкой;
- началами двух фаз;
- началом и концом линейного провода;
- линейным и нейтральным проводами;
- началом и концом одной фазы;
- двумя линейными проводами;
- началом фазы и нейтральной точкой.

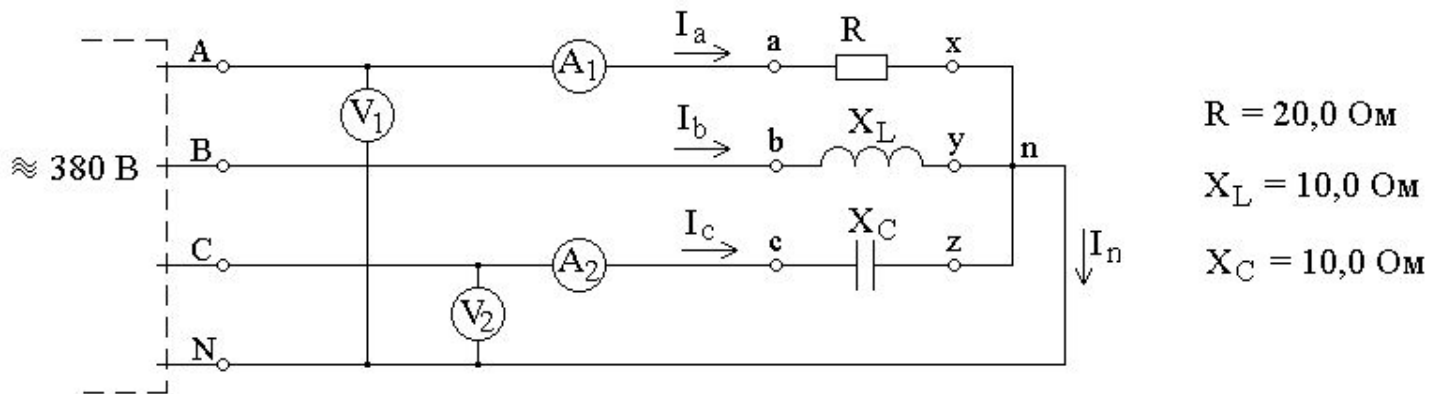
**Указать векторную диаграмму, соответствующую симметричному трехфазному приемнику**





## Контрольные вопросы

**Определить показания приборов в трехфазной цепи:**



| $V_1$ | $V_2$ | $A_1$  | $A_2$  |
|-------|-------|--------|--------|
| 658 В | 658 В | 7,3 А  | 7,3 А  |
| 380 В | 380 В | 11,0 А | 22,0 А |
| 220 В | 220 В | 19,0 А | 38,0 А |

# Контрольные вопросы

**Указать схему, соответствующую способу соединения фаз приемника «звезда».**

