



Переходные процессы в системах электроснабжения

ЛЕКЦИЯ № 4

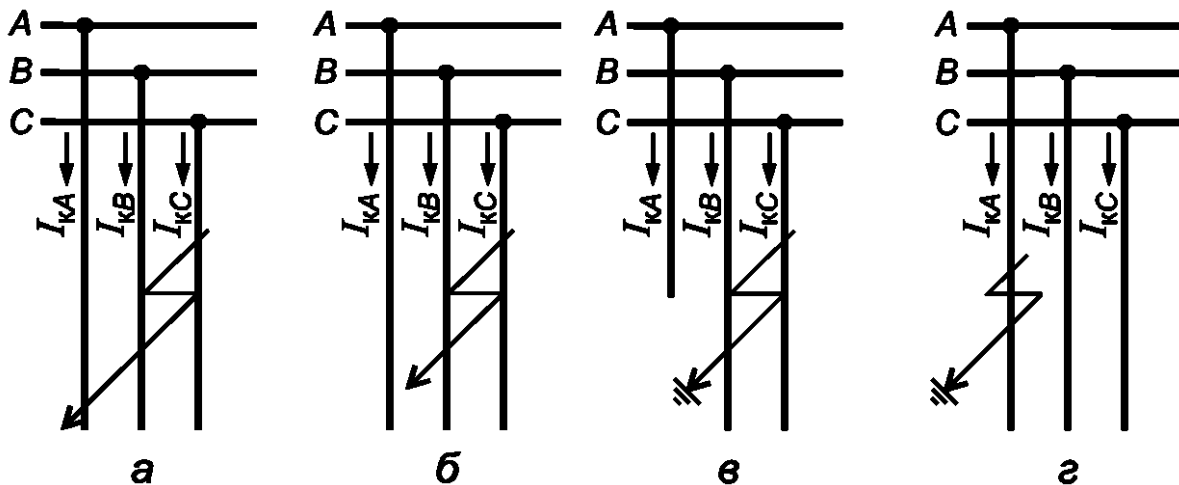
Преподаватель: Никитин Дмитрий Сергеевич
к.т.н., доцент ОЭЭ ИШЭ ТПУ
248 ауд. 8 корп., вн. тел. 1978

Несимметричные переходные процессы

Несимметричные режимы в электрических системах возникают вследствие **несимметричных коротких замыканий** или **обрыва** одной или двух фаз линии.

В первом случае несимметрия называется **поперечной**, во втором – **продольной**.

Виды несимметричных КЗ



a – трехфазное КЗ – $K^{(3)}$; *б* – двухфазное КЗ – $K^{(2)}$;

в – двухфазное КЗ на землю – $K^{(1,1)}$; *г* – однофазное КЗ на землю – $K^{(1)}$



Несимметричные короткие замыкания

Симметричное короткое замыкание – короткое замыкание в электроустановке, при котором все ее фазы находятся в одинаковых условиях.

Несимметричное короткое замыкание – короткое замыкание в электроустановке, при котором одна из ее фаз находится в условиях, отличных от условий других фаз.

Однофазное короткое замыкание на землю – короткое замыкание на землю в трехфазной электроэнергетической системе с глухо или эффективно заземленными нейтралями силовых элементов, при котором с землей соединяется только одна фаза.

Двухфазное короткое замыкание – короткое замыкание между двумя фазами в трехфазной электроэнергетической системе.

Двухфазное короткое замыкание на землю – короткое замыкание на землю в трехфазной электроэнергетической системе с глухо или эффективно заземленными нейтралями силовых элементов, при котором с землей соединяются две фазы.

(ГОСТ Р 52735-2007)



Расчет несимметричных коротких замыканий

Если для расчета несимметрии исходить из обычного метода расчета, то потребовалось бы составить трехфазную схему замещения и сформировать полную систему уравнений с учетом взаимоиндукции.

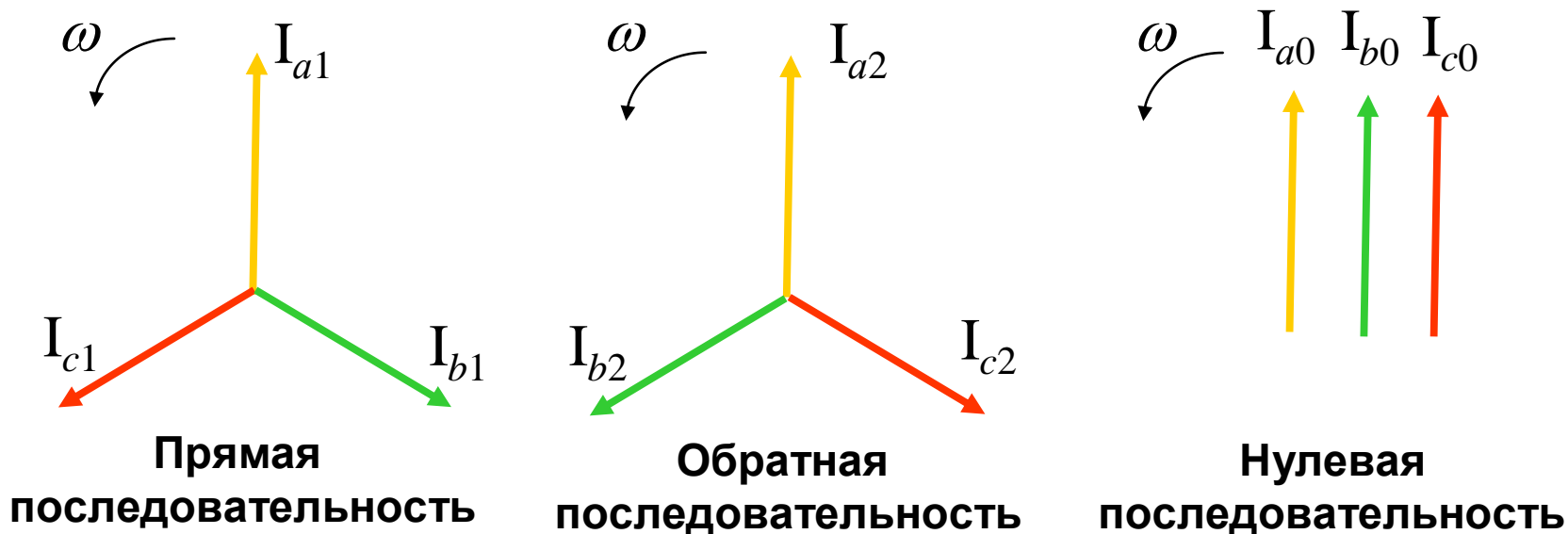
Такой подход существенно усложняет решение задачи, особенно для синхронных машин.

Сравнительно просто и вместе с тем достаточно строго анализ несимметричных режимов осуществляется **методом симметричных составляющих**.

При несимметричных КЗ вследствие несимметрии ротора синхронных машин помимо основной гармоники ток КЗ содержит высшие гармонические составляющие. Это существенно затрудняет расчеты токов КЗ. Чтобы иметь возможность применять метод симметричных составляющих в обычной форме как при расчете установившихся токов несимметричных КЗ, так и токов при переходных процессах, допустимо пренебрегать высшими гармоническими составляющими тока КЗ.

Метод симметричных составляющих (положения)

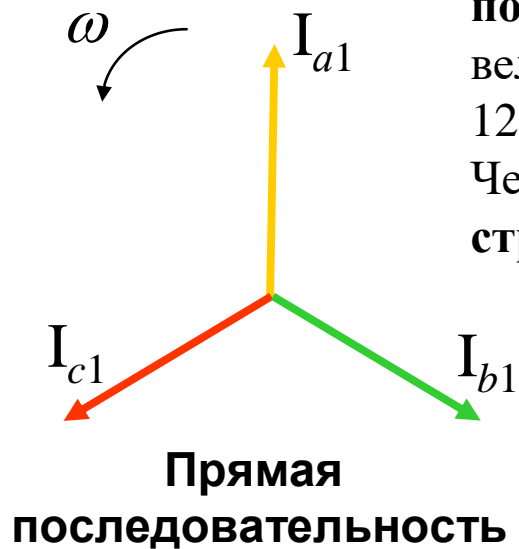
1. Любую несимметричную систему трех векторов тока I_A , I_B , I_C (или напряжения) можно разложить на три симметричные, называемые системами прямой, обратной и нулевой последовательностей.





Метод симметричных составляющих

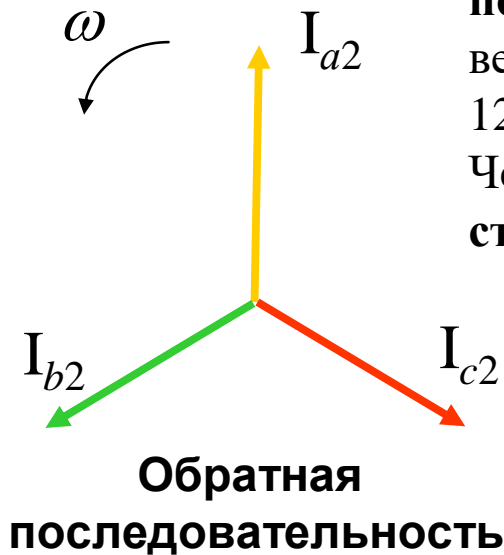
Симметричная система токов **прямой последовательности** представляет три одинаковых по величине вектора с относительным сдвигом по фазе в 120° , вращающихся против часовой стрелки. Чередование фаз А, В, С принимается **по часовой стрелке**.





Метод симметричных составляющих

Симметричная система токов **обратной последовательности** представляет три одинаковых по величине вектора с относительным сдвигом по фазе в 120° , вращающихся против часовой стрелки. Чередование фаз А, В, С принимается **против часовой стрелки**.

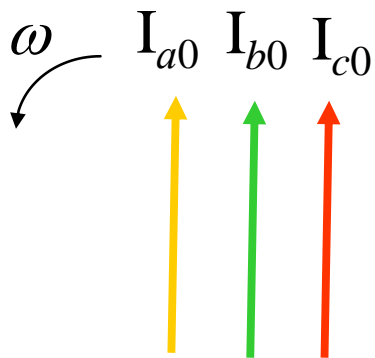




Метод симметричных составляющих (положения)

Система нулевой последовательности существенно отличается от прямой и обратной тем, что **отсутствует сдвиг фаз**.

Нулевая система токов по существу представляет три однофазных тока, для которых три провода трехфазной цепи представляют прямой провод, а обратным проводом служит земля или четвертый (нулевой), по которому возвращается $3I_0$.



**Нулевая
последовательность**



Метод симметричных составляющих

Введем комплексное число a , называемое **оператором фазы**

$$a = e^{j120^\circ} = -\frac{1}{2} + j\frac{\sqrt{3}}{2}.$$

Для оператора фазы справедливы отношения

$$a^2 = e^{j240^\circ} = -\frac{1}{2} - j\frac{\sqrt{3}}{2};$$

$$a^3 = 1; \quad a + a^2 + a^3 = 0.$$

Оператор фазы a – это вектор единичной длины, который имеет аргумент, равный 120° .

Если некоторый вектор, например \mathbf{I}_{A1} , умножить на a , то это означает повернуть \mathbf{I}_{A1} на 120° против часовой стрелки.



Метод симметричных составляющих

С помощью оператора a можно выразить токи фаз В и С прямой и обратной последовательности через токи фазы А для соответствующих последовательностей:

$$\mathbf{I}_{B1} = a^2 \mathbf{I}_{A1}, \quad \mathbf{I}_{C1} = a \mathbf{I}_{A1},$$

$$\mathbf{I}_{B2} = a \mathbf{I}_{A2}, \quad \mathbf{I}_{C2} = a^2 \mathbf{I}_{A2}.$$

Согласно условию разложения несимметричной системы токов на три симметричные системы имеем

$$\mathbf{I}_A = \mathbf{I}_{A1} + \mathbf{I}_{A2} + \mathbf{I}_{A0},$$

$$\mathbf{I}_B = \mathbf{I}_{B1} + \mathbf{I}_{B2} + \mathbf{I}_{B0},$$

$$\mathbf{I}_C = \mathbf{I}_{C1} + \mathbf{I}_{C2} + \mathbf{I}_{C0}.$$



Принимая фазу A за основную, можно с помощью оператора a выразить токи фаз B и C через ток фазы A

$$\left. \begin{aligned} \mathbf{I}_A &= \mathbf{I}_{A1} + \mathbf{I}_{A2} + \mathbf{I}_{A0}, \\ \mathbf{I}_B &= a^2 \mathbf{I}_{A1} + a \mathbf{I}_{A2} + \mathbf{I}_{A0}, \\ \mathbf{I}_C &= a \mathbf{I}_{A1} + a^2 \mathbf{I}_{A2} + \mathbf{I}_{A0}. \end{aligned} \right\} \quad (1)$$

Решая систему (1) относительно симметричных составляющих токов имеем:

$$\left. \begin{aligned} \mathbf{I}_{A1} &= (\mathbf{I}_A + a \mathbf{I}_B + a^2 \mathbf{I}_C) / 3, \\ \mathbf{I}_{A2} &= (\mathbf{I}_A + a^2 \mathbf{I}_B + a \mathbf{I}_C) / 3, \\ \mathbf{I}_{A0} &= (\mathbf{I}_A + \mathbf{I}_B + \mathbf{I}_C) / 3. \end{aligned} \right\} \quad (2)$$



2. В трехфазной цепи в месте КЗ наряду с напряжениями прямой последовательности возникают напряжения обратной и нулевой последовательностей.

В ветвях схемы вместе с токами прямой последовательности начинают циркулировать токи обратной и нулевой последовательностей.

Т.е. в узлах схем приложены напряжения прямой U_1 , обратной U_2 и нулевой U_0 последовательностей.

Системы прямой и обратной последовательностей являются симметричными и уравновешенными; система нулевой последовательности является симметричной, но неуравновешенной. Сумма несимметричных векторов тока равна утроенному току нулевой последовательности:

$$3\mathbf{I}_0 = \mathbf{I}_A + \mathbf{I}_B + \mathbf{I}_C$$

т. е. геометрическая сумма несимметричной системы токов равна утроенному току нулевой последовательности, который протекает (возвращается) в земле или нулевом проводе.



3. Для электрических системах справедлив принцип независимости действия симметричных составляющих, т.е. токи и напряжения схем отдельных последовательностей могут рассматриваться независимо друг от друга и в пределах каждой последовательности связаны между собой законами Ома и Кирхгофа.

В трехфазной системе с симметричными элементами напряжение какой либо последовательности вызывает протекание токов только одноименной последовательности. Точно также ток данной последовательности вызывает падение напряжения только своей последовательности.



3. Для электрических системах справедлив принцип независимости действия симметричных составляющих, т.е. токи и напряжения схем отдельных последовательностей могут рассматриваться независимо друг от друга и в пределах каждой последовательности связаны между собой законами Ома и Кирхгофа.

В трехфазной системе с симметричными элементами напряжение какой либо последовательности вызывает протекание токов только одноименной последовательности. Точно также ток данной последовательности вызывает падение напряжения только своей последовательности.

Силовые элементы схем имеют разные сопротивления прямой \mathbf{Z}_1 , обратной \mathbf{Z}_2 и нулевой \mathbf{Z}_0 последовательностей при протекании по ним токов различных последовательностей \mathbf{I}_1 , \mathbf{I}_2 и \mathbf{I}_0 .

$$\Delta \mathbf{U}_1 = \mathbf{I}_1 \mathbf{Z}_1,$$

$$\Delta \mathbf{U}_2 = \mathbf{I}_2 \mathbf{Z}_2,$$

$$\Delta \mathbf{U}_0 = \mathbf{I}_0 \mathbf{Z}_0.$$



4. Элементы трехфазной сети для токов прямой, обратной и нулевой последовательностей имеют неодинаковые сопротивления. ЭДС генераторов симметричны, т. е. не содержат обратной и нулевой составляющих.

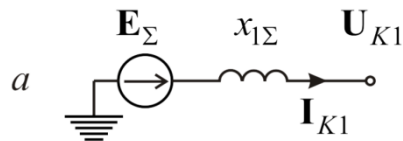
Отсюда можно сделать следующие выводы:

- 1) в электрических системах существуют только ЭДС прямой последовательности;
- 2) токи обратной и нулевой последовательностей определяются только напряжениями в точке КЗ.

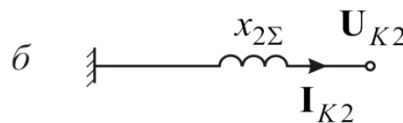


Для эквивалентных однолинейных схем прямой, обратной и нулевой последовательностей уравнения второго закона Кирхгофа можно записать в следующем виде:

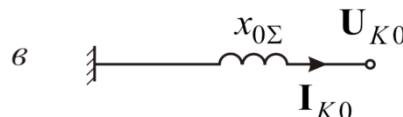
$$U_{K1} = E_{\Sigma} - I_{K1} j x_{1\Sigma},$$



$$U_{K2} = 0 - I_{K2} j x_{2\Sigma},$$



$$U_{K0} = 0 - I_{K0} j x_{0\Sigma}.$$



ЭДС генераторов симметричны, т.е. не содержат обратной и нулевой составляющих. Источником токов обратной и нулевой последовательностей являются соответственно напряжения U_{K2} , U_{K0} в точке КЗ.

Выполнение принципа независимости действия симметричных составляющих практически очень важно, поскольку позволяет **каждую последовательность рассматривать независимо (автономно) от других последовательностей.**



Параметры элементов СЭС обратной и нулевой последовательностей

Каждый элемент СЭС характеризуется параметрами прямой, обратной и нулевой последовательностей. Все сопротивления, которыми представляются элементы в нормальном симметричном режиме, а также при расчете симметричного КЗ, являются сопротивлениями прямой последовательности.

При отсутствии магнитной связи между фазами какого-либо элемента (например, реактор) его сопротивления равны между собой ($Z_1 = Z_2 = Z_3$).

Для элемента, магнитосвязанные цепи которых неподвижны друг относительно друга (трансформаторы, линии), сопротивления прямой и обратной последовательностей равны ($Z_1 = Z_2$), а реактивное сопротивление нулевой последовательности существенно отличается от сопротивлений этих последовательностей в силу отличия системы токов нулевой последовательности от систем токов прямой и обратной последовательностей.



Магнитная связь между фазами элемента отсутствует.

$$x_1 = x_2 = x_0;$$

$$r_1 = r_2 = r_0.$$



В синхронных машинах токи обратной последовательности создают магнитный поток, вращающийся в сторону, противоположную направлению вращения магнитного потока реакции статора, и, следовательно, перемещающийся относительно ротора с двойной синхронной скоростью.

Реактивное сопротивление обратной последовательности синхронной машины зависит от конструкции машины. Так, для СМ без демпферных обмоток оно определяется по формуле:

$$x_2 = \frac{2x'_d x'_q}{x'_d + x'_q}$$

Для машины с демпферными обмотками реактивность обратной последовательности может быть определена по тем же выражениям, если заменить в них x'_d и x'_q соответственно на x''_d и x''_q .



Значения реактивного сопротивления обратной последовательности даются в каталогах и справочниках. При отсутствии таких данных в качестве приближенных соотношений принимаются:

Для машин без демпферных обмоток $x_2 \approx 1,45x'_d$

Для турбогенераторов и машин с демпферными обмотками в обеих осях ротора $x_2 \approx 1,22x''_d$

В практических приближенных расчетах обычно идут на дополнительное упрощение, принимая

$$\begin{aligned}x''_d &\approx x_2; & x''_{(сд)} &\approx x_2; & x''_{(ад)} &\approx x_2 \\x_1 &= x_2; & r_1 &= r_2. & x_2 &\approx x''_d.\end{aligned}$$



Токи нулевой последовательности создают только магнитные потоки рассеяния статорной обмотки, меньшие, чем при токах прямой и обратной последовательностей. Величина реактивного сопротивления нулевой последовательности колеблется в широких пределах:

$$x_0 = (0,15 - 0,6)x''_d$$

Однако в практических упрощенных расчетах в схему замещения нулевой последовательности СГ, СД и АД не входят.

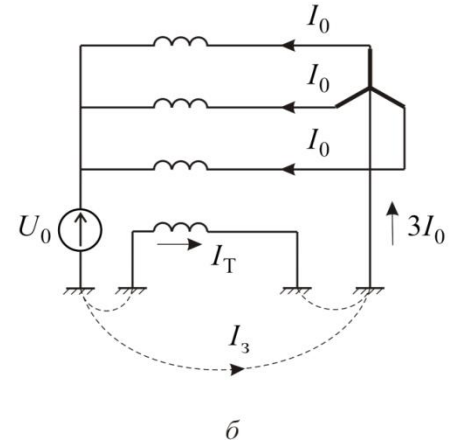
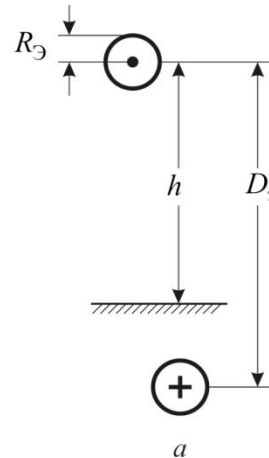
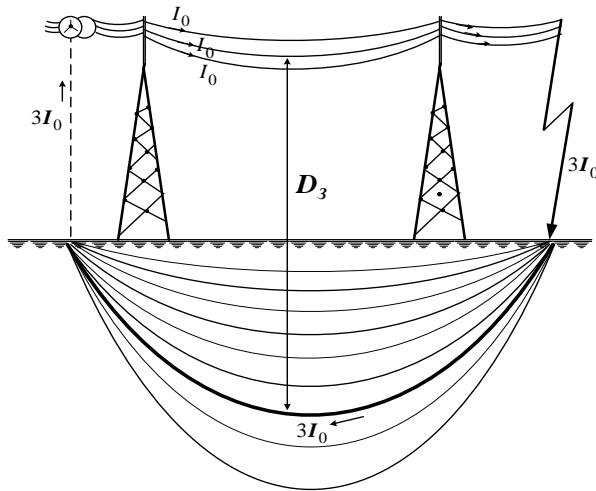
Рассмотрим более подробнее сопротивления **нулевой последовательности ВЛ и КЛ**, поскольку для них:

$$x_1 = x_2;$$

$$r_1 = r_2.$$

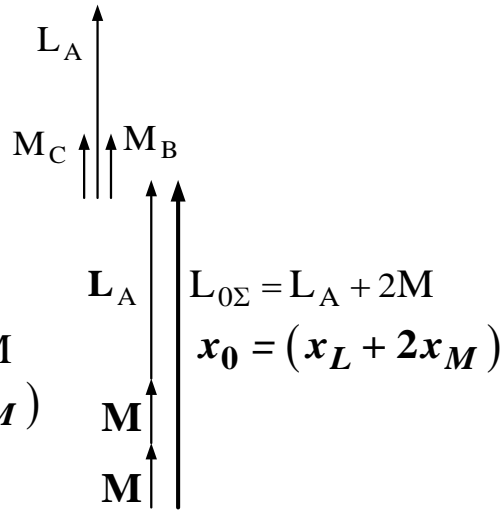
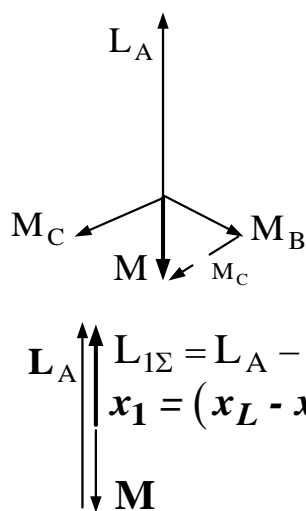
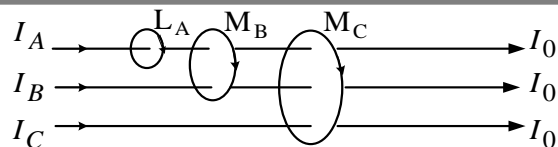
$$x_0 \gg x_1;$$

$$r_0 \gg r_1.$$



Пути протекания тока нулевой последовательности ВЛ

Метод симметричных составляющих



Видно, что x_0 на $3x_M$ больше x_1

Рис. Факторы, определяющие x_1 и x_0 ВЛ



Заземленные грозозащитные тросы уменьшают сопротивление ВЛ за счет взаимоиндукции петли трос-провод. С учетом того, что токи в тросе и линии имеют встречное направление, т.е. сдвинуты относительно друг друга на 180° получаем

$$x_0^T = x_0 - x_{0\text{пт}}^2 / x_{0\text{т}}$$

где x_0^T – сопротивление нулевой последовательности ВЛ с тросом;

$x_{0\text{пт}}$, $x_{0\text{т}}$ – сопротивления взаимоиндукции провод-трос и собственно троса в нулевой последовательности.

В практических расчетах x_0 ВЛ определяется через коэффициент

$$k = x_0 / x_1$$

| Исполнение ВЛ | $k = x_0 / x_1$ |
|-------------------------------------|-----------------|
| Одноцепная линия без троса | 3,5 |
| Одноцепная линия со стальным тросом | 3,0 |
| Двухцепная линия без троса | 5,5 |
| Двухцепная линия со стальным тросом | 4,7 |



Активное сопротивление нулевой последовательности ВЛ учитывает сопротивление земли $R_0 = R_3 + R_1$ и составляет $R_3 \approx 0,15 \text{ Ом/км}$

Условия определения реактивного сопротивления нулевой последовательности **для кабельных линий** аналогичны ВЛ.

Часть токов нулевой последовательности возвращается по оболочке кабеля, а часть – по земле. Оболочка кабеля оказывает такое же влияние, как и трос в воздушных линиях, т. е. уменьшает реактанс нулевой последовательности.

Аналитические расчеты дают приближенные значения:

$$x_0 = (3,5 \div 4,6) x_1 \quad \text{и} \quad r_0 \approx 1,0 r_1$$

В практике расчетов ориентируются на экспериментальные данные, которые дают, так называемое, **сопротивление петли фаза–нуль**, которое используется для расчета однофазного КЗ

$$Z_{(\phi-0)} = (2Z_{1Л} + Z_{0Л}) / 3$$



Трансформаторы и автотрансформаторы

Сопротивление нулевой последовательности трансформатора зависит от двух факторов:

*конструкции магнитопровода;
схемы соединения фазных обмоток.*

Конструкция магнитопровода влияет на реактанс ветви намагничивания $x_{\mu 0}$ в схеме нулевой последовательности.

Для трехфазных четырех и пятистержневых трансформаторов, а также трехстержневых тр-ов напряжением 35 кВ и выше принимают

$$x_{\mu 0} \approx \infty$$

Для трехфазных трехстержневых трансформаторов напряжением 10/0,4; 6/0,4 кВ реактанс $x_{\mu 0}$ учитывают как конечную величину, что будет рассмотрено далее.

Влияние *схемы соединения обмоток* проявляется в том, что при КЗ со стороны обмоток соединенных по схеме Y и Δ реактивность равна бесконечности $x_0 \approx \infty$. Реактивность трансформатора имеет конечное значение при КЗ со стороны обмоток, соединенных в Y_0 .

Определим x_0 трансформаторов для схем соединения обмоток Y_0/Δ , Y_0/Y_0 , Y_0/Y при КЗ со стороны Y_0 .

Двухобмоточный трансформатор со схемой Y_0/Δ

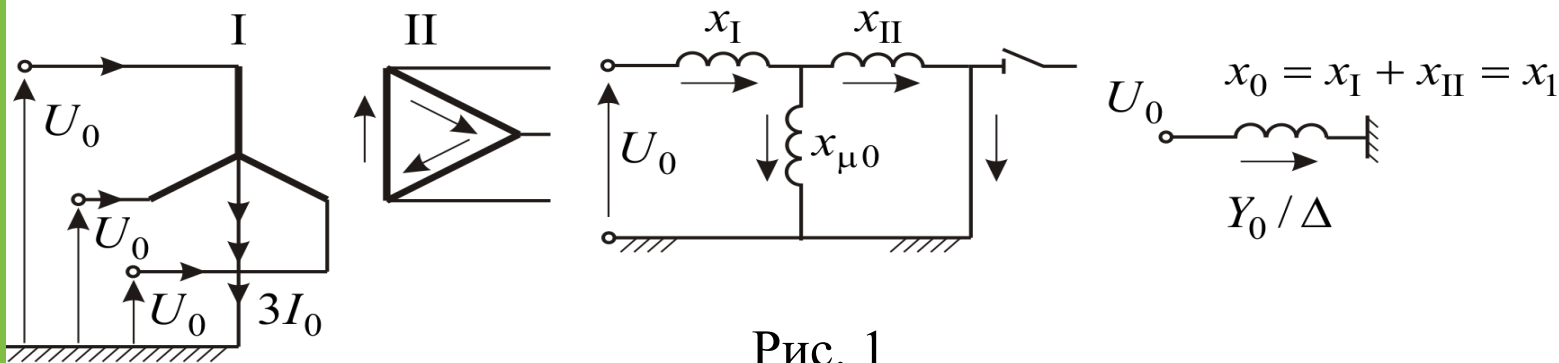


Рис. 1

2. Двухобмоточный трансформатор со схемой

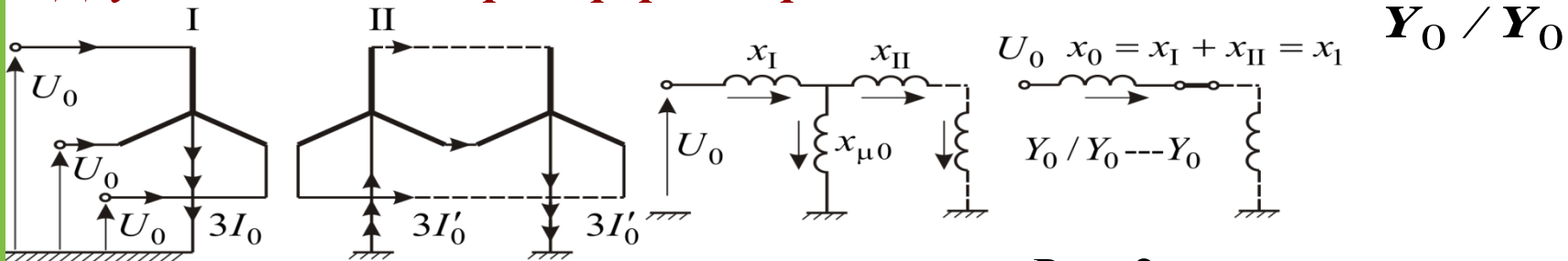


Рис. 2

Y_0 / Y

3. Двухобмоточный трансформатор со схемой

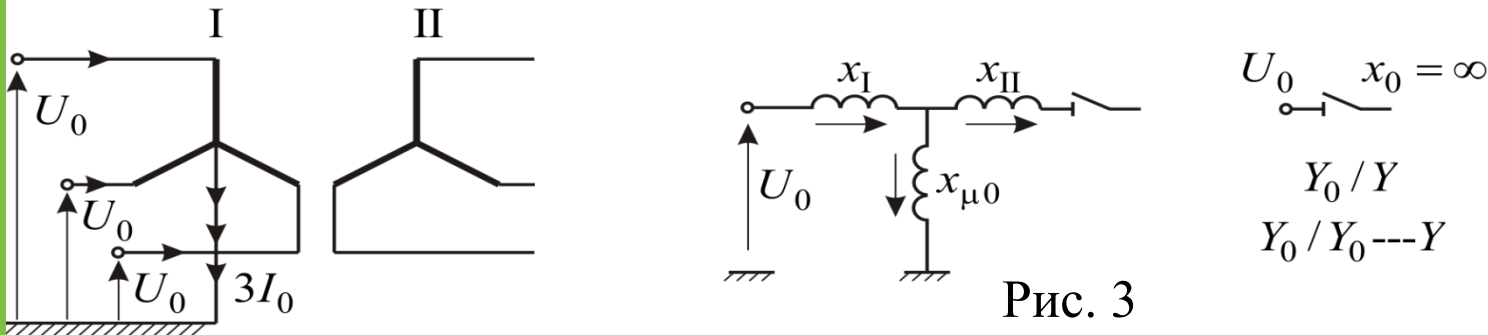
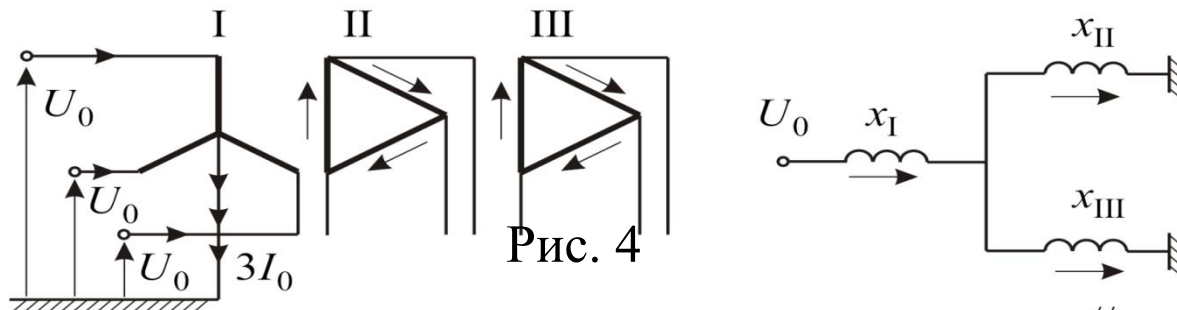


Рис. 3

4. Трехобмоточный трансформатор со схемой

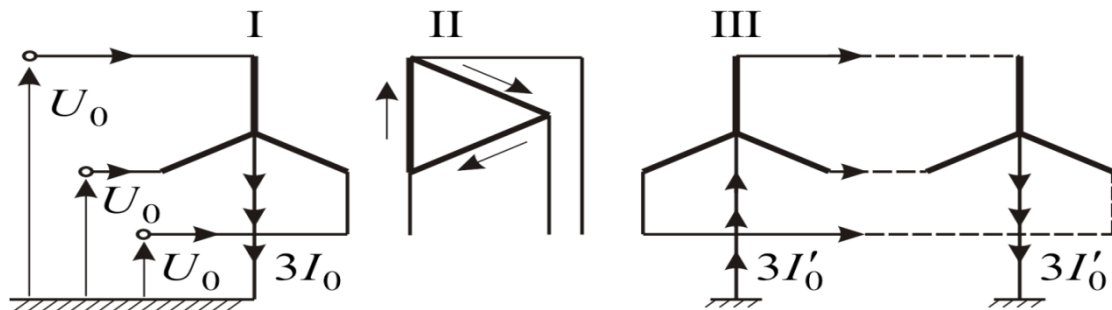


$Y_0 / \Delta / \Delta$

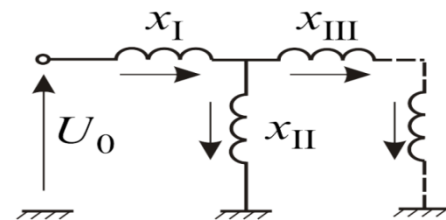
$Y_0 / \Delta / \Delta$

$$x_0 = x_I + x_{II} // x_{III}$$

Трехобмоточный трансформатор со схемой



$Y_0 / \Delta / Y_0$



$Y_0 / \Delta / Y_0 \text{---} Y_0$

Рис. 5



R и X понижающих трансформаторов
10/0,4 кВ (сопротивление приведено к 0,4 кВ)

| $S_{\text{НОМ}}$, кВА | Схема соед. обмоток | Значения R, X (мОм) | | | |
|------------------------------|---------------------------|------------------------------|-----------------|-------------------------------|-----------------|
| | | прямой последовательности | | нулевой последовательности | |
| | | R_{IT} | X_{IT} | R_{OT} | X_{OT} |
| 25 | Y/Y ₀ | 154 | 244 | 1650 | 1930 |
| | Y/Z ₀ | 177 | 243 | 73 | 35.4 |
| 630 | Y/Y ₀ | 3.1 | 13.6 | 30.2 | 95.8 |
| | Δ/Y ₀ | 3.4 | 13.5 | 3.4 | 13.5 |
| 1600 | Y/Y ₀ | 1 | 5.4 | 16.3 | 50 |
| | Δ/Y ₀ | 1.1 | 5.4 | 1.1 | 5.4 |



Общие сведения о схемах замещения прямой, обратной и нулевой последовательностей

Неотъемлемым этапом расчета любого несимметричного режима является составление схем замещения прямой, обратной и нулевой последовательностей. Преобразованием этих схем находят результирующие сопротивления всех последовательностей ($Z_{2\Sigma}, Z_{0\Sigma}, Z_{1\Sigma}$); из схемы прямой последовательности дополнительно определяют эквивалентную ЭДС ($E_{1\Sigma}$). Эти преобразования осуществляют относительно *клемм несимметрии, т. е. начала и конца схем.*