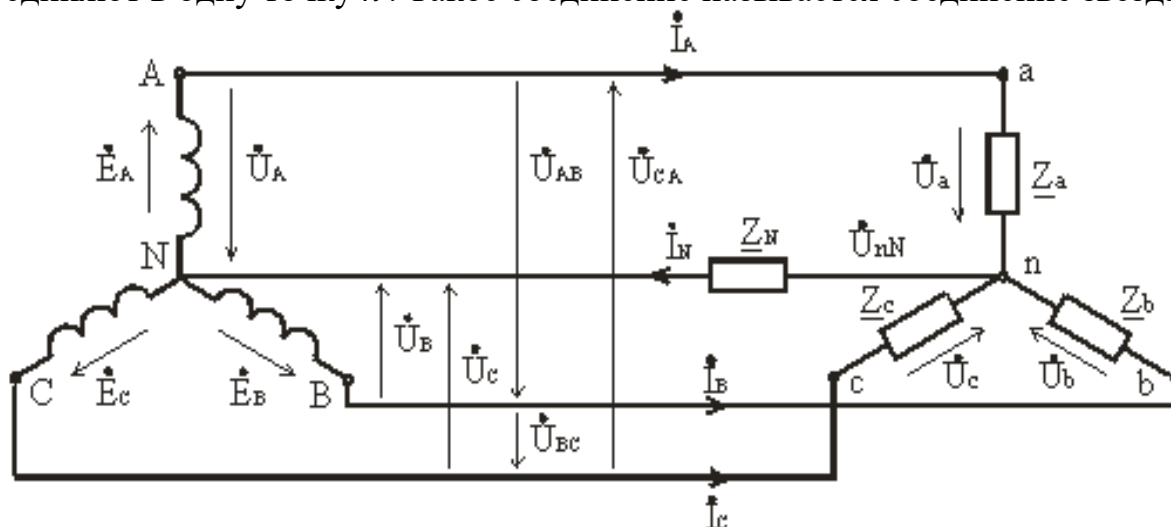


Ответы на контрольные вопросы.

Трехфазная цепь при соединении потребителей звездой

1. Что собой представляет трехфазная электрическая цепь при соединении потребителей звездой. Необходимые составляющие элементы трехфазной ЭЦ?

При соединении фаз обмотки генератора (или трансформатора) звездой их концы X , Y и Z соединяют в одну общую точку N , называемую нейтральной точкой (или нейтралью). Концы фаз приемников (Z_a, Z_b, Z_c) также соединяют в одну точку n . Такое соединение называется соединением звездой.

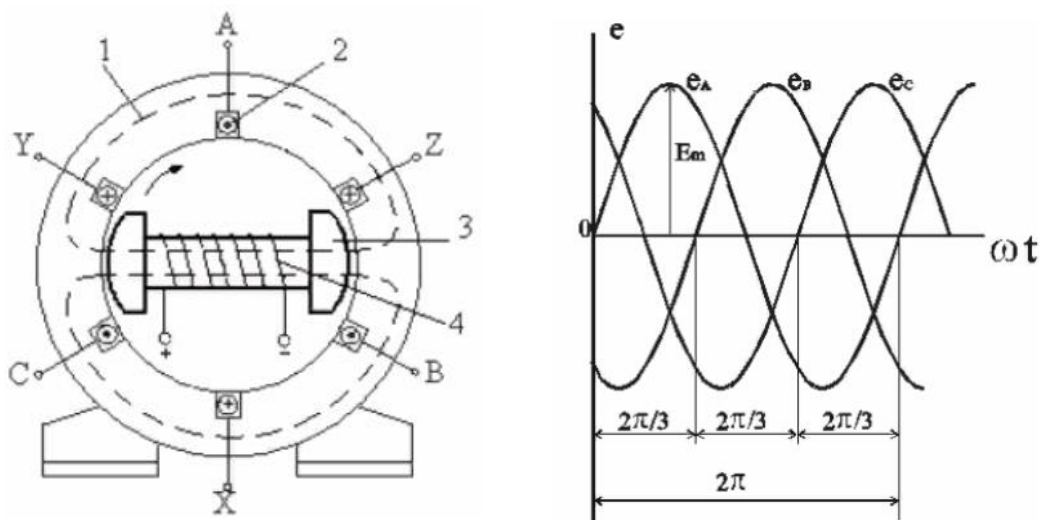


Провода $A-a$, $B-b$ и $C-c$, соединяющие начала фаз генератора и приемника, называются линейными. Провод $N-n$, соединяющий точку N генератора с точкой n приемника, – нейтральным.

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 $2\pi/3 = 120^\circ$ и создаваемые общим источником энергии.

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

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).



Получение трехфазной системы ЭДС основано на принципе электромагнитной индукции, используемом в трехфазном генераторе. Трехфазный генератор представляет собой синхронную электрическую машину. На статоре 1 генератора размещается трехфазная обмотка 2. Каждая фаза трехфазной обмотки статора представляет собой совокупность нескольких катушек с определенным количеством витков, расположенных в пазах статора.

На рис. каждая фаза условно изображена одним витком. Три фазы обмотки статора генератора повернуты в пространстве друг относительно друга на $1/3$ часть окружности, т.е. магнитные оси фаз повернуты в пространстве на угол $2\pi/3 = 120^\circ$. Начала фаз обозначены буквами А, В и С, а концы – Х, Y, Z. Ротор 3 генератора представляет собой постоянный электромагнит, возбуждаемый постоянным током обмотки возбуждения 4. Ротор создает постоянное магнитное поле, силовые линии которого показаны на рис. пунктиром. При работе генератора это магнитное поле вращается вместе с ротором.

Графики мгновенных значений трехфазной симметричной системы ЭДС на временной диаграмме показаны на рис. Они представляют из себя три синусоиды, сдвинутые друг относительно друга на $1/3$ часть периода. Чередование во времени фазных ЭДС зависит от направления вращения ротора генератора относительно трехфазной обмотки статора. При вращении ротора по часовой стрелке, как показано на рис, полученная симметричная трехфазная система ЭДС имеет прямое чередование (А – В – С) (рис.3.3а).

При вращении ротора против часовой стрелки образуется также симметричная трехфазная система ЭДС. Однако чередование фазных ЭДС во времени изменится. Такое чередование называется обратным (А – С – В) (рис.3.3б).

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.

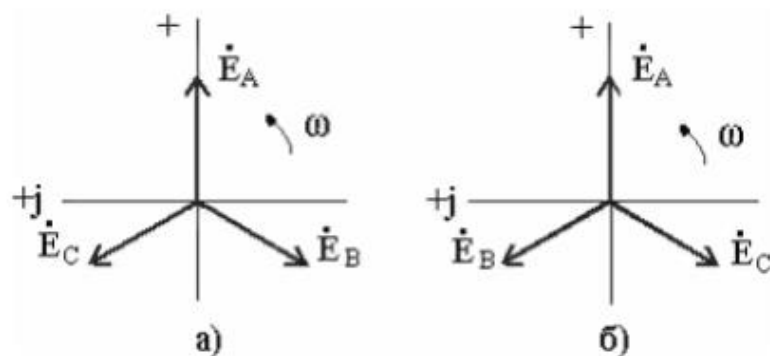


Рис. 3.3. Векторные диаграммы ЭДС трехфазных симметричных систем. (а – прямая последовательность фаз; б – обратная последовательность фаз).

2. Какие напряжения, токи и мощности называются линейными и фазными?

Трехфазный источник, соединенный способом "звезда", создает две трехфазные системы напряжения разной величины. При этом различают фазные напряжения и линейные напряжения.

Фазное напряжение U_{ϕ} – напряжение между началом и концом фазы или между линейным проводом и нейтралью (U_A, U_B, U_C). За условно положительные направления фазных напряжений принимают направления от начала к концу фаз. Линейное напряжение (U_L) – напряжение между линейными проводами или между началами фаз (U_{AB}, U_{BC}, U_{CA}). Условно положительные направления линейных напряжений приняты от точек, соответствующих первому индексу, к точкам, соответствующим второму индексу, то есть, от точек с более высоким потенциалом к точкам с более низким.

Если сопротивлением проводов можно пренебречь, то фазное напряжение в приемнике считают таким же, как и в источнике. ($U_A = U_a, U_B = U_b, U_C = U_c$).

Фазные токи (I_{ϕ}) – это токи в фазах генератора и приемников.

Линейные токи (I_L) – токи в линейных проводах.

При соединении в звезду фазные и линейные токи равны $I_{\phi} = I_L$.

Ток, протекающий в нейтральном проводе, обозначают I_N .

По первому закону Кирхгофа для нейтральной точки n (N) имеем в комплексной форме $\dot{I}_N = \dot{I}_A + \dot{I}_B + \dot{I}_C$.

Значения общей активной P и общей реактивной Q мощностей трехфазной цепи равны соответственно суммам активных и реактивных мощностей для каждой из трех фаз А, В и С:

активная мощность

$$P = P_A + P_B + P_C = U_A \cdot I_A \cdot \cos \varphi_A + U_B \cdot I_B \cdot \cos \varphi_B + U_C \cdot I_C \cdot \cos \varphi_C$$

$$\text{реактивная мощность } Q = Q_A + Q_B + Q_C = U_A \cdot I_A \cdot \sin \varphi_A + U_B \cdot I_B \cdot \sin \varphi_B + U_C \cdot I_C \cdot \sin \varphi_C,$$

где $U_A, U_B, U_C, I_A, I_B, I_C$ – значения фазных напряжений и токов, а φ — угол сдвига фаз.

Если активные и реактивные мощности каждой из фаз равны между собой, т.е. имеет место симметричная нагрузка потребителей, для нахождения

общей мощности многофазной цепи достаточно умножить значение фазной мощности на количество задействованных фаз. Полная мощность определяется исходя из полученных значений активной и реактивной ее составляющих: $P=3 \cdot P_{\Phi}=3 \cdot U_{\Phi} \cdot I_{\Phi} \cdot \cos \varphi$, $Q=3 \cdot Q_{\Phi}=3 \cdot U_{\Phi} \cdot I_{\Phi} \cdot \sin \varphi$,

$$S=3 \cdot S_{\Phi}=\sqrt{P^2 + Q^2} = 3 \cdot U_{\Phi} \cdot I_{\Phi}$$

Полную мощность можно выразить через линейные значения можно как:

$$P=3 \cdot P_{\Phi}=3 \cdot U_{\Phi} \cdot I_{\Phi} \cdot \cos \varphi=3 \cdot \frac{U_L}{\sqrt{3}} \cdot I_L \cdot \cos \varphi = \sqrt{3} \cdot U_L \cdot I_L \cdot \cos \varphi$$

3. Запишите выражения для мгновенных значений фазных ЭДС трехфазной системы.

Выражения мгновенных значений ЭДС:

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

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

$$e_C = E_m \sin(\omega t - 240^\circ) = E_m \sin(\omega t + 120^\circ).$$

$$e_A + e_B + e_C = 0$$

4. Запишите соотношения между линейными и фазными напряжениями, токами и мощностями для потребителей по схеме звезда в симметричном режиме.

При симметричной системе напряжений и симметричной нагрузке, когда $\underline{Z}_a = \underline{Z}_b = \underline{Z}_c$, т.е. когда $R_a = R_b = R_c = R_{\Phi}$ и $X_a = X_b = X_c = X_{\Phi}$, фазные токи равны по значению и углы сдвига фаз одинаковы

$$I_a = I_b = I_c = I_{\Phi} = U_{\Phi} / Z_{\Phi},$$

$$\varphi_a = \varphi_b = \varphi_c = \varphi = \arctg(X_{\Phi}/R_{\Phi}).$$

Соотношения между фазными и линейными напряжениями и токами

$$\text{равны: } U_{\Phi} = \frac{U_L}{\sqrt{3}}, \quad I_{\Phi} = I_L.$$

При симметричной нагрузке активная мощность трёхфазной цепи равна сумме активных мощностей фаз: $P=P_A+P_B+P_C$. Активную мощность трёхфазной цепи можно выразить через фазные значения напряжения и тока:

$$P=3 \cdot P_{\Phi}=3 \cdot U_{\Phi} \cdot I_{\Phi} \cdot \cos \varphi \text{ (Вт)},$$

реактивная мощность трёхфазной цепи:

$$Q=3 \cdot Q_{\Phi}=3 \cdot U_{\Phi} \cdot I_{\Phi} \cdot \sin \varphi = \sqrt{3} \cdot U_L \cdot I_L \cdot \sin \varphi \text{ (Вар)},$$

полная мощность трёхфазной цепи:

$$S=3 \cdot S_{\Phi}=\sqrt{P^2 + Q^2} = 3 \cdot U_{\Phi} \cdot I_{\Phi} = \sqrt{3} \cdot U_L \cdot I_L \text{ (ВА)}$$

5. В каких случаях возникает напряжение смещения нейтрали?

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 . При появлении тока в нейтральном проводе это сопротивление обуславливает дополнительное напряжение \dot{U}_{nN} , которое искажает напряжения фаз приемника.

Напряжение \dot{U}_{nN} между нейтралью приемника и источника согласно методу

узлового напряжения

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

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;

Поскольку напряжения фаз источника равны их ЭДС, то выражение для \dot{U}_{nN} примет вид

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

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

Из выполненной лабораторной работы видно, что напряжение смещений нейтрали возникает во всех режимах нагрузки, кроме симметричной, т.е. при несимметричной нагрузке, при обрыве фазы В, при обрыве линии В и при коротком замыкании появляется напряжение смещения нейтрали, т.к. $Z_N = 1$ Ом. При этом при включении нейтрального провода смещение нейтрали незначительно, кроме КЗ, обрыв нейтрального провода увеличивает напряжение смещения нейтрали и оно становится максимальным, т.к. $Z_N = 0$ Ом, $\underline{Y}_N = 0$ См.

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

При этом искажения фазных напряжений приемника также максимальны. При изменении величины напряжение смещений нейтрали U_{nN} может изменяться в широких пределах.

При этом нейтральная точка приемника n на диаграмме может занимать разные положения, а фазные напряжения приемника друг от друга весьма существенно.

Направление смещения нейтрали зависит от последовательности фаз системы и характера нагрузки.

6. Чему равен ток в нейтральном проводе при симметричной и несимметричной нагрузке?

Комплексный ток в нейтральном проводе можно определить расчетным способом, согласно формуле $\underline{I}_N = \underline{I}_A + \underline{I}_B + \underline{I}_C$ и графическим способом по при

построении векторной диаграммы ток в нейтральном проводе будет равен геометрической сумме векторов фазных токов.

Действующее значение этого тока: $I_N = \sqrt{Re(I_N)^2 + Im(I_N)^2}$.

Если в трехфазной ЭЦ по схеме звезда действует симметричная нагрузка, то сумма фазных токов будет равна 0 А. При несимметричной нагрузке ток в нейтральном проводе можно определить математически или графически, при включении нейтрального провода $I_N \neq 0$ А, при обрыве нейтрального провода $I_N = 0$ А.

7. Поясните преимущества трехфазной системы синусоидального тока в сравнении с другими системами переменного тока.

Трехфазные цепи получили широкое распространение в электроэнергетике благодаря своей экономичности и техническому совершенству.

Основными преимуществами трехфазных цепей по сравнению как с однофазными, так и с другими многофазными цепями, являются:

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

8. Поясните назначение нейтрального провода. Почему в этот провод не устанавливают разъединители и предохранители?

Нейтральный провод необходим для того, чтобы:

- выравнять 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.

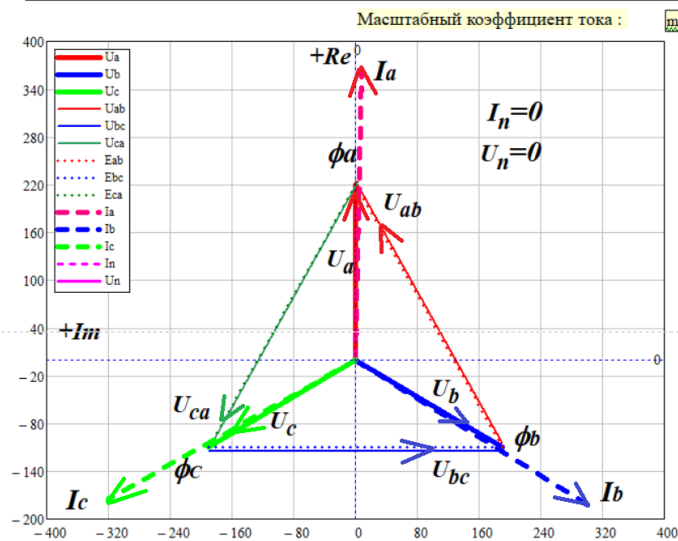
В цепь нейтрального провода нельзя ставить предохранитель, так как перегорание предохранителя приведет к разрыву нейтрального провода и появлению значительных перенапряжений на фазах нагрузки.

9. Анализ изменения напряжений и токов потребителя в трехфазной симметричной и несимметричной звезде при обрыве нейтрального провода. Проблемы потребителей в каждой фазе и способ их устранения?

Векторная диаграмма напряжений и токов при симметричной нагрузке с нейтральным проводом.

Векторная диаграмма трехфазных напряжений и токов

Векторную диаграмму трехфазных напряжений и токов принято строить в системе координат (Re, Im) с условным поворотом на +90 град. При этом ось +Re направлена вертикально вверх.



$$U_f = \begin{pmatrix} 220 \\ -110 - 190.526i \\ -110 + 190.526i \end{pmatrix} \cdot V \quad \vec{U}_f = \begin{pmatrix} 220 \\ 220 \\ 220 \end{pmatrix} \cdot V$$

$$U_N = (-2.071 \times 10^{-14} - 2.888i \times 10^{-14}) \cdot V \quad |U_N| = 3.554 \times 10^{-14} \cdot V$$

$$I_N = 0 \text{ A} \quad |I_N| = 0 \text{ A}$$

$$I = \begin{pmatrix} 18.325 - 0.391i \\ -9.501 - 15.674i \\ -8.824 + 16.065i \end{pmatrix} \text{ A} \quad \vec{I} = \begin{pmatrix} 18.329 \\ 18.329 \\ 18.329 \end{pmatrix} \cdot A$$

$$I_{mi} = \begin{pmatrix} 366.499 - 7.819i \\ -190.022 - 313.488i \\ -176.478 + 321.308i \end{pmatrix} \text{ A} \quad \vec{I}_{mi} = \begin{pmatrix} 366.583 \\ 366.583 \\ 366.583 \end{pmatrix} \cdot A$$

$$U_L = \begin{pmatrix} 330 + 190.526i \\ -381.051i \\ -330 + 190.526i \end{pmatrix} \cdot V \quad \vec{U}_L = \begin{pmatrix} 381.051 \\ 381.051 \\ 381.051 \end{pmatrix} \cdot V$$

$$E_L = \begin{pmatrix} 330 + 190.526i \\ -381.051i \\ -330 + 190.526i \end{pmatrix} \cdot V \quad \vec{E}_L = \begin{pmatrix} 381.051 \\ 381.051 \\ 381.051 \end{pmatrix} \cdot V$$

- при симметричной нагрузке нейтральный провод не оказывает никакого влияния на трехфазную цепь, так как система находится в равновесии; поэтому ток и напряжение нейтрального провода равны 0;
- сопротивления фаз равны, трехфазная система симметрична, токи фаз равны, фазные напряжения равны, линейные напряжения равны, фазные углы соответственно тоже равны;
- потенциал нейтральной точки потребителя электроэнергии равен потенциалу нейтральной точки генератора электроэнергии;
- геометрическая сумма фазных токов равна 0 А;
- выполняются равенства $U_L = \sqrt{3} \cdot U_\Phi$, $I_L = \sqrt{3} \cdot I_\Phi$ (характерные для соединения «Звездой»);
- нагрузка каждой фазы активно – индуктивная, угол ϕ положительный.

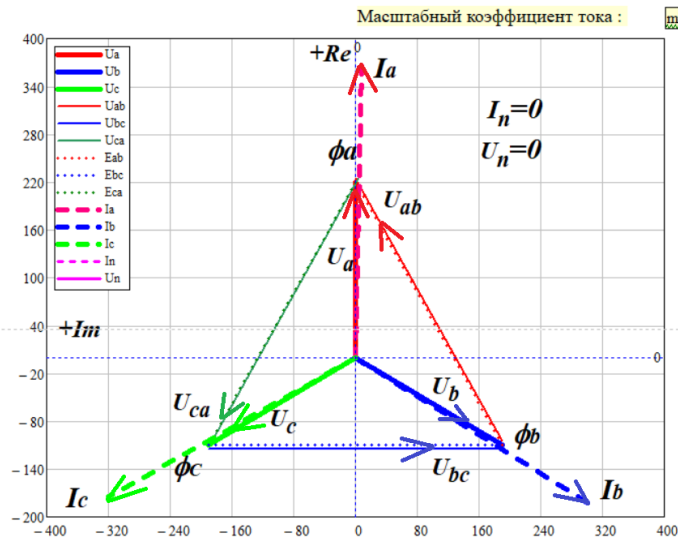
Векторная диаграмма напряжений и токов при симметричной нагрузке без нейтрального провода.

- Отключение нейтрального провода в симметричной системе ничего не изменяет:
- сопротивления фаз равны, трехфазная система симметрична, токи фаз равны, фазные напряжения равны, линейные напряжения равны, фазные углы соответственно тоже равны;
- потенциал нейтральной точки потребителя электроэнергии равен потенциалу нейтральной точки генератора электроэнергии;
- геометрическая сумма фазных токов равна 0 А;
- выполняются равенства $U_L = \sqrt{3} \cdot U_\Phi$, $I_L = \sqrt{3} \cdot I_\Phi$ (характерные для соединения «Звездой»);

- нагрузка каждой фазы активно – индуктивная, угол ϕ положительный.

Векторная диаграмма трехфазных напряжений и токов

Векторную диаграмму трехфазных напряжений и токов принято строить в системе координат (Re, Im) с условным поворотом на +90 град. При этом ось +Re направлена вертикально вверх.



$$U_f = \begin{pmatrix} 220 \\ -110 - 190.526i \\ -110 + 190.526i \end{pmatrix} \cdot V \quad \vec{|U_f|} = \begin{pmatrix} 220 \\ 220 \\ 220 \end{pmatrix} \cdot V$$

$$U_N = (-2.071 \times 10^{-14} - 2.888i \times 10^{-14}) \cdot V \quad |U_N| = 3.554 \times 10^{-14} \cdot V$$

$$I_N = 0 \text{ A} \quad |I_N| = 0 \text{ A}$$

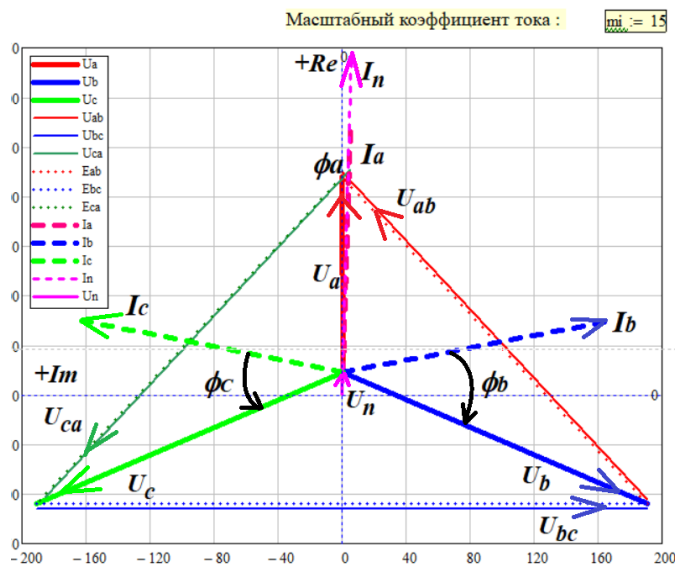
$$I = \begin{pmatrix} 18.325 - 0.391i \\ -9.501 - 15.674i \\ -8.824 + 16.065i \end{pmatrix} \text{ A} \quad \vec{|I|} = \begin{pmatrix} 18.329 \\ 18.329 \\ 18.329 \end{pmatrix} \cdot A$$

$$I_{mi} = \begin{pmatrix} 366.499 - 7.819i \\ -190.022 - 313.488i \\ -176.478 + 321.308i \end{pmatrix} \text{ A} \quad \vec{|I_{mi}|} = \begin{pmatrix} 366.583 \\ 366.583 \\ 366.583 \end{pmatrix} \cdot A$$

$$U_L = \begin{pmatrix} 330 + 190.526i \\ -381.051i \\ -330 + 190.526i \end{pmatrix} \cdot V \quad \vec{|U_L|} = \begin{pmatrix} 381.051 \\ 381.051 \\ 381.051 \end{pmatrix} \cdot V$$

$$E_L = \begin{pmatrix} 330 + 190.526i \\ -381.051i \\ -330 + 190.526i \end{pmatrix} \cdot V \quad \vec{|E_L|} = \begin{pmatrix} 381.051 \\ 381.051 \\ 381.051 \end{pmatrix} \cdot V$$

Векторная диаграмма напряжений и токов при несимметричной нагрузке с нейтральным проводом



$$U_f = \begin{pmatrix} 197.053 + 0.411i \\ -132.947 - 190.115i \\ -132.947 + 190.937i \end{pmatrix} \cdot V \quad \vec{|U_f|} = \begin{pmatrix} 197.053 \\ 231.988 \\ 232.662 \end{pmatrix} \cdot V$$

$$U_N = (22.947 - 0.411i) \cdot V \quad |U_N| = 22.951 \cdot V$$

$$I_N = (22.947 - 0.411i) \text{ A} \quad |I_N| = 22.951 \text{ A}$$

$$I = \begin{pmatrix} 16.414 - 0.316i \\ 3.507 - 11.327i \\ 3.593 + 11.208i \end{pmatrix} \text{ A} \quad \vec{|I|} = \begin{pmatrix} 16.417 \\ 11.858 \\ 11.77 \end{pmatrix} \cdot A$$

$$I_{mi} = \begin{pmatrix} 246.215 - 4.739i \\ 52.602 - 169.909i \\ 53.892 + 168.126i \end{pmatrix} \text{ A} \quad \vec{|I_{mi}|} = \begin{pmatrix} 246.261 \\ 177.866 \\ 176.552 \end{pmatrix} \cdot A$$

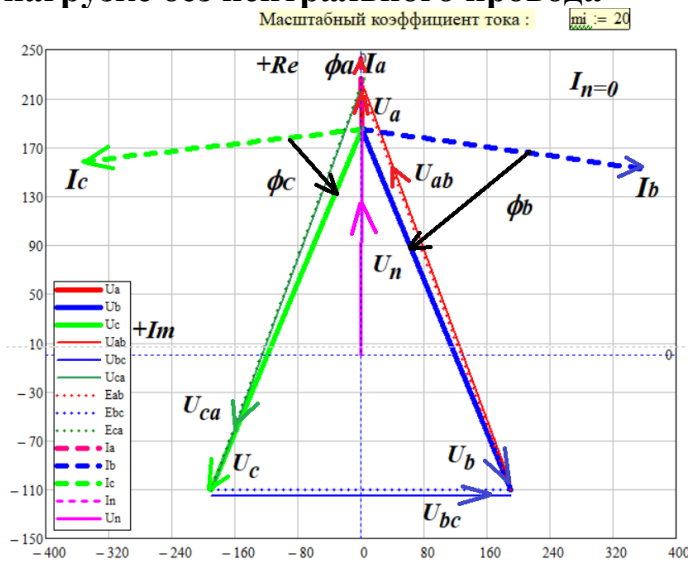
$$U_L = \begin{pmatrix} 330 + 190.526i \\ -381.051i \\ -330 + 190.526i \end{pmatrix} \cdot V \quad \vec{|U_L|} = \begin{pmatrix} 381.051 \\ 381.051 \\ 381.051 \end{pmatrix} \cdot V$$

$$E_L = \begin{pmatrix} 330 + 190.526i \\ -381.051i \\ -330 + 190.526i \end{pmatrix} \cdot V \quad \vec{|E_L|} = \begin{pmatrix} 381.051 \\ 381.051 \\ 381.051 \end{pmatrix} \cdot V$$

- Несимметричная нагрузка обусловлена неравными сопротивлениями фаз;
- поскольку нейтральный провод включен, то геометрическая сумма фазных токов равна току в нейтральном проводе.
- фазные напряжения становятся различными, но имеют небольшую разницу в значениях, поскольку нейтральный провод снижает неравномерность нагрузки на трехфазную цепь.

- потенциал нейтральной точки потребителя не равен потенциалу нейтральной точки генератора, он смещается, образуя напряжение смещения нейтрали. Его значение маленькое.
- линейные напряжения остаются без изменений, сохраняются их значения и симметричность на векторной диаграмме.
- Для фазы А и фазы С характерна активно-индуктивная нагрузка, для фазы В– активно – емкостная нагрузка.

Векторная диаграмма напряжений и токов при несимметричной нагрузке без нейтрального провода



$$U_f = \begin{pmatrix} 35.273 + 1.613i \\ -294.727 - 188.913i \\ -294.727 + 192.138i \end{pmatrix} \cdot V \quad \vec{|U_f|} = \begin{pmatrix} 35.31 \\ 350.074 \\ 351.825 \end{pmatrix} \cdot V$$

$$U_N = (184.727 - 1.613i) \cdot V \quad |U_N| = 184.734 \cdot V$$

$$I_N = 0 \text{ A} \quad |I_N| = 0 \text{ A}$$

$$I = \begin{pmatrix} 2.941 + 0.072i \\ -1.614 - 17.821i \\ -1.327 + 17.749i \end{pmatrix} \text{ A} \quad \vec{|I|} = \begin{pmatrix} 2.942 \\ 17.893 \\ 17.798 \end{pmatrix} \text{ A}$$

$$I_{mi} = \begin{pmatrix} 58.819 + 1.433i \\ -32.274 - 356.412i \\ -26.546 + 354.978i \end{pmatrix} \text{ A} \quad \vec{|I_{mi}|} = \begin{pmatrix} 58.837 \\ 357.87 \\ 355.97 \end{pmatrix} \text{ A}$$

$$U_L = \begin{pmatrix} 330 + 190.526i \\ -381.051i \\ -330 + 190.526i \end{pmatrix} \cdot V \quad \vec{|U_L|} = \begin{pmatrix} 381.051 \\ 381.051 \\ 381.051 \end{pmatrix} \cdot V$$

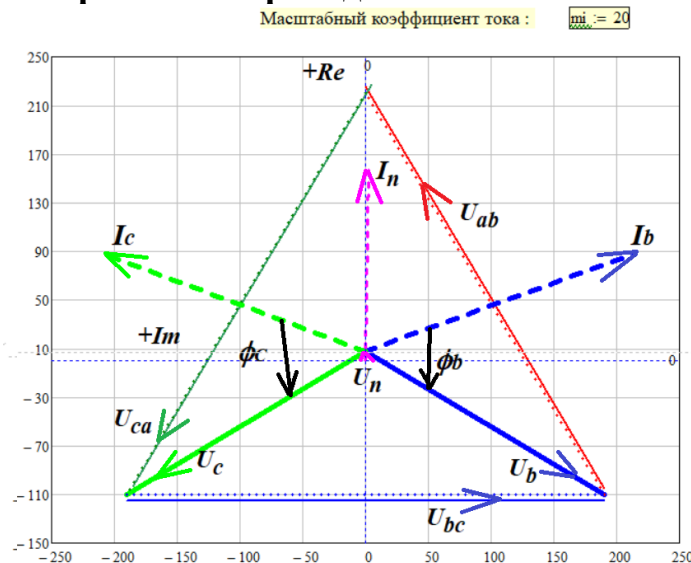
$$E_L = \begin{pmatrix} 330 + 190.526i \\ -381.051i \\ -330 + 190.526i \end{pmatrix} \cdot V \quad \vec{|E_L|} = \begin{pmatrix} 381.051 \\ 381.051 \\ 381.051 \end{pmatrix} \cdot V$$

- Обрыв нейтрального провода увеличивает асимметричность векторного треугольника, увеличивается разница между значениями фазных напряжений и фазных токов.
- Увеличивается напряжение смещения нейтрали, при этом возрастает разница значений между фазными напряжениями, увеличивается напряжение смещения нейтрали, повышается асимметричность векторного треугольника. Ток в нейтральном проводе отсутствует, т.к. нейтральный провод отключен, сумма фазных токов равна 0.
- Линейные напряжения сохраняются без изменений.
- Для фазы А и фазы С характерна активно-индуктивная нагрузка, для фазы В– активно – емкостная нагрузка.

10. Анализ аварийного состояния «обрыв фазы» с использованием векторных диаграмм при наличии и обрыве нейтрального

провода. Проблемы потребителей в каждой фазе и способ их устранения?

Векторная диаграмма напряжений и токов при обрыве фазы А с нейтральным проводом

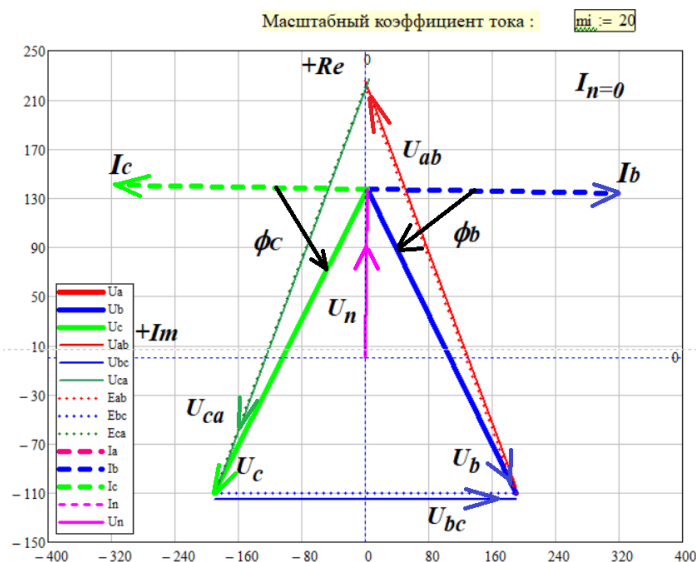


$$U_f = \begin{pmatrix} 0 \\ -117.995 - 190.392i \\ -117.995 + 190.659i \end{pmatrix} \cdot V \quad \overrightarrow{|U_f|} = \begin{pmatrix} 0 \\ 223.991 \\ 224.218 \end{pmatrix} \cdot V$$
$$U_N = (7.995 - 0.133i) \cdot V \quad |U_N| = 7.996 \cdot V$$
$$I_N = (7.995 - 0.133i) \cdot A \quad |I_N| = 7.996 \cdot A$$
$$I = \begin{pmatrix} 0 \\ 3.987 - 10.732i \\ 4.041 + 10.599i \end{pmatrix} \cdot A \quad \overrightarrow{|I|} = \begin{pmatrix} 0 \\ 11.449 \\ 11.343 \end{pmatrix} \cdot A$$
$$I_{mi} = \begin{pmatrix} 0 \\ 79.736 - 214.648i \\ 80.817 + 211.975i \end{pmatrix} \cdot A \quad \overrightarrow{|I_{mi}|} = \begin{pmatrix} 0 \\ 228.979 \\ 226.859 \end{pmatrix} \cdot A$$
$$U_L = \begin{pmatrix} 330 + 190.526i \\ -381.051i \\ -330 + 190.526i \end{pmatrix} \cdot V \quad \overrightarrow{|U_L|} = \begin{pmatrix} 381.051 \\ 381.051 \\ 381.051 \end{pmatrix} \cdot V$$
$$E_L = \begin{pmatrix} 330 + 190.526i \\ -381.051i \\ -330 + 190.526i \end{pmatrix} \cdot V \quad \overrightarrow{|E_L|} = \begin{pmatrix} 381.051 \\ 381.051 \\ 381.051 \end{pmatrix} \cdot V$$

- Обрыв фазы А возникает в результате отключения нагрузки этой фазы, Система из трехфазной переходит в двухфазную, ток нейтрального провода равняется сумме фазных токов фаз А и С.
- Напряжение смещения нейтрали невелико, потенциал потребителя не равен потенциалу генератора, между ними возникает напряжение смещения нейтрали на векторной диаграмме.
- Линейные напряжения остаются без изменений, сохраняются значения и симметричность.
- Для фазы С характерна активно-индуктивная нагрузка, для фазы В – активно – емкостная нагрузка.

Векторная диаграмма напряжений и токов при обрыве фазы А без нейтрального провода

- Обрыв фазы А и обрыв нейтрального провода одновременно также переводит трехфазную систему в двухфазную, повышая при этом значения напряжения смещения нейтрали, разность потенциалов точки потребителя и точки генератора. Линейные напряжения сохраняют свои значения и равенство между собой.
- Для фазы С характерна активно-индуктивная нагрузка, для фазы В – активно – емкостная нагрузка.



$$U_f = \begin{pmatrix} 0 \\ -247.337 - 187.887i \\ -247.337 + 193.164i \end{pmatrix} \cdot V \quad \overrightarrow{|U_f|} = \begin{pmatrix} 0 \\ 310.607 \\ 313.828 \end{pmatrix} \cdot V$$

$$U_N = (137.337 - 2.639i) \cdot V \quad |U_N| = 137.362 \cdot V$$

$$I_N = 0 \text{ A} \quad |I_N| = 0 \text{ A}$$

$$I = \begin{pmatrix} 0 \\ -0.169 - 15.875i \\ 0.169 + 15.875i \end{pmatrix} \text{ A} \quad \overrightarrow{|I|} = \begin{pmatrix} 0 \\ 15.876 \\ 15.876 \end{pmatrix} \cdot A$$

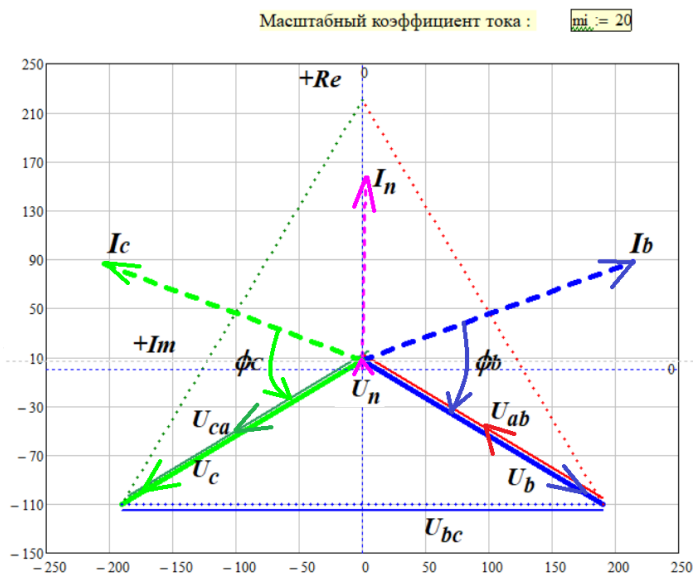
$$I_{mi} = \begin{pmatrix} 0 \\ -3.387 - 317.506i \\ 3.387 + 317.506i \end{pmatrix} \text{ A} \quad \overrightarrow{|I_{mi}|} = \begin{pmatrix} 0 \\ 317.524 \\ 317.524 \end{pmatrix} \cdot A$$

$$U_L = \begin{pmatrix} 330 + 190.526i \\ -381.051i \\ -330 + 190.526i \end{pmatrix} \cdot V \quad \overrightarrow{|U_L|} = \begin{pmatrix} 381.051 \\ 381.051 \\ 381.051 \end{pmatrix} \cdot V$$

$$E_L = \begin{pmatrix} 330 + 190.526i \\ -381.051i \\ -330 + 190.526i \end{pmatrix} \cdot V \quad \overrightarrow{|E_L|} = \begin{pmatrix} 381.051 \\ 381.051 \\ 381.051 \end{pmatrix} \cdot V$$

11. Анализ аварийного состояния «обрыв линии» с использованием векторных диаграмм при наличии и обрыве нейтрального провода. Проблемы потребителей в каждой фазе и способ их устранения?

Векторная диаграмма напряжений и токов при обрыве линии А с нейтральным проводом



$$U_f = \begin{pmatrix} 0 \\ -117.995 - 190.392i \\ -117.995 + 190.659i \end{pmatrix} \cdot V \quad \overrightarrow{|U_f|} = \begin{pmatrix} 0 \\ 223.991 \\ 224.218 \end{pmatrix} \cdot V$$

$$U_N = (7.995 - 0.133i) \cdot V \quad |U_N| = 7.996 \cdot V$$

$$I_N = (7.995 - 0.133i) \text{ A} \quad |I_N| = 7.996 \text{ A}$$

$$I = \begin{pmatrix} 0 \\ 3.987 - 10.732i \\ 4.041 + 10.599i \end{pmatrix} \text{ A} \quad \overrightarrow{|I|} = \begin{pmatrix} 0 \\ 11.449 \\ 11.343 \end{pmatrix} \cdot A$$

$$I_{mi} = \begin{pmatrix} 0 \\ 79.736 - 214.648i \\ 80.817 + 211.975i \end{pmatrix} \text{ A} \quad \overrightarrow{|I_{mi}|} = \begin{pmatrix} 0 \\ 228.979 \\ 226.859 \end{pmatrix} \cdot A$$

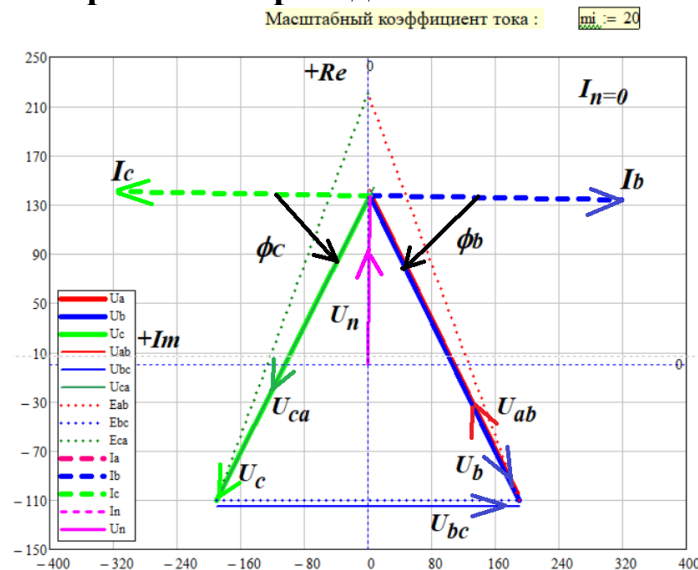
$$U_L = \begin{pmatrix} 117.995 + 190.392i \\ -381.051i \\ -117.995 + 190.659i \end{pmatrix} \cdot V \quad \overrightarrow{|U_L|} = \begin{pmatrix} 223.991 \\ 381.051 \\ 224.218 \end{pmatrix} \cdot V$$

$$E_L = \begin{pmatrix} 117.995 + 190.392i \\ -381.051i \\ -117.995 + 190.659i \end{pmatrix} \cdot V \quad \overrightarrow{|E_L|} = \begin{pmatrix} 223.991 \\ 381.051 \\ 224.218 \end{pmatrix} \cdot V$$

- Обрыв линии А влияет на линейные напряжения, связанные с этой фазой, U_{AB} и U_{CA} , они становятся равны значениям фазных напряжений $U_{AB} = U_B$ – векторы не совпадают по направлению; $U_{CA} = U_C$ – векторы совпадают по направлению.
- Ток в нейтральном проводе определяется суммой токов фазы В и С.
- Напряжение смещения нейтрали невелико.

- Для фазы С характерна активно-индуктивная нагрузка, для фазы В – активно – емкостная нагрузка.

Векторная диаграмма напряжений и токов при обрыве линии А без нейтрального провода



$$U_f = \begin{pmatrix} 0 \\ -247.337 - 187.887i \\ -247.337 + 193.164i \end{pmatrix} \cdot V \quad \overrightarrow{|U_f|} = \begin{pmatrix} 0 \\ 310.607 \\ 313.828 \end{pmatrix} \cdot V$$

$$U_N = (137.337 - 2.639i) \cdot V \quad |U_N| = 137.362 \cdot V$$

$$I_N = 0 \text{ A} \quad |I_N| = 0 \text{ A}$$

$$I = \begin{pmatrix} 0 \\ -0.169 - 15.875i \\ 0.169 + 15.875i \end{pmatrix} \text{ A} \quad \overrightarrow{|I|} = \begin{pmatrix} 0 \\ 15.876 \\ 15.876 \end{pmatrix} \cdot A$$

$$I_{\text{н.н.}} = \begin{pmatrix} 0 \\ -3.387 - 317.506i \\ 3.387 + 317.506i \end{pmatrix} \text{ A} \quad \overrightarrow{|I_{\text{н.н.}}|} = \begin{pmatrix} 0 \\ 317.524 \\ 317.524 \end{pmatrix} \cdot A$$

$$U_L = \begin{pmatrix} 247.337 + 187.887i \\ -381.051i \\ -247.337 + 193.164i \end{pmatrix} \cdot V \quad \overrightarrow{|U_L|} = \begin{pmatrix} 310.607 \\ 381.051 \\ 313.828 \end{pmatrix} \cdot V$$

$$E_L = \begin{pmatrix} 330 + 190.526i \\ -381.051i \\ -330 + 190.526i \end{pmatrix} \cdot V \quad \overrightarrow{|E_L|} = \begin{pmatrix} 381.051 \\ 381.051 \\ 381.051 \end{pmatrix} \cdot V$$

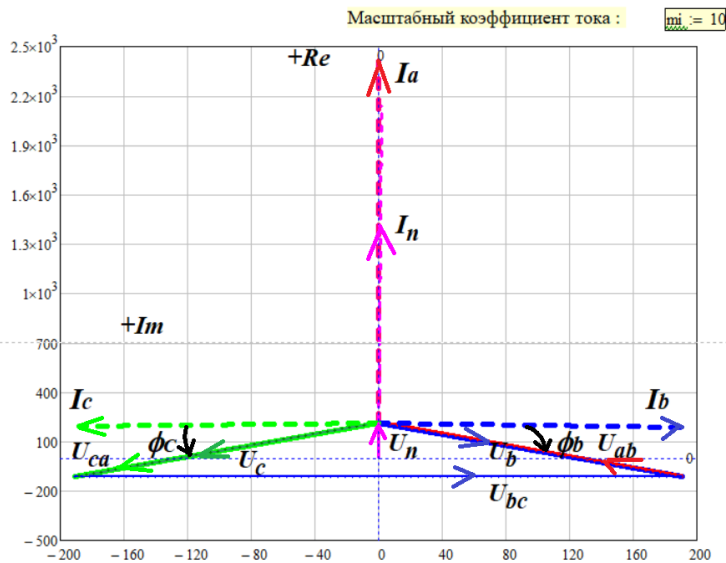
- Обрыв линии А и обрыв нейтрального провода также влияет на линейные напряжения, связанные с этой фазой, U_{AB} и U_{CA} , они становятся равны значениям фазных напряжений $U_{AB} = U_B$ – векторы не совпадают по направлению; $U_{CA} = U_C$ – векторы совпадают по направлению.
- Ток в нейтральном проводе равен 0.
- Разность потенциалов точки потребителя и точки генератора становится большой, напряжение смещения нейтрали также приобретает максимальное значение.
- Для фазы С характерна активно-индуктивная нагрузка, для фазы В – активно – емкостная нагрузка.

12. Анализ аварийного состояния «короткое замыкание фазы» (КЗ) для звезды с использованием векторных диаграмм при наличии и обрыве нейтрального провода. Проблемы потребителей в каждой фазе и способ их устранения? Устранение и профилактика КЗ.

Векторная диаграмма напряжений и токов при коротком замыкании в фазе А с нейтральным проводом

- КЗ с нейтральным проводом приводит в резкому и большому увеличению тока фазы А, трехфазная ЭЦ работает в аварийном режиме, который необходимо устранить.

- Фазные напряжения U_B и U_C возрастают в $\sqrt{3}$ раз и становятся равны линейным напряжениям.
- $U_B = U_{AB}$ – не совпадают по направлению и $U_C = U_{CA}$ – совпадают по направлению.
- Потенциал нейтральной точки потребителя не равен потенциалу нейтральной точки генератора, он становится равным потенциалу точки фазы А (на диаграмме из центра смещается в точку А).
- Для фазы С характерна активно-индуктивная нагрузка, для фазы В – активно – емкостная нагрузка.



$$U_F = \begin{pmatrix} 1 \times 10^{-9} \\ -324.341 - 190.355i \\ -324.341 + 190.696i \end{pmatrix} \cdot V \quad \vec{|U_F|} = \begin{pmatrix} 1 \times 10^{-9} \\ 376.075 \\ 376.247 \end{pmatrix} \cdot V$$

$$U_N = (214.341 - 0.17i) \cdot V \quad |U_N| = 214.341 \cdot V$$

$$I_N = (214.341 - 0.17i) \cdot A \quad |I_N| = 214.341 \cdot A$$

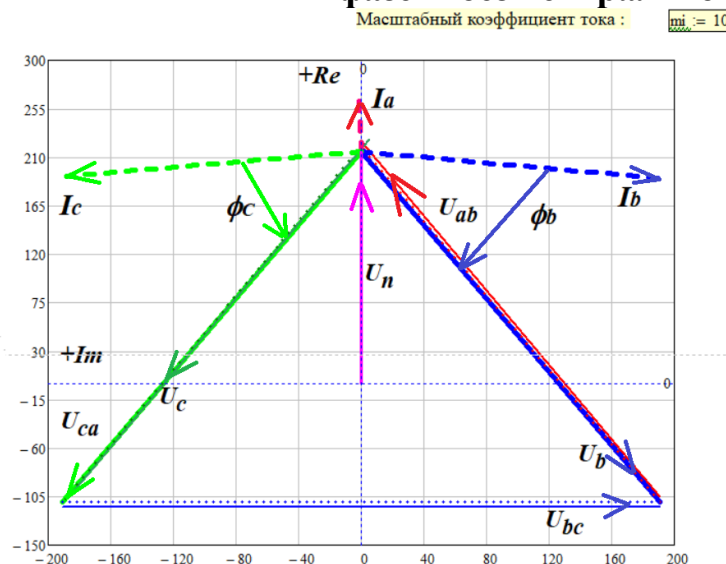
$$I = \begin{pmatrix} 220 \\ -2.484 - 19.061i \\ -2.295 + 18.895i \end{pmatrix} \cdot A \quad \vec{|I|} = \begin{pmatrix} 220 \\ 19.222 \\ 19.034 \end{pmatrix} \cdot A$$

$$I_{mi} = \begin{pmatrix} 2.2 \times 10^3 \\ -24.839 - 190.613i \\ -22.947 + 188.951i \end{pmatrix} \cdot A \quad \vec{|I_{mi}|} = \begin{pmatrix} 2.2 \times 10^3 \\ 192.225 \\ 190.34 \end{pmatrix} \cdot A$$

$$U_L = \begin{pmatrix} 330 + 190.526i \\ -381.051i \\ -330 + 190.526i \end{pmatrix} \cdot V \quad \vec{|U_L|} = \begin{pmatrix} 381.051 \\ 381.051 \\ 381.051 \end{pmatrix} \cdot V$$

$$E_L = \begin{pmatrix} 330 + 190.526i \\ -381.051i \\ -330 + 190.526i \end{pmatrix} \cdot V \quad \vec{|E_L|} = \begin{pmatrix} 381.051 \\ 381.051 \\ 381.051 \end{pmatrix} \cdot V$$

Векторная диаграмма напряжений и токов при коротком замыкании в фазе А без нейтрального провода



$$U_F = \begin{pmatrix} 4.83 + 0.167i \\ -325.17 - 190.359i \\ -325.17 + 190.692i \end{pmatrix} \cdot V \quad \vec{|U_F|} = \begin{pmatrix} 4.833 \\ 376.792 \\ 376.96 \end{pmatrix} \cdot V$$

$$U_N = (215.17 - 0.167i) \cdot V \quad |U_N| = 215.17 \cdot V$$

$$I_N = 0 \cdot A \quad |I_N| = 0 \cdot A$$

$$I = \begin{pmatrix} 4.83 + 0.167i \\ -2.51 - 19.095i \\ -2.32 + 18.928i \end{pmatrix} \cdot A \quad \vec{|I|} = \begin{pmatrix} 4.833 \\ 19.259 \\ 19.07 \end{pmatrix} \cdot A$$

$$I_{mi} = \begin{pmatrix} 48.301 + 1.666i \\ -25.097 - 190.949i \\ -23.204 + 189.283i \end{pmatrix} \cdot A \quad \vec{|I_{mi}|} = \begin{pmatrix} 48.33 \\ 192.591 \\ 190.7 \end{pmatrix} \cdot A$$

$$U_L = \begin{pmatrix} 330 + 190.526i \\ -381.051i \\ -330 + 190.526i \end{pmatrix} \cdot V \quad \vec{|U_L|} = \begin{pmatrix} 381.051 \\ 381.051 \\ 381.051 \end{pmatrix} \cdot V$$

$$E_L = \begin{pmatrix} 330 + 190.526i \\ -381.051i \\ -330 + 190.526i \end{pmatrix} \cdot V \quad \vec{|E_L|} = \begin{pmatrix} 381.051 \\ 381.051 \\ 381.051 \end{pmatrix} \cdot V$$

- КЗ в фазе А при обрыве нейтрального провода можно рассматривать как частный случай несимметричной нагрузки, при котором фазное напряжение на короткозамкнутой фазе становится равно 0 В, а фазные напряжения двух других фаз увеличиваются до значений, равных

линейным напряжениям, т.е. возрастают в $\sqrt{3}$ раз, $U_B = U_{AB}$ – векторы не совпадают по направлению, $U_C = U_{CA}$ – векторы совпадают по направлению.

- Потенциал нейтральной точки потребителя не равен потенциалу нейтральной точки генератора, становится равным потенциалу точки фазы А.
- Напряжение смещения нейтрали также имеет большое значение.
- Для фазы С характерна активно-индуктивная нагрузка, для фазы В – активно – емкостная нагрузка.

Основные причины возникновения короткого замыкания в сети:

- устаревшая электросеть (изношенный изоляционный материал, разрывы в области перегибов, оголенные контакты);
- повышенная влажность помещения (пример: затопление соседями и т.п.), которая разрушает изоляцию скруток и соединений проводов;
- механическое вмешательство в целостность изоляционного материала ТПЖ (пример – ввинченный в место нахождения провода шуруп или вбитый гвоздь). Следовательно, перед любыми строительными работами необходимо проверить стены и обнаружить траекторию пролегания кабеля;
- нарушение целостности кабеля грызунами;
- перегрузка электрической сети в течение долгого промежутка времени;
- нарушение функционирования какого-либо электрического оборудования, что негативно влияет на работу цепи.

Способы устранения короткого замыкания:

- вышедший из строя участок электроцепи необходимо устранить, после чего произвести новое соединение контактов с герметичной изоляцией области соединения;
- в ситуации с подгоревшей розеткой (выключателем) не нужно заниматься восстановлением изделия. Разумнее и даже дешевле приобрести новое целое надежное электроустановочное устройство;
- устаревшая электрическая проводка должна быть полностью заменена;
- если причина кроется в неполадках в электрооборудовании, его срочно нужно отремонтировать.

Профилактика

- искрение розетки – сигнал о ее срочной замене или ремонте;
- один раз в течение пары-тройки месяцев нужно проводить проверку сети и силовой группы, ведь короткие замыкания появляются во времени. Обнаружить возможное замыкание можно по пожелтевшему корпусу с подплавленными участками. Именно это говорит о том, что КЗ протекает сквозь линию;
- необходимо в обязательном порядке установить УЗО и АВ. Эти устройства быстро и надежно обеспечивают защиту от вероятных проблем в сети;

- в процессе прокладки электрической проводки важно правильно произвести расчет сечения кабельно-проводниковых изделий. Это поможет обойти возникновение перегрузов из-за приборов высокой мощности;
- кабели при установке проводки не должны плотно прилегать друг к другу, чтобы не провоцировать повреждение защитного покрытия;
- перед тем, как приступить к просверливанию или штробированию стен нужно проверить их на траекторию прохождения кабеля и провода.

13. Назначение, принцип действия и устройство автоматического выключателя для коммутации и защиты трехфазной ЭЦ.

Автоматический выключатель — это контактный коммутационный аппарат, предназначенный для включения и отключения электрической цепи, а также для защиты цепи от токов перегрузки и короткого замыкания.

Типы автоматических выключателей:

- воздушные автоматические выключатели, применяющиеся в промышленности в цепях с большим током в 1000А;
- автоматические выключатели в литом корпусе, рассчитанные на большие диапазоны рабочего тока от 16 до 1000 А;
- модульные автоматические выключатели, нашедшие широкое применение в быту.

Устройство автоматического выключателя. Корпус изготавливают из диэлектрического материала, и имеет специальное крепление для монтажа, также в конструкцию входят:

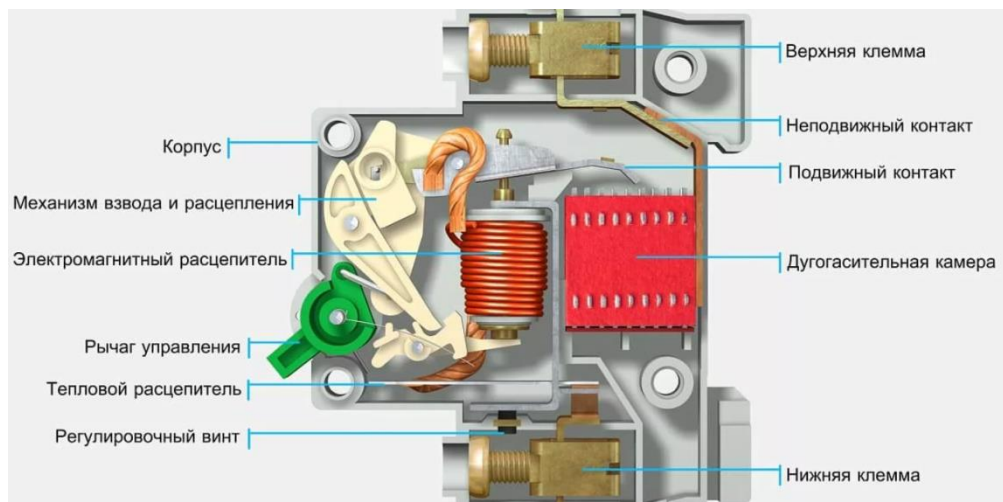
- рычаг управления (предназначен для включения-отключения автомата, след., и участка цепи, на котором расположен автомат);
- тепловой расцепитель, выполненный из биметаллической пластины, которая при заданных токах изгибается и приводит в действие механизм расцепителя;
- электромагнитный расцепитель, срабатывающий при токах короткого замыкания.

При подключении автоматического выключателя в цепь ток проходит через верхнюю клемму на биметаллическую пластину, затем на катушку соленоида, т.е. на электромагнитный расцепитель. Далее через контакт рычага управления на нижнюю клемму.

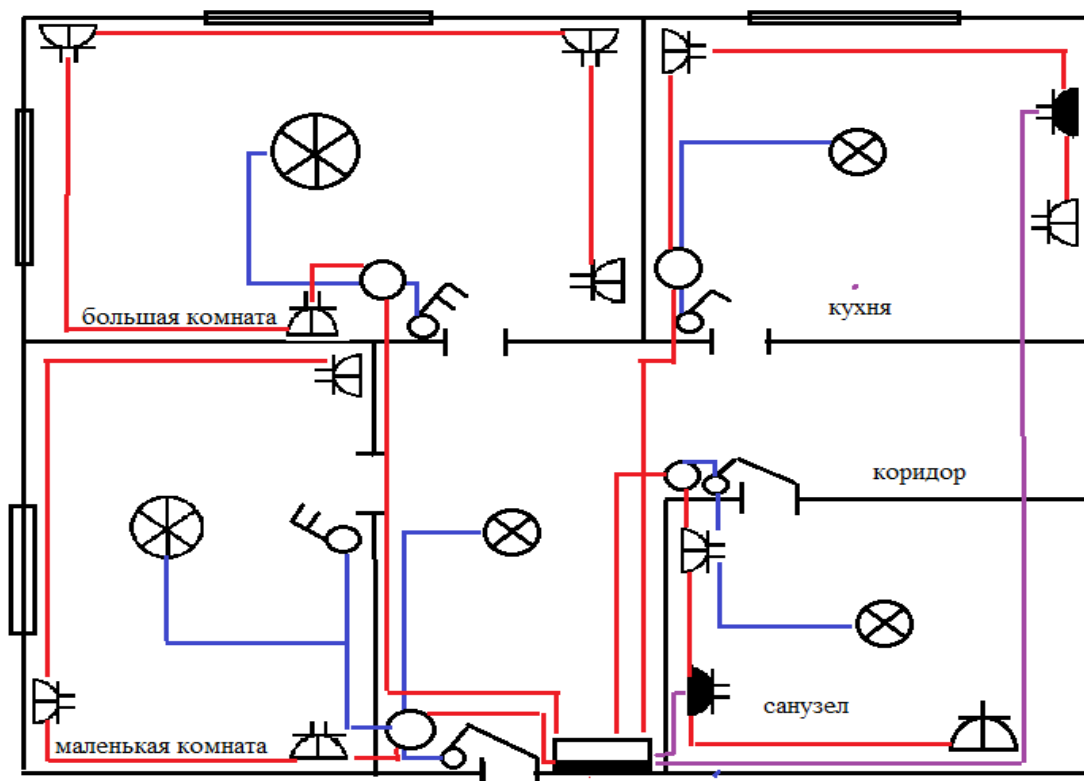
Режимы работы автоматического выключателя при перегрузке и коротком замыкании.

При токах перегрузки биметаллическая пластина нагревается, изгибается и приводит в действие механизм расцепителя, автоматический выключатель отключается, обесточивая цепь. Время, за которое биметаллическая пластина изогнется и приведет механизм в действие, называется временем срабатывания и может колебаться от нескольких секунд до часа в зависимости от характеристик автоматического выключателя и величины тока.

При коротком замыкании ток в цепи мгновенно возрастает, и возросшее магнитное поле перемещает сердечник соленоида вниз, тем самым приводя в действие механизм расцепителя, обесточивая защищаемую цепь. При КЗ время срабатывания очень мало — около 0,02 с. Но при размыкании цепи есть вероятность появления электрической дуги. Дуга приводит к разрушению контактов. Во избежание этого в автоматический выключатель устанавливают дугогасительную камеру, которая гасит дугу.



14. Нарисуйте и поясните схему электроснабжения своего дома или квартиры.



Условные обозначения:



— двухполюсная сдвоенная розетка с защитным контактом;



— двухполюсная розетка с защитным контактом;



— розетка для плиты и бойлера;



— одноклавишный выключатель;



— двухклавишный выключатель;



— распределительная коробка;



— светильник;



— люстра;



— распределительный щит.

Тип электрической проводки – скрытый - провода и кабели уложены в специальные штробы, прорезанные в стенах, полах или потолке, после чего они замуровываются цементным раствором или другими строительными материалами.

Распределительный щит в зависимости от необходимого объема потребляемого электричества распределяет электроэнергию во все комнаты квартиры. В комнатах наблюдается последовательное расположение розеток на линии электроэнергии.

К электроприборам и кабелю в санузле применяются повышенные требования, так как близкое соседство воды – это риск. Чтобы электросеть была безопасной и функциональной, при составлении схемы и монтаже разводки необходимо учитывать ряд правил: Распределительную коробку следует установить за границей санузла – в коридоре, холле или прихожей. Для каждого устройства, которое используется в ванной (стиральной машины, светильников у зеркала, фена или электробритвы), необходимо выделить отдельную розетку. Вне зависимости от размеров санузла выключатель всегда устанавливают с наружной стороны. Наиболее удачное место – около входной двери. Электрокабель рекомендуется прокладывать в верхней части стены, под самым потолком, располагая линии параллельно полу и используя изолирующий рукав. Требования распространяются также на выбор фурнитуры, которой придется пользоваться регулярно – розеток и выключателей. Предположим, степень защиты розеток должна быть не менее IP 44, а еще лучше приобретать специальные устройства с защищающей от брызг крышкой. От светильников 220 В рекомендуется отказаться в пользу аналогов 12 В.

Трехфазная цепь при соединении потребителей треугольником.

1. Что собой представляет трехфазная электрическая цепь при соединении потребителей треугольником. Необходимые составляющие элементы трехфазной ЭЦ?

Если конец каждой фазы обмотки генератора соединить с началом следующей фазы, образуется соединение в треугольник. К точкам соединений обмоток подключают три линейных провода, ведущие к нагрузке. На рис. 3 изображена трехфазная цепь, соединенная треугольником. Как видно из рис. 3, в трехфазной цепи, соединенной треугольником, фазные и линейные напряжения одинаковы.

$$U_L = U_\phi$$

I_A, I_B, I_C - линейные токи;

I_{ab}, I_{bc}, I_{ca} - фазные токи.

Линейные и фазные токи нагрузки связаны между собой первым законом Кирхгофа для узлов a, b, c.

$$\dot{I}_A = \dot{I}_{ab} - \dot{I}_{ca}, \dot{I}_B = \dot{I}_{bc} - \dot{I}_{ab}, \dot{I}_C = \dot{I}_{ca} - \dot{I}_{bc}$$

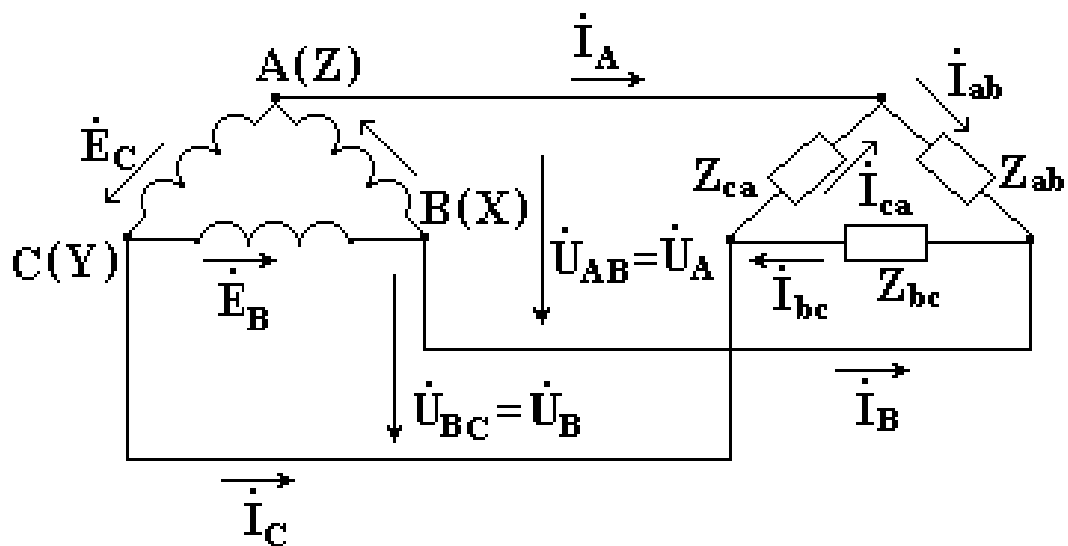


Рис. 3

Линейный ток равен геометрической разности соответствующих фазных токов.

На рис. 4 изображена векторная диаграмма трехфазной цепи, соединенной треугольником при симметричной нагрузке. Нагрузка является симметричной, если сопротивления фаз одинаковы. Векторы фазных токов совпадают по направлению с векторами соответствующих фазных напряжений, так как нагрузка состоит из активных сопротивлений.

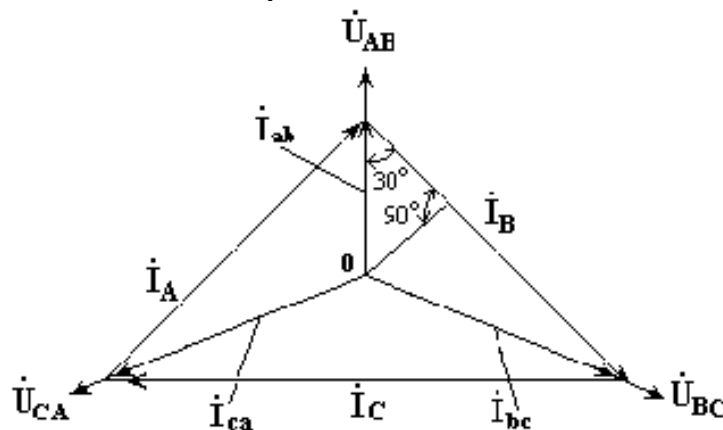


Рис. 4

Из векторной диаграммы видно, что

$$I_{\text{л}} = 2I_{\phi} \cdot \cos 30^{\circ} = 2I_{\phi} \cdot \frac{\sqrt{3}}{2} = \sqrt{3} \cdot I_{\phi}$$

$I_{\text{л}} = \sqrt{3} I_{\phi}$ при симметричной нагрузке.

Трехфазная цепь состоит из трех основных элементов:

- 1).трехфазного генератора, в котором механическая энергия преобразуется в электрическую с трехфазной системой ЭДС,
- 2).линии передачи со всем необходимым оборудованием,
- 3).приемников (потребителей), которые могут быть как трехфазными (например, трехфазные асинхронные двигатели), так и однофазными (например, лампы накаливания).

2. Какие параметры ЭЦ называются линейными и фазными?

Фазное напряжение U_{ϕ} – напряжение между началом и концом фазы.

Линейное напряжение ($U_{\text{л}}$) – напряжение между линейными проводами или между одноименными выводами разных фаз (U_{AB}, U_{BC}, U_{CA}). Условно положительные направления линейных напряжений приняты от точек, соответствующих первому индексу, к точкам соответствующим второму индексу.

Фазные токи (I_{ϕ}) – это токи в фазах генератора и приемников.

Линейные токи ($I_{\text{л}}$) – токи в линейных проводах.

В отличие от соединения звездой при соединении треугольником фазные токи не равны линейным.

3. Запишите соотношения между линейными и фазными параметрами ЭЦ (напряжения, токи, мощности) для потребителей по схеме треугольник в симметричных режимах.

Токи в фазах приемника определяются по формулам:

$$\dot{I}_{ab} = \dot{U}_{ab} / Z_{ab}; \quad \dot{I}_{bc} = \dot{U}_{bc} / Z_{bc}; \quad \dot{I}_{ca} = \dot{U}_{ca} / Z_{ca}.$$

Линейные токи можно определить по фазным, составив уравнения по первому закону Кирхгофа для узлов a, b и c

$$\dot{I}_A = \dot{I}_{ab} - \dot{I}_{ca}; \quad \dot{I}_B = \dot{I}_{bc} - \dot{I}_{ab}; \quad \dot{I}_C = \dot{I}_{ca} - \dot{I}_{bc}.$$

При соединении треугольником соотношения между фазными и линейными

напряжениями и токами равны: $U_{\phi} = U_{\text{л}}$, $I_{\phi} = \frac{I_{\text{л}}}{\sqrt{3}}$ $3U_{\phi}I_{\phi} = 3\frac{U_{\text{л}}I_{\text{л}}}{\sqrt{3}} = \sqrt{3}U_{\text{л}}I_{\text{л}}$.

Тогда активную мощность можно выразить через линейные значения напряжения и тока:

$$P = \sqrt{3} * U_{\text{л}} * I_{\text{л}} * \cos \varphi \text{ (Вт)}.$$

Реактивная мощность трёхфазной цепи:

$$Q = 3 * Q_{\phi} = 3 * U_{\phi} * I_{\phi} * \sin \varphi = \sqrt{3} * U_{\text{л}} * I_{\text{л}} * \sin \varphi \text{ (Вар)}.$$

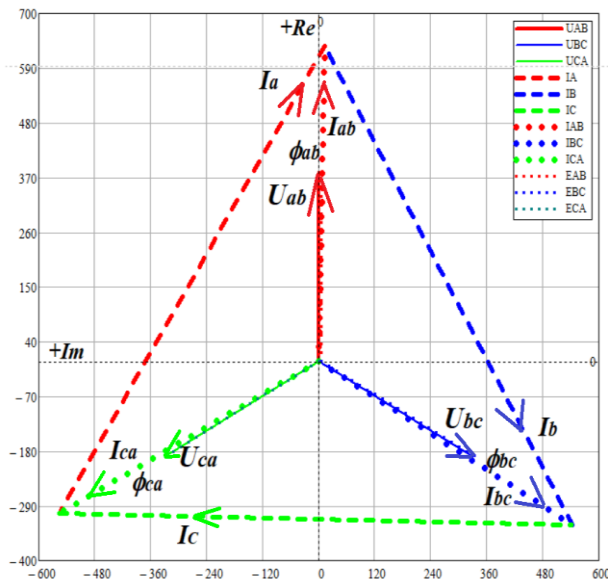
Полная мощность трёхфазной цепи:

$$S = \sqrt{P^2 + Q^2} = 3 * U_{\phi} * I_{\phi} = \sqrt{3} * U_{\text{л}} * I_{\text{л}} \text{ (ВА)}$$

4. Анализ напряжений, токов и мощностей потребителя в трехфазном симметричном и несимметричном режимах по схеме «треугольник» с использованием векторных диаграмм. Проблемы потребителей в каждой фазе и способ их устранения?

Векторная диаграмма напряжений и токов при симметричной нагрузке.

Масштабный коэффициент тока : $m_i := 20$



Линейные ЭДС источника по схеме звезда АВ ВС СА :

$$E_{L60} = \begin{pmatrix} 381.051i \\ 330 - 190.526i \\ -330 - 190.526i \end{pmatrix} \text{ В} \quad \overrightarrow{|E_{L60}|} = \begin{pmatrix} 381.051 \\ 381.051 \\ 381.051 \end{pmatrix} \text{ В} \quad \arg(E_{L60}) = \begin{pmatrix} 90 \\ -30 \\ -150 \end{pmatrix}^\circ$$

Линейные напряжения приемника АВ ВС СА :

$$U_{L60} = \begin{pmatrix} 381.051i \\ 330 - 190.526i \\ -330 - 190.526i \end{pmatrix} \text{ В} \quad \overrightarrow{|U_{L60}|} = \begin{pmatrix} 381.051 \\ 381.051 \\ 381.051 \end{pmatrix} \text{ В} \quad \arg(U_{L60}) = \begin{pmatrix} 90 \\ -30 \\ -150 \end{pmatrix}^\circ$$

Фазные токи АВ ВС СА :

$$I_{60} = \begin{pmatrix} 0.677 + 31.74i \\ 27.149 - 16.456i \\ -27.826 - 15.283i \end{pmatrix} \text{ А} \quad \overrightarrow{|I_{60}|} = \begin{pmatrix} 31.747 \\ 31.747 \\ 31.747 \end{pmatrix} \text{ А} \quad \arg(I_{60}) = \begin{pmatrix} 88.778 \\ -31.222 \\ -151.222 \end{pmatrix}^\circ$$

Линейные токи АВ С :

$$I_{L60} = \begin{pmatrix} 28.503 + 47.023i \\ 26.472 - 48.196i \\ -54.975 + 1.173i \end{pmatrix} \text{ А} \quad \overrightarrow{|I_{L60}|} = \begin{pmatrix} 54.987 \\ 54.987 \\ 54.987 \end{pmatrix} \text{ А} \quad \arg(I_{L60}) = \begin{pmatrix} 58.778 \\ -61.222 \\ 178.778 \end{pmatrix}^\circ$$

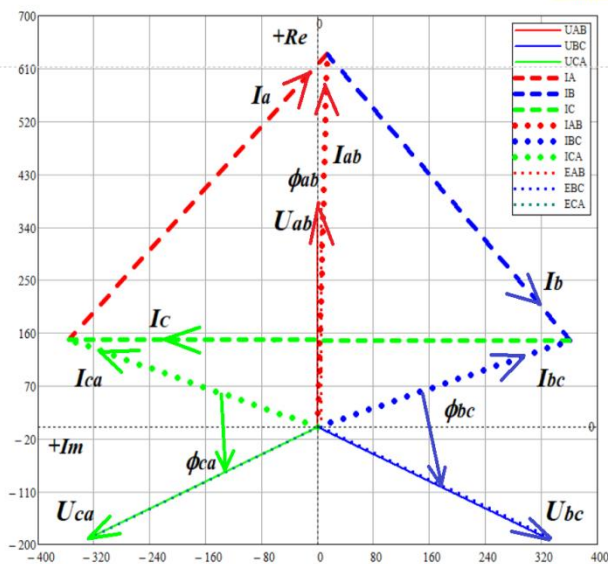
Падение напряжения на каждом элементе цепи :

$$U_{60} = \begin{pmatrix} I_{60_1} R_1 K_{1,1} - j I_{60_1} X_{L_1} K_{1,2} - j I_{60_1} X_{C_1} K_{1,3} \\ I_{60_2} R_2 K_{2,1} - j I_{60_2} X_{L_2} K_{2,2} - j I_{60_2} X_{C_2} K_{2,3} \\ I_{60_3} R_3 K_{3,1} - j I_{60_3} X_{L_3} K_{3,2} - j I_{60_3} X_{C_3} K_{3,3} \end{pmatrix} \quad \overrightarrow{|U_{60}|} = \begin{pmatrix} 380.964 & 498.681 & 490.553 \\ 380.964 & 498.681 & 490.553 \\ 380.964 & 498.681 & 490.553 \end{pmatrix} \text{ В}$$

При симметричной нагрузке векторная диаграмма имеет симметричный вид, поскольку сопротивления фаз равны. Геометрическая сумма фазных токов для треугольника всегда будет равна 0. Выполняются равенства $I_L = \sqrt{3} \cdot I_\Phi$, $U_L = U_\Phi$, характерный для соединения «Треугольником». В каждой фазе активно-индуктивная нагрузка, угол ϕ положительный.

Векторная диаграмма напряжений и токов при несимметричной нагрузке.

Масштабный коэффициент тока : $m_i := 20$



Линейные ЭДС источника по схеме звезда АВ ВС СА :

$$E_{L60} = \begin{pmatrix} 381.051i \\ 330 - 190.526i \\ -330 - 190.526i \end{pmatrix} \text{ В} \quad \overrightarrow{|E_{L60}|} = \begin{pmatrix} 381.051 \\ 381.051 \\ 381.051 \end{pmatrix} \text{ В} \quad \arg(E_{L60}) = \begin{pmatrix} 90 \\ -30 \\ -150 \end{pmatrix}^\circ$$

Линейные напряжения приемника АВ ВС СА :

$$U_{L60} = \begin{pmatrix} 381.051i \\ 330 - 190.526i \\ -330 - 190.526i \end{pmatrix} \text{ В} \quad \overrightarrow{|U_{L60}|} = \begin{pmatrix} 381.051 \\ 381.051 \\ 381.051 \end{pmatrix} \text{ В} \quad \arg(U_{L60}) = \begin{pmatrix} 90 \\ -30 \\ -150 \end{pmatrix}^\circ$$

Фазные токи АВ ВС СА :

$$I_{60} = \begin{pmatrix} 0.677 + 31.74i \\ 18.037 + 7.349i \\ -17.794 + 7.415i \end{pmatrix} \text{ А} \quad \overrightarrow{|I_{60}|} = \begin{pmatrix} 31.747 \\ 19.477 \\ 19.277 \end{pmatrix} \text{ А} \quad \arg(I_{60}) = \begin{pmatrix} 88.778 \\ 22.167 \\ 157.378 \end{pmatrix}^\circ$$

Линейные токи АВ С :

$$I_{L60} = \begin{pmatrix} 18.471 + 24.325i \\ 17.36 - 24.391i \\ -35.831 + 0.066i \end{pmatrix} \text{ А} \quad \overrightarrow{|I_{L60}|} = \begin{pmatrix} 30.543 \\ 29.938 \\ 35.831 \end{pmatrix} \text{ А} \quad \arg(I_{L60}) = \begin{pmatrix} 52.789 \\ -54.559 \\ 179.894 \end{pmatrix}^\circ$$

Падение напряжения на каждом элементе цепи :

$$U_{60} = \begin{pmatrix} I_{60_1} R_1 K_{1,1} - j I_{60_1} X_{L_1} K_{1,2} - j I_{60_1} X_{C_1} K_{1,3} \\ I_{60_2} R_2 K_{2,1} - j I_{60_2} X_{L_2} K_{2,2} - j I_{60_2} X_{C_2} K_{2,3} \\ I_{60_3} R_3 K_{3,1} - j I_{60_3} X_{L_3} K_{3,2} - j I_{60_3} X_{C_3} K_{3,3} \end{pmatrix} \quad \overrightarrow{|U_{60}|} = \begin{pmatrix} 380.964 & 498.681 & 490.553 \\ 233.722 & 0 & 300.955 \\ 231.324 & 302.802 & 0 \end{pmatrix} \text{ В}$$

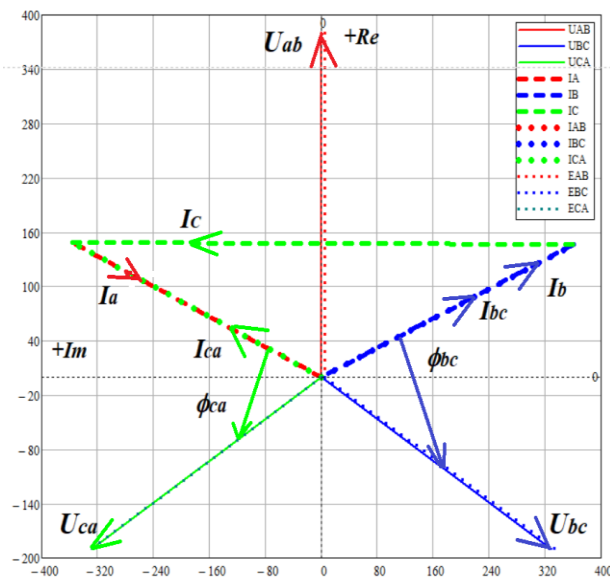
Неравенство фазных сопротивлений создает несимметричную нагрузку, фазные напряжения остаются без изменений, сохраняется значение напряжения во всех фазах 381 В. Нагрузка в фазе АВ и в фазе СА имеет активно-индуктивный характер, в фазе ВС – активно – емкостный характер.

5. Анализ и устранение аварийного состояния «обрыв фазы» для потребителей по схеме треугольник с использованием векторных

диаграмм. Проблемы потребителей в каждой фазе и способ их устранения?

Векторная диаграмма напряжений и токов при обрыве фазы АВ.

Масштабный коэффициент тока : $\frac{I_{L60}}{I_{L60}} = 20$



Линейные ЭДС источника по схеме звезда АВ ВС СА :

$$E_{L60} = \begin{pmatrix} 381.051i \\ 330 - 190.526i \\ -330 - 190.526i \end{pmatrix} \cdot V \quad \vec{E}_{L60} = \begin{pmatrix} 381.051 \\ 381.051 \\ 381.051 \end{pmatrix} \cdot V \quad \arg(E_{L60}) = \begin{pmatrix} 90 \\ -30 \\ -150 \end{pmatrix}^\circ$$

Линейные напряжения приемника АВ ВС СА :

$$U_{L60} = \begin{pmatrix} 381.051i \\ 330 - 190.526i \\ -330 - 190.526i \end{pmatrix} \cdot V \quad \vec{U}_{L60} = \begin{pmatrix} 381.051 \\ 381.051 \\ 381.051 \end{pmatrix} \cdot V \quad \arg(U_{L60}) = \begin{pmatrix} 90 \\ -30 \\ -150 \end{pmatrix}^\circ$$

Фазные токи АВ ВС СА :

$$I_{60} = \begin{pmatrix} 0 \\ 18.037 + 7.349i \\ -17.794 + 7.415i \end{pmatrix} \cdot A \quad \vec{I}_{60} = \begin{pmatrix} 0 \\ 19.477 \\ 19.477 \end{pmatrix} \cdot A \quad \arg(I_{60}) = \begin{pmatrix} 0 \\ 19.477 \\ 19.477 \end{pmatrix}^\circ$$

Линейные токи А В С :

$$I_{L60} = \begin{pmatrix} 17.794 - 7.415i \\ 18.037 + 7.349i \\ -35.831 + 0.066i \end{pmatrix} \cdot A \quad \vec{I}_{L60} = \begin{pmatrix} 19.277 \\ 19.477 \\ 35.831 \end{pmatrix} \cdot A \quad \arg(I_{L60}) = \begin{pmatrix} -22.622 \\ 22.167 \\ 179.894 \end{pmatrix}^\circ$$

Падение напряжения на каждом элементе цепи :

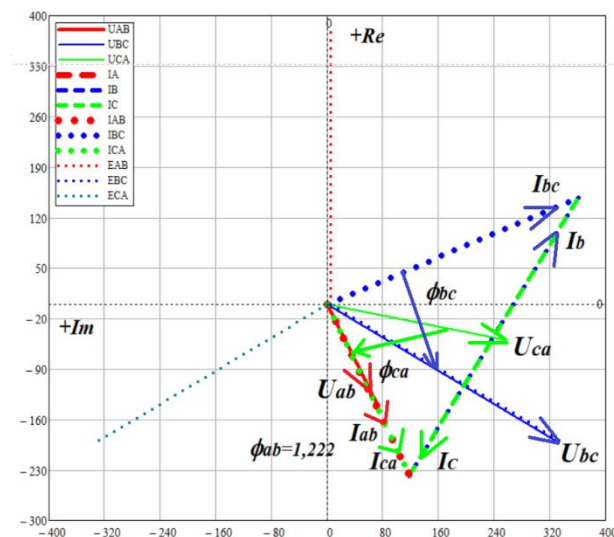
$$U_{60} = \begin{pmatrix} I_{60_1} \cdot R_{1,K1,1} + j \cdot I_{60_1} \cdot X_{L1,K1,2} - j \cdot I_{60_1} \cdot X_{C1,K1,3} \\ I_{60_2} \cdot R_{2,K2,1} + j \cdot I_{60_2} \cdot X_{L2,K2,2} - j \cdot I_{60_2} \cdot X_{C2,K2,3} \\ I_{60_3} \cdot R_{3,K3,1} + j \cdot I_{60_3} \cdot X_{L3,K3,2} - j \cdot I_{60_3} \cdot X_{C3,K3,3} \end{pmatrix} \quad \vec{U}_{60} = \begin{pmatrix} 0 & 0 & 0 \\ 233.722 & 0 & 300.955 \\ 231.324 & 302.802 & 0 \end{pmatrix} \cdot V$$

Обрыв фазы АВ приводит к отсутствию тока в фазе АВ, не изменяется при этом фазное напряжение фазы АВ и напряжения других фаз, сумма токов фаз ВС и СА равна 0. Линейные токи становятся равны фазным $I_{BC} = I_B$ – векторы совпадают по направлению, $I_{CA} = I_A$ – векторы не совпадают по направлению. Нагрузка в фазе СА имеет активно-индуктивный характер, в фазе ВС – активно – емкостный характер.

6. Анализ и устранение аварийного состояния «обрыв линии» для потребителей по схеме треугольник с использованием векторных диаграмм. Проблемы потребителей в каждой фазе и способ их устранения?

Векторная диаграмма напряжений и токов при обрыве линии А.

Масштабный коэффициент тока : $\frac{I_{L60}}{I_{L60}} = 20$



Линейные ЭДС источника по схеме звезда АВ ВС СА :

$$E_{L60} = \begin{pmatrix} 381.051i \\ 330 - 190.526i \\ -330 - 190.526i \end{pmatrix} \cdot V \quad \vec{E}_{L60} = \begin{pmatrix} 381.051 \\ 381.051 \\ 381.051 \end{pmatrix} \cdot V \quad \arg(E_{L60}) = \begin{pmatrix} 90 \\ -30 \\ -150 \end{pmatrix}^\circ$$

Линейные напряжения приемника АВ ВС СА :

$$U_{L60} = \begin{pmatrix} 73.492 - 140.627i \\ 330 - 190.526i \\ 256.508 - 49.899i \end{pmatrix} \cdot V \quad \vec{U}_{L60} = \begin{pmatrix} 158.673 \\ 381.051 \\ 261.316 \end{pmatrix} \cdot V \quad \arg(U_{L60}) = \begin{pmatrix} -62.408 \\ -30 \\ -11.008 \end{pmatrix}^\circ$$

Фазные токи АВ ВС СА :

$$I_{60} = \begin{pmatrix} 5.872 - 11.844i \\ 18.037 + 7.349i \\ 5.872 - 11.844i \end{pmatrix} \cdot A \quad \vec{I}_{60} = \begin{pmatrix} 13.22 \\ 19.477 \\ 13.22 \end{pmatrix} \cdot A \quad \arg(I_{60}) = \begin{pmatrix} -63.631 \\ 22.167 \\ -63.631 \end{pmatrix}^\circ$$

Линейные токи А В С :

$$I_{L60} = \begin{pmatrix} -2.189 \times 10^{-15} + 3.315i \times 10^{-15} \\ 12.166 + 19.193i \\ -12.166 - 19.193i \end{pmatrix} \cdot A \quad \vec{I}_{L60} = \begin{pmatrix} 3.972 \times 10^{-15} \\ 22.724 \\ 22.724 \end{pmatrix} \cdot A \quad \arg(I_{L60}) = \begin{pmatrix} 123.435 \\ 57.631 \\ -122.369 \end{pmatrix}^\circ$$

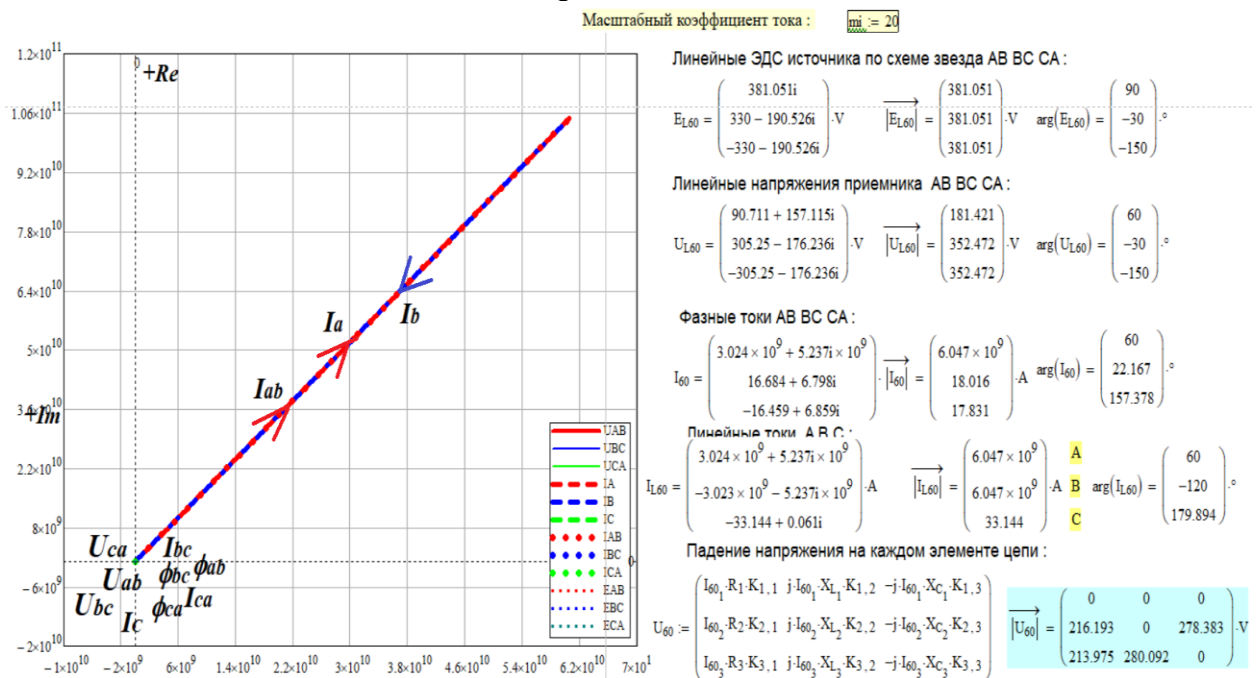
Падение напряжения на каждом элементе цепи :

$$U_{60} = \begin{pmatrix} I_{60_1} \cdot R_{1,K1,1} + j \cdot I_{60_1} \cdot X_{L1,K1,2} - j \cdot I_{60_1} \cdot X_{C1,K1,3} \\ I_{60_2} \cdot R_{2,K2,1} + j \cdot I_{60_2} \cdot X_{L2,K2,2} - j \cdot I_{60_2} \cdot X_{C2,K2,3} \\ I_{60_3} \cdot R_{3,K3,1} + j \cdot I_{60_3} \cdot X_{L3,K3,2} - j \cdot I_{60_3} \cdot X_{C3,K3,3} \end{pmatrix} \quad \vec{U}_{60} = \begin{pmatrix} 158.637 & 207.655 & 204.27 \\ 233.722 & 0 & 300.955 \\ 158.637 & 207.655 & 0 \end{pmatrix} \cdot V$$

Обрыв линейного провода А изменяет значения фазных напряжений, на диаграмме вектора этих напряжений изменяют свое положение. Ток фазы I_{AB} становится равным току I_{CA}, также вектора этих токов совпадают по направлению. Нагрузка в фазе АВ и в фазе СА имеет активно-индуктивный характер, в фазе ВС – активно – емкостный характер

7. Анализ и устранение аварийного состояния «короткое замыкание фазы» (КЗ) для треугольника с использованием векторных диаграмм. Проблемы потребителей в каждой фазе и способ их устранения? Профилактика КЗ?

Векторная диаграмма напряжений и токов при коротком замыкании в фазе АВ.



Короткое замыкание при соединении треугольником неприемлемо, т.к. увеличивает ток закороченной фазы и связанные с ним линейные токи до бесконечно больших значений, трехфазная ЭЦ в таком режиме работать не может.

В схемах «треугольник» и трехпроводная «звезда» короткое замыкание одной из фаз не вызывает аварии, поскольку срабатывает защита от перегрузки токов, отключающая цепь.

Напряжение на замкнутой фазе равно нулю, напряжения двух других фаз равны линейным напряжениям, поэтому и токи этих фаз увеличатся в $\sqrt{3}$ раз. Вектор тока закороченной фазы АВ при этом увеличивается до триллионных значений (10^{12}).

При коротких замыканиях в фазах нагрузки или между линейными проводами токи резко возрастают, и происходит аварийное отключение установки защитой. Обрывы фаз или линейных проводов при соединении

нагрузки в треугольник не приводят к перегрузкам по токам или напряжениям, как это иногда случается при соединении нагрузки в звезду.

Профилактика

- искрение розетки – сигнал о ее срочной замене или ремонте;
- один раз в течение пары-тройки месяцев нужно проводить проверку сети и силовой группы, ведь короткие замыкания появляются во времени. Обнаружить возможное замыкание можно по пожелтевшему корпусу с подплавленными участками. Именно это говорит о том, что КЗ протекает сквозь линию;
- необходимо в обязательном порядке установить УЗО и АВ. Эти устройства быстро и надежно обеспечивают защиту от вероятных проблем в сети;
- в процессе прокладки электрической проводки важно правильно произвести расчет сечения кабельно-проводниковых изделий. Это поможет обойти возникновение перегрузов из-за приборов высокой мощности;
- кабели при установке проводки не должны плотно прилегать друг к другу, чтобы не провоцировать повреждение защитного покрытия;
- перед тем, как приступить к просверливанию стен необходимо их проверить на траекторию прохождения кабеля и провода.