

ФЕДЕРАЛЬНОЕ АГЕНТСТВО ПО ОБРАЗОВАНИЮ
Государственное образовательное учреждение высшего профессионального образования
«Томский политехнический университет»

Р.А. Вайнштейн, Н.В. Коломиец, В.В. Шестакова

**РЕЖИМЫ ЗАЗЕМЛЕНИЯ НЕЙТРАЛИ
В ЭЛЕКТРИЧЕСКИХ СИСТЕМАХ**

Учебное пособие

Издательство ТПУ
Томск 2006

ББК 31.271.1 Я73
УДК 621.311.004.13 (075.8)
В 142

Вайнштейн Р.А., Коломиец Н.В., Шестакова В.В.
В 142 Режимы заземления нейтрали в электрических системах: учебное пособие / Р.А. Вайнштейн, Н.В. Коломиец, В.В. Шестакова. – Томск: Изд-во ТПУ, 2006.– 118с.

В пособии рассмотрены теоретические основы установившихся и переходных процессов в электрических сетях с различными режимами заземления нейтрали, формирование перенапряжений при дуговых замыканиях, отражены современные тенденции к изменению режимов заземления нейтрали в сети среднего напряжения 6 – 35 кВ. Учебное пособие предназначено для студентов направления 140200 "Электроэнергетика" специальностей 140203 «Релейная защита и автоматика электроэнергетических систем», 140204 «Электрические станции».

ББК 31.271.1 Я73
УДК 621.311.004.13 (075.8)

Рекомендовано к печати Редакционно-издательским советом
Томского политехнического университета

Рецензенты

Доктор технических наук, профессор
кафедры электрических станций
Новосибирского государственного технического университета
А.И. Шалин

Директор ООО «ПНП БОЛИД»
Л.И. Сарин

Начальник службы электрических режимов
Томского РДУ
П.В. Якис

© Томский политехнический университет, 2006
© Оформление. Издательство ТПУ, 2006

ВВЕДЕНИЕ

Для промышленного электроснабжения в настоящее время в России повсеместно используется система трехфазного переменного тока с частотой 50 Гц при различных напряжениях от 750 кВ при передаче электроэнергии на большие расстояния до 0,4 кВ у потребителей.

Потребители электрической энергии подключаются к линейным напряжениям (за исключением мелких потребителей в сети с номинальным напряжением 0,4 кВ) и образуют трехфазную нагрузку, соединенную либо в звезду с изолированной нейтралью, либо в треугольник. При таких условиях напряжения всех трех фаз относительно заземленных частей электрооборудования, как принято говорить – относительно земли, в нормальном режиме работы электроустановки равны между собой и сдвинуты относительно друг друга на 120 электрических градусов и поэтому потенциал нейтральных точек (генераторов, трансформаторов) относительно земли равен нулю. Очевидно, что способ соединения нейтрали с землей (через сопротивление, наглухо или отсутствие соединения) при таких условиях в нормальном режиме работы, то есть при отсутствии замыканий или обрывов фаз, не влияет на значение линейных напряжений и, следовательно, на работу потребителей.

Однако при эксплуатации необходимо считаться с возможностью возникновения различных повреждений электрооборудования. Чаще всего возникают нарушения, связанные с повреждениями изоляции между фазой и землей, которые называют замыканиями на землю.

При заземлении одной фазы на землю симметрия фазных напряжений нарушается и поэтому способ заземления нейтрали оказывает существенное влияние на электрический режим системы, то есть на уровни напряжений фаз относительно земли, токи в месте замыкания и другие электрические величины. Эти факторы оказывают влияние на надежность электроснабжения потребителей, на требуемые уровни электрической прочности изоляции фаз относительно земли, на выполнение защиты от перенапряжений и на способы выполнения релейной защиты.

Желательно выбрать такой режим нейтрали, при котором с учетом всех факторов расчетные затраты на сооружение и эксплуатацию электроустановки были бы минимальными. Практически вопрос о режиме нейтрали не решается индивидуально при сооружении каждой электроустановки. Большой опыт проектирования, строительства и эксплуатации электрических систем в РФ привел к тому, что этот вопрос в течение длительного времени решался однозначно – в зависимости от номинального напряжения электроустановки. При напряжении 0,4 кВ применяется глухое заземление нейтрали, при напряжении от 6кВ до 35 кВ включительно – изолированная нейтраль и заземление через дуго-

гасящие реакторы (компенсация емкостного тока). В сетях 110 кВ и выше применяется так называемое эффективное заземление нейтрали.

В последние годы на основе результатов многочисленных научных исследований, отечественного и зарубежного опыта в отечественной энергетике имеется устойчивая тенденция к частичному пересмотру режимов заземления нейтрали в электроустановках $6 \div 35$ кВ, которые принято называть электроустановками среднего напряжения. В частности, предлагаются и внедряются в практику следующие способы заземления нейтрали:

- заземление через активное сопротивление (резистивное заземление) в сетях со сравнительно небольшой суммарной протяженностью линий и особенно в воздушных сетях;
- комбинированное заземление нейтрали в электрических сетях с большой суммарной протяженностью линий, которое заключается в том, что дополнительно параллельно дугогасящему реактору подключается резистор с сопротивлением, которое подбирается определенным образом;
- заземление нейтрали через элементы, обеспечивающие компенсацию, как емкостной, так и активной составляющих тока в месте замыкания.

Способ заземления нейтрали решающим образом влияет на перенапряжения, возникающие при дуговых замыканиях на землю. Поэтому вопросы, связанные с выбором способа заземления нейтрали, тесно связаны с другими применяемыми в настоящее время средствами ограничения перенапряжений с помощью различных технических средств, например, разрядников, нелинейных ограничителей перенапряжений и др. Важно также то, что способы заземления нейтрали определяют также и способ выполнения селективной защиты от замыканий на землю. При прочих равных условиях предпочтение должно быть отдано такому способу заземления нейтрали, при котором защита от замыкания на землю получается достаточно простой и надежной.

Упомянутая выше тенденция изменения режимов нейтрали в сетях среднего напряжения обусловлена не только результатами научных исследований, но также и тем, что в последние годы разработаны необходимые для реализации этих изменений технические средства, а именно – силовые высоковольтные резисторы, управляемые дугогасящие реакторы и др.

Различные аспекты комплекса задач, связанных с режимом заземления нейтрали, в основном исследованы уже довольно давно. Подробно результаты этих исследований изложены в [1]. Полезной, на взгляд авторов, является также работа [2]. Результаты более поздних работ приведены в [3, 4].

В последние годы важные работы в области ограничения перенапряжений и режимов заземления нейтрали, а также работы по созданию современных технических средств для реализации новых предложений в этой области, выполнены в Санкт-Петербургском техническом университете (Евдокунин Г.А.), в Новосибирском государственном техническом университете (Кадомская К.П., Целебровский Ю.В., Шалин А.И. Сарин Л.И., Челазнов А.А.), в Екатеринбурге в организации ОООВП «Наука, техника, бизнес в энергетике» (Обабков В.К.), в Москве ОАО «ЭЛУР» (Долгополов А.Г.) и др. Результаты этих работ изложены в докладах Всероссийских конференций, посвященных вопросам заземления нейтрали и защиты от перенапряжений [5, 6, 7].

Авторы надеются, что предлагаемое учебное пособие даст тот минимум знаний по вопросам о заземлении нейтрали в электрических сетях, который необходим инженеру-энергетику, а также обеспечит определенную базу для более глубокого изучения специальной литературы по этому вопросу.

1. КЛАССИФИКАЦИЯ СЕТЕЙ ПО ЗНАЧЕНИЮ ЭЛЕКТРИЧЕСКИХ ВЕЛИЧИН ПРИ ОДНОФАЗНОМ ЗАМЫКАНИИ НА ЗЕМЛЮ

Основным критерием такой классификации является значение напряжения на неповрежденных фазах при устойчивом (металлическом или глухом) замыкании одной фазы на землю. Сети, у которых режим заземления нейтрали таков, что напряжения на неповрежденных фазах при замыкании одной фазы на землю не превышают $0.8U_{ном}$, принято называть сетями с эффективно заземленной нейтралью, во всех остальных случаях – сетями с неэффективно заземленной нейтралью. При этом, как будет подробнее рассмотрено ниже, значения напряжений на неповрежденных фазах в зависимости от режима заземления нейтрали не занимают всей возможной области значений, а нормируются в соответствии с номинальным напряжением электроустановок.

Эффективное заземление нейтрали применяется в сетях 110 кВ и выше, в сетях с номинальным напряжением 35 кВ и ниже может применяться неэффективное заземление нейтрали, когда при однофазном замыкании на землю напряжения на неповрежденных фазах превышают значение $0.8U_{ном}$ и, как правило, достигают значения линейного напряжения.

В общем случае соотношение электрических величин при однофазном замыкании на землю определяется соотношением эквивалентных сопротивлений прямой, обратной и нулевой последовательностей, которые, в свою очередь, определяются конструкцией элементов элект-

трической сети. В частности значения этих сопротивлений для линии электропередач зависят от взаимоиндукции между фазами и цепями параллельных линий, от условий возврата тока замыкания через землю и от некоторых других факторов [8].

Для выделения областей различных типов сетей в зависимости от режима заземления нейтрали рассмотрим электрическую сеть, приняв ряд допущений:

- активные сопротивления элементов сети равны нулю;
- сопротивления прямой, обратной и нулевой последовательностей выделенного эквивалентного участка электрической сети принимаются одинаковыми;

- режим заземления нейтрали изменяется за счет изменения индуктивного сопротивления x_N , включенного между нейтральной точкой сети и землей (рис. 1.1), что приводит к изменению соотношений между результирующими сопротивлениями прямой, обратной и нулевой последовательностей. Учет только индуктивных сопротивлений близко соответствует реальным условиям и в то же время на данном этапе значительно упрощает анализ. Также для упрощения учтены только емкостные проводимости фаз относительно земли, так как активные проводимости малы и оказывают незначительное влияние на отыскиваемые электрические величины.

Принятым допущениям соответствует схема замещения на рис. 1.1.

Изменение режима заземления нейтрали за счет изменения индуктивного сопротивления x_N принято для упрощения в данном академическом примере. Практически, например, для получения режима эффективного заземления нейтрали, наглухо заземляются нейтральные точки определенной части силовых трансформаторов сети, что приводит к получению необходимого соотношения между сопротивлениями прямой, обратной и нулевой последовательностей.

При замыкании на землю, например, фазы А нас будут интересовать следующие электрические величины: напряжение на неповрежденных фазах относительно земли \dot{U}_B и \dot{U}_C , напряжение нейтрали \dot{U}_N и ток в месте замыкания \dot{I}_3 .

Для упрощения выкладок и расчетов все сопротивления и электрические величины выразим в относительных единицах, приняв за базисные величины сопротивление x_ϕ и фазную э.д.с. источника \dot{E}_A (вектор э.д.с. фазы А направлен по вещественной оси).

Тогда в относительных единицах:

$$x_{\phi*} = 1 \text{ — продольное индуктивное сопротивление фазы,}$$

$x_{C*} = x_C/x_\phi$, $x_C = 1/\omega C_\phi$ – емкостное сопротивление фазы относительно земли,

$x_{N*} = x_N/x_\phi$ – сопротивление между нейтралью и землей.

Базисным током при принятой системе относительных единиц будет величина $I_\sigma = E_A/x_\phi$.

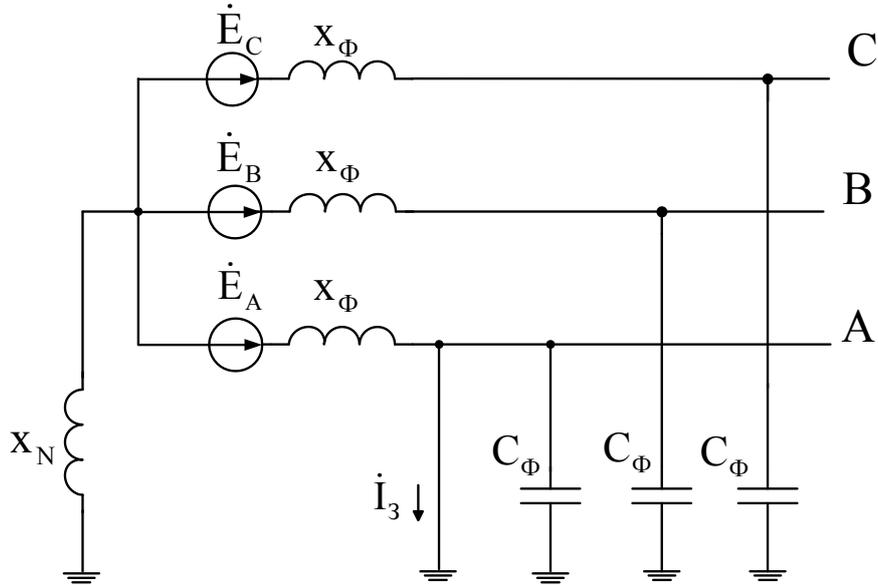


Рис. 1.1. Упрощенная схема замещения для определения электрических величин при замыкании на землю

Напряжение между нейтралью системы и землей в общем случае может быть определено по формуле

$$\dot{U}_N = -\frac{\dot{E}_A \underline{Y}_A + \dot{E}_B \underline{Y}_B + \dot{E}_C \underline{Y}_C}{\underline{Y}_A + \underline{Y}_B + \underline{Y}_C + \underline{Y}_N}. \quad (1.1)$$

При замыкании на землю фазы А реактивные проводимости, входящие в формулу (1.1), будут равны

$$\underline{Y}_A = \frac{1}{jx_\phi}, \quad \underline{Y}_B = \underline{Y}_C = \frac{1}{j(x_\phi - x_C)}, \quad \underline{Y}_N = \frac{1}{jx_N}.$$

С учетом этих значений проводимостей, а также принятой системы относительных единиц получим после упрощения

$$\dot{U}_{N*} = -\frac{x_{C*} x_{N*}}{x_{N*} (x_{C*} - 3) + (x_{C*} - 1)}. \quad (1.2)$$

Напряжения на неповрежденных фазах при замыкании на землю равны

$$\begin{aligned}\dot{U}_{B*} &= \dot{E}_{B*} + \dot{U}_{N*}; \\ \dot{U}_{C*} &= \dot{E}_{C*} + \dot{U}_{N*}.\end{aligned}\quad (1.3)$$

Ток в месте замыкания

$$\dot{I}_{3*} = \frac{\dot{E}_{A*} + \dot{U}_{N*}}{jx_{\Phi*}}.\quad (1.4)$$

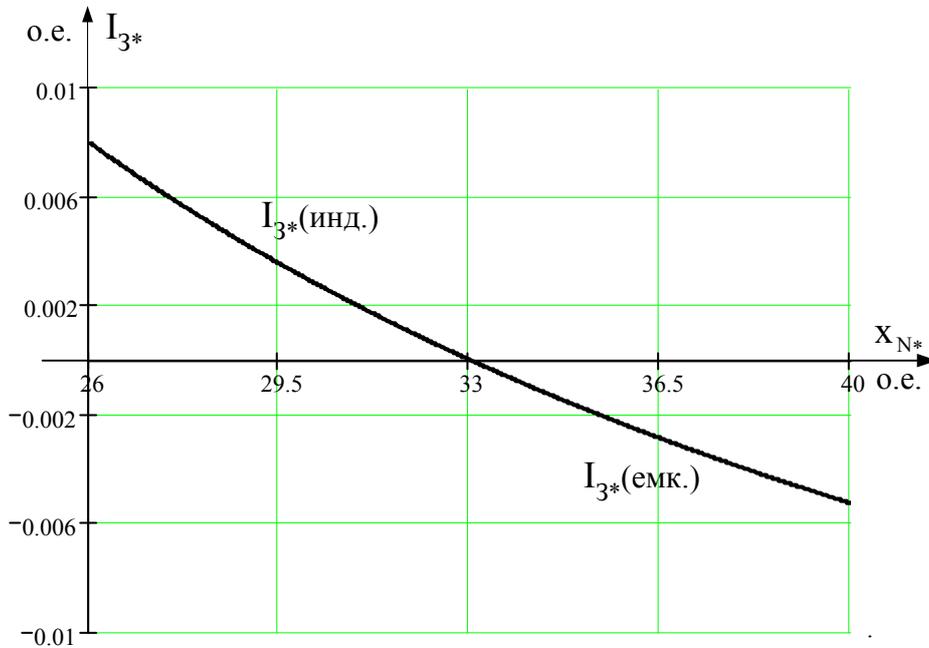
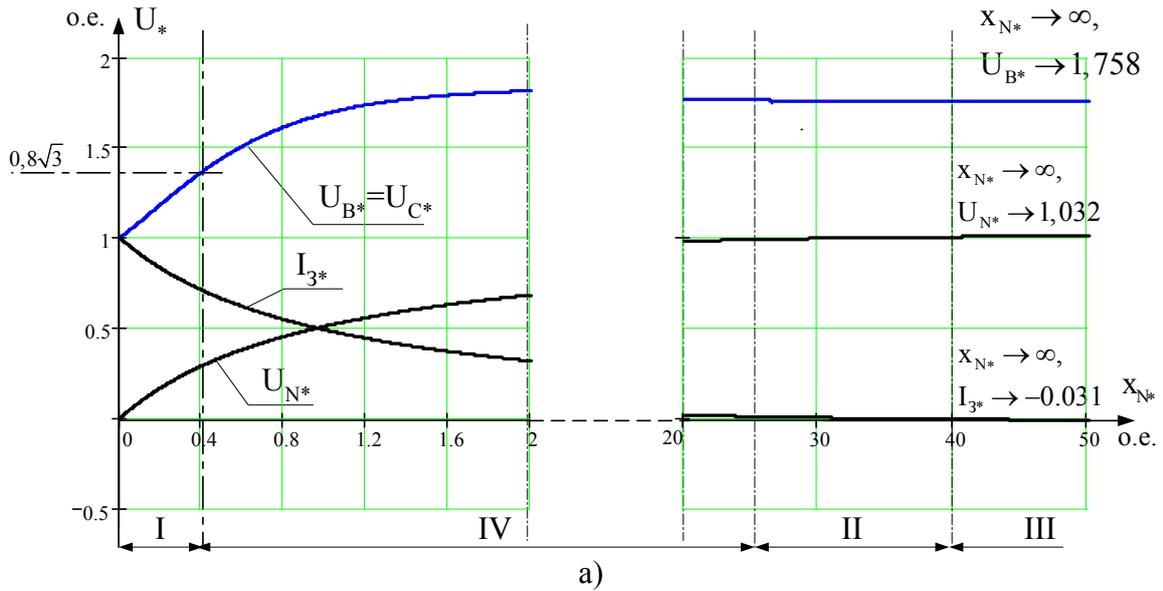
Кривые, иллюстрирующие изменение абсолютных значений напряжений на неповрежденных фазах (\dot{U}_{B*} и \dot{U}_{C*}), напряжения \dot{U}_{N*} и тока \dot{I}_{3*} , при изменении x_{N*} приведены на рис.1.2, а, б. Отметим, что практически всегда $x_C \gg x_{\Phi}$. В данном примере принято $x_{C*} = 100$.

Как видно, с ростом сопротивления в нейтрали происходит увеличение напряжения на неповрежденных фазах. При $x_{N*} = 0$ оно не превышает фазного напряжения, а при $x_{N*} \rightarrow \infty$, то есть при изолированной нейтрали, увеличивается до значения несколько превышающего номинальное (линейное) напряжение электроустановки. Возрастание напряжения до значения, превышающего линейное, объясняется частичным резонансом между продольными индуктивными сопротивлениями фаз x_{Φ} и поперечными емкостными сопротивлениями x_C .

Значение напряжения на неповрежденных фазах при замыкании на землю является одним из важнейших факторов, определяющих технико-экономические показатели электрических сетей. Поэтому классификация режимов нейтрали, как ранее говорилось, проводится в зависимости от значения этого напряжения.

При $U_B = U_C \leq 0,8U_{\text{ном}}$ (при принятых относительных единицах $U_{B*} = U_{C*} \leq 0,8\sqrt{3}$) заземление нейтрали называют эффективным, подчеркивая этим, что, благодаря выбору определенного режима заземления нейтрали, достигают значительного ограничения напряжения на неповрежденных фазах при замыкании на землю. На рис 1.2, а область эффективного заземления нейтрали обозначена цифрой I.

Частным случаем эффективного заземления нейтрали является глухое заземление нейтрали, для реализации которого принимаются все меры к достижению минимально возможного сопротивления в цепи нейтрали. Практически это достигается соединением нейтралей всех трансформаторов со специальным заземленным проводом, который называется нулевым проводом. Такой режим нейтрали применяется в электрических сетях с номинальным напряжением 380 В.



б)
Рис. 1.2.

- а – напряжения на неповрежденных фазах \dot{U}_{B*} , \dot{U}_{C*} , нейтрали \dot{U}_{N*} и ток замыкания I_{3*} при однофазном замыкании на землю:
 I – область сетей с эффективным заземлением нейтрали;
 II – область сетей с компенсацией емкостного тока замыкания;
 III – область сетей с изолированной нейтралью;
 IV – область неиспользуемых режимов;
 б – ток замыкания I_{3*} в области II при отклонении от точной компенсации примерно на $\pm 20\%$

Как видно, ограничение напряжения на неповрежденных фазах за счет заземления нейтрали через малое сопротивление сопровождается резким увеличением тока замыкания, который протекает в основном по поврежденной фазе. Этот ток соизмерим с током при междуфазных коротких замыканиях, поэтому длительная работа электроустановок с эффективным заземлением нейтрали при замыкании на землю недопустима. Практически осуществляется быстрое отключение элементов с замкнутой на землю фазой от источника питания с помощью релейной защиты.

При $x_{N*} = \infty$ получаем режим, соответствующий работе системы с изолированной нейтралью. Как уже указывалось, при изолированной нейтрали напряжение на неповрежденных фазах при замыкании на землю может даже несколько превышать номинальное линейное напряжение. Ток замыкания при изолированной нейтрали определяется в основном емкостными проводимостями фаз относительно земли и значительно меньше токов при междуфазных коротких замыканиях. При принятых выше условиях расчета $I_{3*} = 0,031$. В реальных сетях этот ток лежит в пределах от долей ампера до нескольких сотен ампер. По существующим нормам для распределительных сетей считается допустимым длительное протекание емкостного тока замыкания, если он не превышает при номинальных напряжениях 6, 10 и 35 кВ соответственно 30, 20 и 10А. Если емкостный ток замыкания на землю превышает указанные выше значения, то его компенсируют включением в цепь нейтрали реактора с таким индуктивным сопротивлением, при котором индуктивный ток в месте замыкания близок к емкостному току замыкания. Сети с таким режимом нейтрали называют сетями с компенсацией емкостного тока замыкания или кратко компенсированными сетями. Область, соответствующая компенсированным сетям, обозначена цифрой II (рис. 1.2, а).

При определенном значении индуктивного сопротивления в цепи нейтрали наступает полная компенсация емкостного тока замыкания. В данном случае это сопротивление, определенное по (1.4), при условии $I_{3*} = 0$, равно $x_{N*} = \frac{x_{C*} - 1}{3}$. Так как $x_C \gg x_\phi$, то есть при принятой системе относительных единиц $x_{C*} \gg 1$, и практическим условием компенсации емкостного тока является равенство индуктивного сопротивления в нейтрали и эквивалентного емкостного сопротивления трех фаз сети относительно земли $x_{N1*} = \frac{x_{C*}}{3}$.

Зависимость тока замыкания от x_{N*} в зоне, соответствующей сетям с компенсацией емкостного тока, при отклонении от точной настройки примерно на $\pm 20\%$ приведена на рис. 1.2, б.

В компенсированных сетях так же, как и в сетях с изолированной нейтралью при замыкании на землю имеет место повышение напряжения на неповрежденных фазах до значений, близких к линейному напряжению. Так же, как и в сетях с изолированной нейтралью в компенсированных сетях допустима длительная работа при наличии замыкания на землю, конечно при условии, что изоляция фаз относительно земли рассчитана на длительное приложение линейного напряжения.

Значения токов при однофазном замыкании в сетях с тем или иным режимом нейтрали важны не только с точки зрения возможности повреждения оборудования при их протекании. При малых токах, то есть в сетях с изолированной нейтралью или в компенсированных сетях, падения напряжения от их протекания на продольных сопротивлениях сети (сопротивлениях линий, трансформаторах и т.п.) малы и поэтому линейные напряжения, к которым подключены потребители, искажаются незначительно. При эффективном и глухом заземлении нейтрали может иметь место заметное нарушение симметрии линейных напряжений при однофазном замыкании.

В связи с тем, что в сетях с эффективным и глухим заземлением нейтрали замыкание фазы на землю вызывает протекание больших токов, значительно превышающих рабочие токи, принято однофазное замыкание в таких сетях называть «однофазным коротким замыканием». В отличие от этого применительно к сетям с изолированной нейтралью и к компенсированным сетям используют термины «однофазное замыкание» или «замыкание на землю». В последующих разделах учебного пособия рассмотрены электрические сети с различными способами заземления нейтрали.

2. СЕТИ С ЭФФЕКТИВНЫМ ЗАЗЕМЛЕНИЕМ НЕЙТРАЛИ

Эффективное заземление нейтрали, как уже упоминалось, в РФ применяется в электрических сетях напряжением 110 кВ и выше.

Практически нужный режим нейтрали в данном случае создается непосредственным заземлением нейтралей части трансформаторов электрической системы. От числа заземленных трансформаторов, их параметров и места в электрической системе зависит значение сопротивления нулевой последовательности относительно места замыкания фазы на землю. Это сопротивление и сопротивления прямой и обратной последовательностей определяют электрические величины при замыка-

нии фазы на землю и, в частности, напряжения неповрежденных фаз и ток однофазного короткого замыкания.

Рассмотрим зависимость электрических величин от соотношения сопротивлений разных последовательностей при однофазном коротком замыкании. Воспользуемся методом симметричных составляющих. Сопротивления прямой, обратной и нулевой последовательностей: Z_1, Z_2, Z_0 , используемые при выводе необходимых выражений, есть эквивалентные сопротивления относительно места несимметрии – однофазного короткого замыкания (рис.2.1).

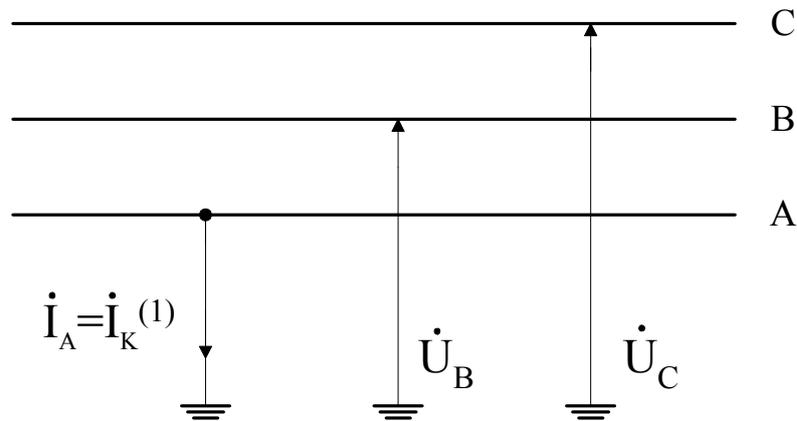


Рис. 2.1. Однофазное короткое замыкание в трехфазной сети

Как известно, для данного вида несимметрии имеют место следующие соотношения [8]:

$$\dot{I}_{A0} = \dot{I}_{A1} = \dot{I}_{A2} = \frac{\dot{I}_A}{3} = \frac{I_K^{(1)}}{3}, \quad (2.1)$$

$$\dot{U}_0 + \dot{I}_0 Z_0 = 0, \quad \dot{U}_{A1} + \dot{I}_{A1} Z_1 = \dot{E}_A, \quad \dot{U}_{A2} + \dot{I}_{A2} Z_2 = 0, \quad (2.2)$$

где $\dot{I}_0, \dot{I}_{A1}, \dot{I}_{A2}$ – токи нулевой, прямой и обратной последовательностей поврежденной фазы (фазы A),

$\dot{I}_A = I_K^{(1)}$ – ток однофазного короткого замыкания,

$\dot{U}_0, \dot{U}_{A1}, \dot{U}_{A2}$ – напряжения нулевой, прямой и обратной последовательностей поврежденной фазы.

Из (2.1) и (2.2) следует, что

$$\begin{aligned}
 \dot{i}_K^{(1)} &= \frac{3\dot{E}_A}{\underline{Z}_0 + \underline{Z}_1 + \underline{Z}_2}, \\
 \dot{U}_0 &= -\frac{\underline{Z}_0\dot{E}_A}{\underline{Z}_0 + \underline{Z}_1 + \underline{Z}_2}, \\
 \dot{U}_{A1} &= \dot{E}_A - \frac{\dot{E}_A\underline{Z}_1}{\underline{Z}_0 + \underline{Z}_1 + \underline{Z}_2}, \\
 \dot{U}_{A2} &= -\frac{\dot{E}_A\underline{Z}_2}{\underline{Z}_0 + \underline{Z}_1 + \underline{Z}_2}.
 \end{aligned}
 \tag{2.3}$$

Напряжения на неповрежденных фазах по отношению к земле будут равны

$$\begin{aligned}
 \dot{U}_B &= \dot{U}_0 + a^2\dot{U}_{A1} + a\dot{U}_{A2}, \\
 \dot{U}_C &= \dot{U}_0 + a\dot{U}_{A1} + a^2\dot{U}_{A2},
 \end{aligned}
 \tag{2.4}$$

где $a = e^{j120^\circ}$.

После подстановки (2.3) в (2.4) и преобразований с учетом того, что при замыканиях в сетях 110 кВ и выше можно считать $z_1 \approx z_2$, получим

$$\begin{aligned}
 \dot{U}_B &= \dot{E}_B + \dot{E}_A \frac{\underline{Z}_1 - \underline{Z}_0}{2\underline{Z}_1 + \underline{Z}_0}, \\
 \dot{U}_C &= \dot{E}_C + \dot{E}_A \frac{\underline{Z}_1 - \underline{Z}_0}{2\underline{Z}_1 + \underline{Z}_0}.
 \end{aligned}
 \tag{2.5}$$

Подставим в (2.5) сопротивления в виде

$$\begin{aligned}
 \underline{Z}_1 &= r_1 + jx_1 = x_1(r_{1*} + jl), \\
 \underline{Z}_0 &= r_0 + jx_0 = x_0(r_{0*} + jl),
 \end{aligned}$$

где $r_{1*} = \frac{r_1}{x_1}$, $r_{0*} = \frac{r_0}{x_0}$.

В результате получим

$$\begin{aligned} \dot{U}_B &= \dot{E}_B + \dot{E}_A \frac{x_1(r_{1*} + j1) - x_0(r_{1*} + j1)}{2x_1(r_{1*} + j1) + x_0(r_{1*} + j1)}, \\ \dot{U}_C &= \dot{E}_C + \dot{E}_A \frac{x_1(r_{1*} + j1) - x_0(r_{1*} + j1)}{2x_1(r_{1*} + j1) + x_0(r_{1*} + j1)}. \end{aligned} \quad (2.6)$$

Значение активных сопротивлений в схемах прямой и обратной последовательностей в высоковольтных сетях невелико и, как правило, составляет 10 ÷ 20% от реактивных сопротивлений, то есть $r_{1*} = 0,1 \div 0,2$.

При таких значениях r_{0*} и r_{1*} при дальнейших преобразованиях (2.6) этими величинами в степени выше первой и их произведениями пренебрегаем. В результате получим

$$\dot{U}_B = \dot{E}_B + \dot{E}_A \left[\frac{1 - \alpha}{2 + \alpha} + j3\alpha \frac{(r_{0*} - r_{1*})}{(2 + \alpha)^2} \right], \quad (2.7)$$

$$\dot{U}_C = \dot{E}_C + \dot{E}_A \left[\frac{1 - \alpha}{2 + \alpha} + j3\alpha \frac{(r_{0*} - r_{1*})}{(2 + \alpha)^2} \right], \quad (2.8)$$

где $\alpha = \frac{x_0}{x_1}$.

Как видно из (2.7), (2.8) и из векторных диаграмм (рис. 2.2, а), при неучете активных сопротивлений ($r_{1*} = r_{0*} = 0$) напряжения на неповрежденных фазах равны. Влияние активных сопротивлений имеет место только при $r_{0*} \neq r_{1*}$ и проявляется в том, что напряжение на одной из неповрежденных фаз увеличивается, а на другой уменьшается по сравнению со случаем $r_{1*} = r_{0*} = 0$. Абсолютное значение напряжения на неповрежденной фазе можно определить по векторной диаграмме рис. 2.2, б.

$$\begin{aligned} U_B &= E_A \sqrt{\left[\frac{1}{2} - \frac{1 - \alpha}{2 + \alpha} \right]^2 + \left[0,866 - \frac{3\alpha(r_{0*} - r_{1*})}{(2 + \alpha)^2} \right]^2}, \\ U_C &= E_A \sqrt{\left[\frac{1}{2} - \frac{1 - \alpha}{2 + \alpha} \right]^2 + \left[0,866 + \frac{3\alpha(r_{0*} - r_{1*})}{(2 + \alpha)^2} \right]^2}. \end{aligned} \quad (2.9)$$

Отношение напряжения на неповрежденных фазах к номинальному напряжению сети называется коэффициентом заземления K_3

$$K_3 = \frac{U_{\text{неп.Ф}}}{U_{\text{ном}}}, \quad (2.10)$$

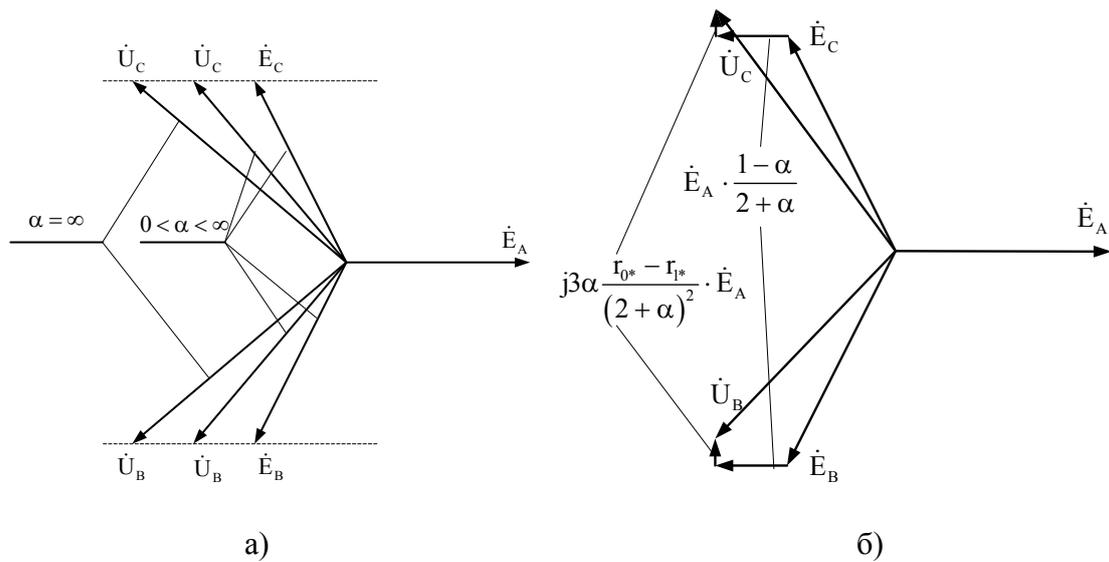


Рис. 2.2. Векторные диаграммы напряжений при замыкании одной фазы на землю
 а – при $r_{1*} = r_{0*} = 0$,
 б – при $r_{1*} \neq 0, r_{0*} \neq 0, r_{0*} > r_{1*}$

Причем в (2.10) принимается напряжение той неповрежденной фазы, на которой оно наибольшее (в данном случае напряжение U_c).

Напряжение на неповрежденной фазе должно определяться по (2.9) при условии того, что рабочее напряжение до замыкания на землю на 5% выше номинального [9]. Зависимость коэффициента заземления от параметра $\alpha = x_0/x_1$ при различных условиях приведена на рис. 2.3 (напряжение отнесено к номинальному фазному напряжению).

Наибольшие значения K_3 имеют место при учете активных сопротивлений и рабочем напряжении $U_{\text{раб}} = 1,05U_{\text{ном}}$. При таких условиях, как видно по рис. 2.3, заземление нейтрали является эффективным, если

$\alpha = 3,4$. Учет активных сопротивлений, а также учет возможности увеличения рабочего напряжения на 5% оказывает существенное влияние на выбор величины α , при которой обеспечивается эффективное заземление нейтрали. Для иллюстрации этого обстоятельства определим K_3 при $r_{0*} = r_{1*} = 0$ и при $U_{\text{раб}} = U_{\text{ном}}$. Соответствующая зависимость также приведена на рис. 2.3. Как видно, при этом можно прийти к заключению, что эффективное заземление получается при $\alpha = 5$.

Напряжение на неповрежденных фазах при однофазном коротком замыкании оказывает влияние на выбор грозозащитных разрядников.

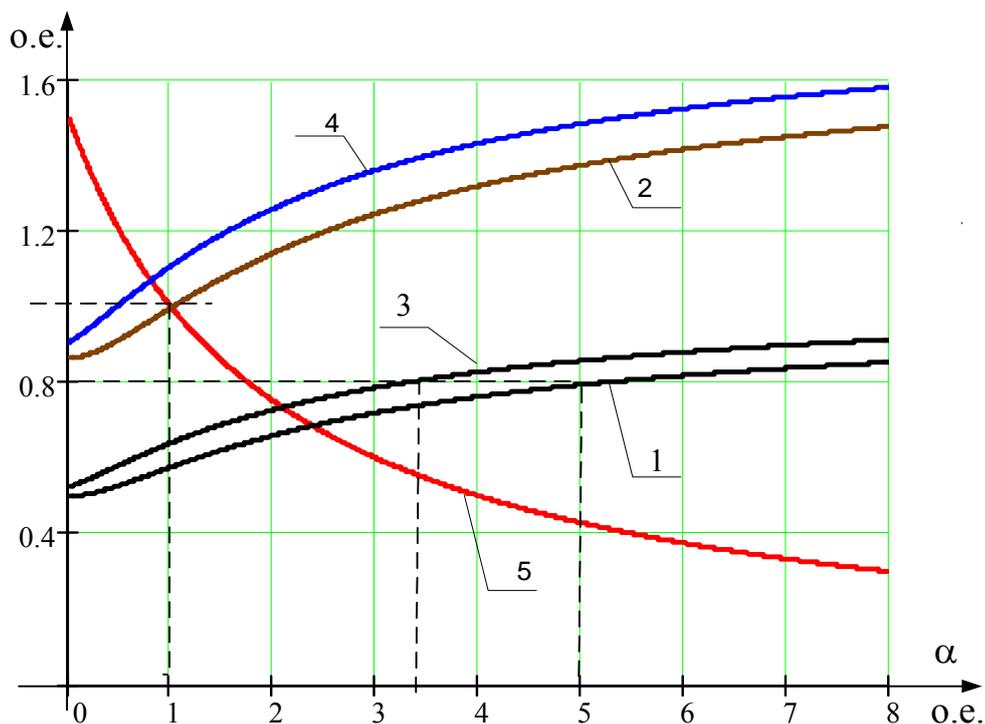


Рис. 2.3. Зависимость электрических величин при однофазном замыкании от α при различных условиях:

- 1, 2 – соответственно коэффициент заземления и напряжение на неповрежденной фазе при $r_{1*} = r_{0*} = 0$ и $U_{\text{раб}} = U_{\text{ном}}$;
- 3, 4 – соответственно коэффициент заземления и напряжение на неповрежденной фазе при $r_{0*} - r_{1*} = 0,2$ и $U_{\text{раб}} = 1,05U_{\text{ном}}$;
- 5 – отношение тока однофазного короткого замыкания к току трехфазного КЗ при $r_{1*} = r_{0*} = 0$ и $U_{\text{раб}} = U_{\text{ном}}$

При эффективном заземлении нейтрали применяются разрядники, которые принято называть 80%-ными разрядниками. В том случае, если напряжение на неповрежденных фазах превышает 0,8 номинального, заземление считается неэффективным и для таких систем применяется 115%-ный разрядник в соответствии с возможным напряжением на неповрежденных фазах при замыкании на землю [10]. Возможность применения грозозащитных разрядников при эффективном заземлении нейтрали на пониженное напряжение дает существенную экономию в изоляции. Из-за этого эффективное заземление нейтрали применяется при высоких напряжениях, когда стоимость изоляции составляет значительную часть стоимости оборудования.

Важное практическое значение имеет соотношение между токами однофазного и трехфазного короткого замыкания при различных значе-

ниях α . При неучете активных сопротивлений ток однофазного короткого замыкания из (2.3)

$$I_K^{(1)} = \frac{3E_A}{2x_1 + x_0}.$$

Ток трехфазного короткого замыкания равен

$$I_K^{(3)} = \frac{E_A}{x_1}.$$

Отношение этих токов (рис. 2.3)

$$\frac{I_K^{(1)}}{I_K^{(3)}} = \frac{3x_1}{2x_1 + x_0} = \frac{3}{2 + \alpha}. \quad (2.11)$$

Важно отметить, что при $\alpha < 1$, $I_K^{(1)} > I_K^{(3)}$. Такой режим, когда $I_K^{(1)} > I_K^{(3)}$ нежелателен, так как в этом случае электрооборудование (выключатели, разъединители и др.) должно выбираться по току $I_K^{(1)}$, большему чем $I_K^{(3)}$, что может привести к увеличению затрат на сооружение электроустановок.

Заземлением определенной части трансформаторов принципиально можно создать в электрической сети такой режим нейтрали, что при однофазном коротком замыкании одновременно будут выполняться условия $K_3 \leq 0,8$ и $I_K^{(1)} < I_K^{(3)}$, то есть $1 < \alpha < 3$.

Однако имеется ряд факторов, которые не позволяют в электрической системе заземлять нейтрали трансформаторов исходя только из условия обеспечения желательного электрического режима при однофазном коротком замыкании.

Таковыми факторами являются:

1. Изоляция нейтрали силовых трансформаторов по экономическим соображениям выполняется пониженной. Трансформаторы напряжением 110 кВ, изготовленные до 1968 года, имеют изоляцию нейтрали класса 35 кВ, одноминутное испытательное напряжение которой равно 85 кВ. У трансформаторов, выпускаемых после 1968 года, изоляция нейтрали усилена и имеет одноминутные испытательные напряжения соответственно для номинальных напряжений 110, 150 и 220 кВ – 100, 130 и 200 кВ [10, 11].

Поэтому трансформаторы в электрических сетях до 220 кВ включительно разрешается не заземлять при условии установки между нейтралью и землей соответствующего разрядника.

Испытательные напряжения нейтрали трансформаторов 330 кВ и выше не нормируются, поэтому нейтрали этих трансформаторов должны заземляться обязательно.

2. Нейтрали автотрансформаторов должны заземляться обязательно независимо от напряжения, так как в противном случае при однофазном замыкании на землю в сети высшего напряжения может иметь место недопустимое повышение напряжения на фазах в сети более низкого напряжения.
3. На электростанциях трансформаторы желательно держать заземленными во избежание работы с незаземленной нейтралью в случае отделения электростанции от системы.
4. На подстанциях понизительные трансформаторы при отсутствии указанных выше ограничений желательно не заземлять, так как при этом улучшаются условия работы защиты от однофазных коротких замыканий.

Необходимость выполнения перечисленных дополнительных условий заземления нейтралей трансформаторов может привести к тому, что условие $\alpha > 1$ не будет выполнено и, следовательно, ток однофазного короткого замыкания может стать больше тока трехфазного короткого замыкания.

Ограничение тока однофазного короткого замыкания с одновременным сохранением напряжений на нейтралях трансформаторов не выше допустимого может быть достигнуто путем заземления большего числа трансформаторов, но не наглухо, а через реакторы или резисторы. Такой способ заземления нейтрали является хорошим решением вопроса выбора режима нейтрали, особенно в сетях 330 кВ и выше. Однако переход к заземлению нейтрали через реакторы или резисторы в сетях этого класса напряжения требует очень больших затрат.

Противоречивые требования необходимости ограничения тока однофазного тока короткого замыкания и ограничения напряжения на нейтрали у незаземленных трансформаторов совмещаются путем установки между нейтралью и землей разрядников.

Возможные схемы цепи нейтралей трансформаторов для сетей 110, 220 кВ показаны на рис. 2.4 [10].

Нейтраль трансформаторов может быть либо глухо заземлена, либо разземлена. В последнем случае изоляция нейтрали защищается от перенапряжений вентильным разрядником. Рекомендуется в зависимости от номинального напряжения применять разрядники, приведенные в таблице 2.1.

Номинальное Напряжение	Разрядник
110 кВ	PBM – 35 + PBM – 20
150 кВ	PBC – 60
220 кВ	PBC – 110

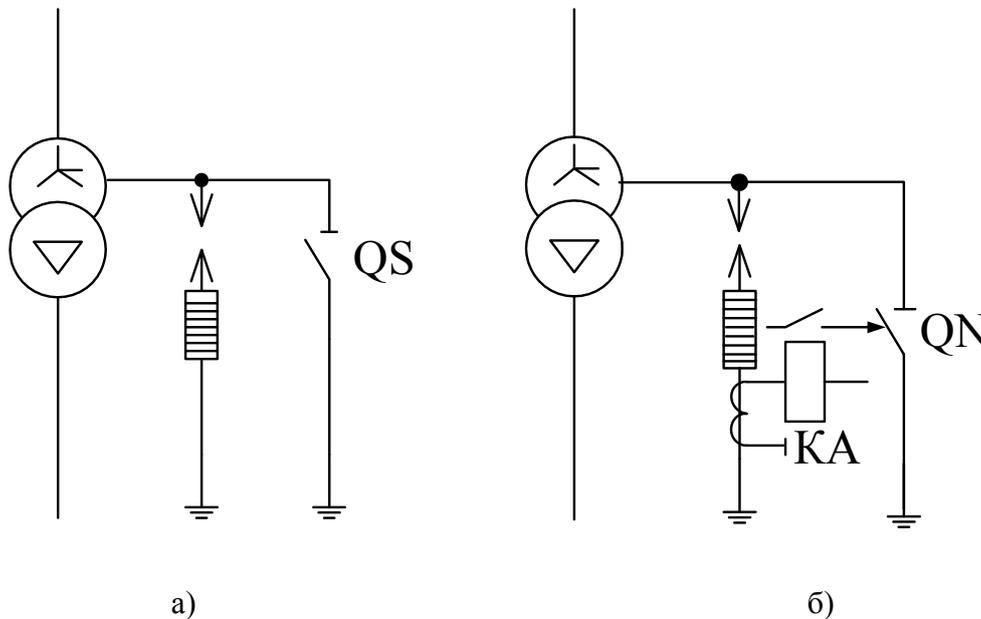


Рис. 2.4. Схемы заземления трансформаторов:

а – типовая схема;

б – схема с автоматическим шунтированием разрядника

Для повышения надежности работы разрядника в схеме (рис. 2.4, а) он должен быть рассчитан на сопровождающий ток короткого замыкания. Предложен ряд схем, которые позволяют автоматически изменять значение или характер сопротивления в нейтрали в зависимости от режима работы системы [10]. Примером такой схемы является схема, показанная на рис. 2.4, б. При появлении в цепи разрядника сопровождающего тока, близкого к предельному току для данного разрядника, подается команда на включение быстродействующего короткозамыкателя, шунтирующего разрядник.

3. СЕТИ С ИЗОЛИРОВАННОЙ НЕЙТРАЛЬЮ

3.1. Сети с изолированной нейтралью в нормальном режиме

В сетях с изолированной нейтралью провода трехфазной системы связаны с землей через емкости и активные сопротивления изоляции, распределенные по длине линий. На рис. 3.1 приведена схема замещения незаземленной сети без нагрузки. Схема замещения включает источник

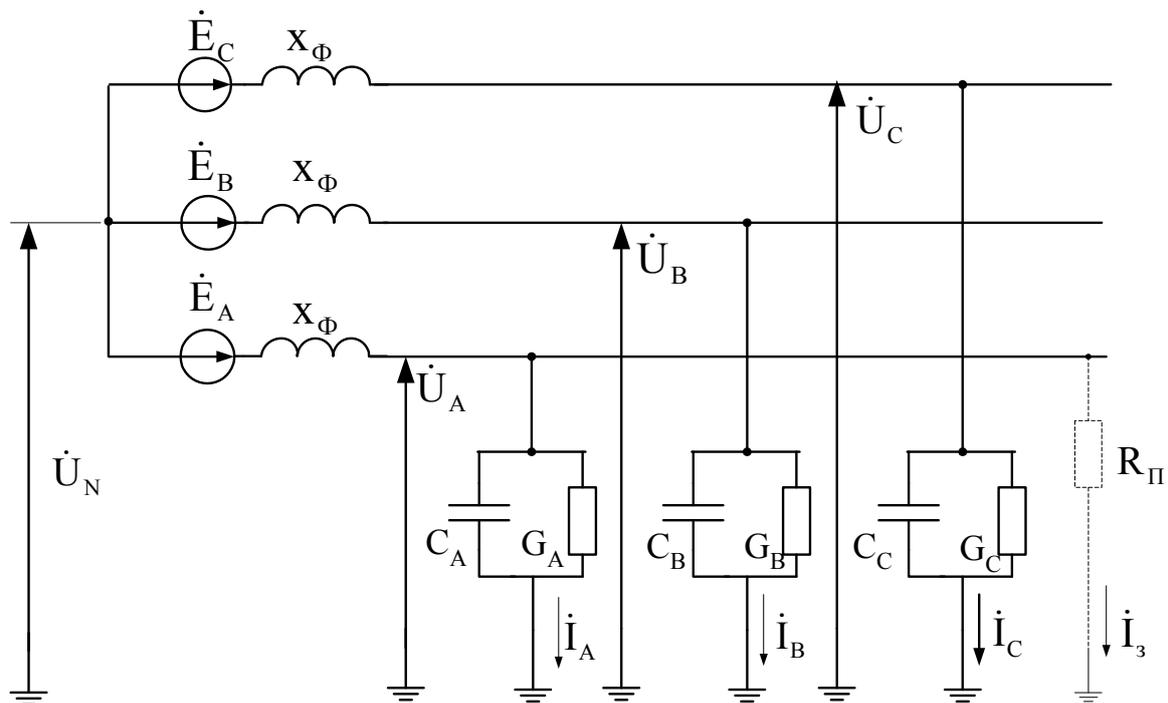


Рис. 3.1. Схема замещения сети с изолированной нейтралью

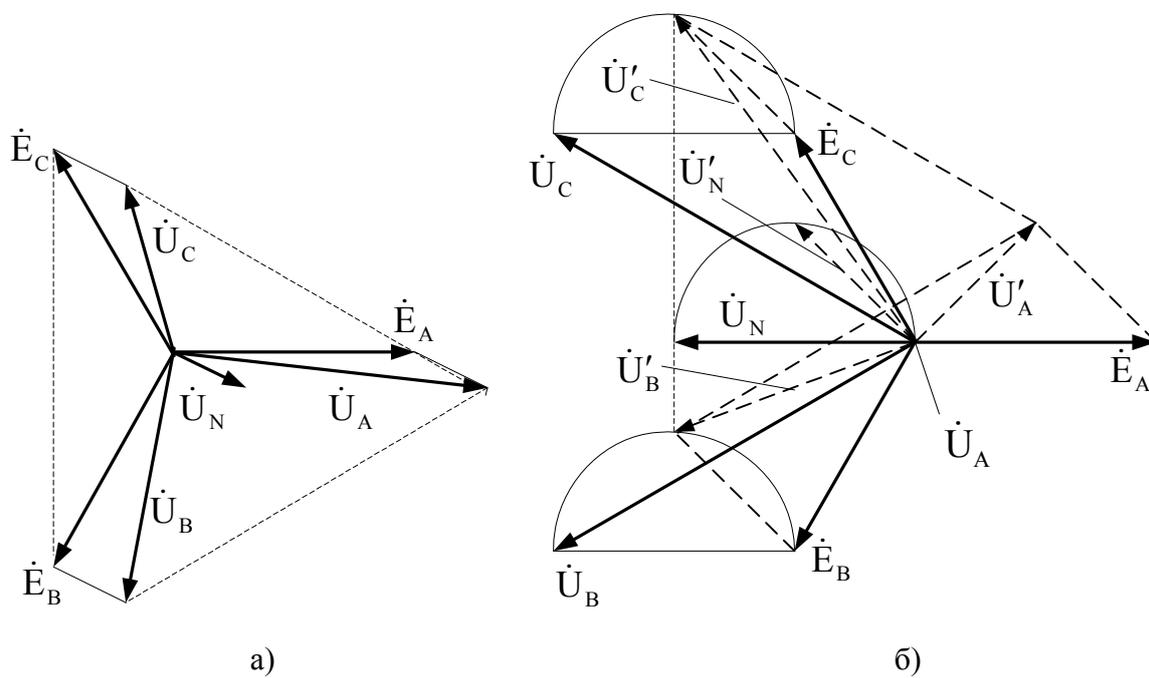


Рис. 3.2. Векторные диаграммы напряжений
 а – для нормального режима при $U_N \neq 0$;
 б – при замыкании фазы А на землю

питания, эквивалентную линию, емкости фаз (C_A, C_B, C_C) и активные проводимости (G_A, G_B, G_C), которые приняты сосредоточенными, что вполне допустимо в области частот, которую занимают, рассматриваемые далее процессы. Внутреннее сопротивление источника питания и продольные сопротивления линий сети намного меньше, чем сопротивления фаз относительно земли, поэтому при устойчивых замыканиях ими также можно пренебречь.

При принятых допущениях можно записать

$$\dot{I}_A = (\dot{E}_A + \dot{U}_N) \underline{Y}_A, \quad \dot{I}_B = (\dot{E}_B + \dot{U}_N) \underline{Y}_B, \quad \dot{I}_C = (\dot{E}_C + \dot{U}_N) \underline{Y}_C,$$

где \dot{U}_N – напряжение на нейтрали относительно земли,

$\dot{E}_A = \dot{E}_\Phi$, $\dot{E}_B = a^2 \dot{E}_\Phi$, $\dot{E}_C = a \dot{E}_\Phi$ – э.д.с. источника питания;

$\underline{Y}_A = G_A + j\omega C_A$; $\underline{Y}_B = G_B + j\omega C_B$; $\underline{Y}_C = G_C + j\omega C_C$;

ω – круговая частота промышленного тока. При отсутствии замыкания на землю сумма токов $\dot{I}_A, \dot{I}_B, \dot{I}_C$ равна нулю, то есть

$$(\dot{E}_A + \dot{U}_N) \underline{Y}_A + (\dot{E}_B + \dot{U}_N) \underline{Y}_B + (\dot{E}_C + \dot{U}_N) \underline{Y}_C = 0.$$

Решив это уравнение относительно \dot{U}_N , получим

$$\dot{U}_N = -\dot{E}_\Phi \left(\frac{G_A + a^2 G_B + a G_C}{\underline{Y}_A + \underline{Y}_B + \underline{Y}_C} + j\omega \frac{C_A + a^2 C_B + a C_C}{\underline{Y}_A + \underline{Y}_B + \underline{Y}_C} \right). \quad (3.1)$$

Так как $1 + a^2 + a = 0$, то напряжение \dot{U}_N , как следует из (3.1), не равно нулю только в том случае, если проводимости $\underline{Y}_A, \underline{Y}_B, \underline{Y}_C$ не равны между собой, то есть нарушена симметрия фаз сети. Абсолютное значение напряжения U_N , имеющее место в нормальном режиме работы сети называют напряжением смещения нейтрали. Представим (3.1) в следующем виде

$$\dot{U}_N = -E_\Phi \left(\frac{G_A + a^2 G_B + a G_C + j\omega (C_A + a^2 C_B + a C_C)}{G_\Sigma + j\omega C_\Sigma} \right),$$

где $G_\Sigma = G_A + G_B + G_C$; $C_\Sigma = C_A + C_B + C_C$.

Далее, разделив числитель и знаменатель полученного выражения на ωC_Σ , получим

$$\dot{U}_N = -E_\Phi \left(\frac{\bar{b}_G + j\bar{b}_C}{d + j} \right),$$

где $\bar{b}_G = \frac{G_A + a^2 G_B + a G_C}{\omega C_\Sigma}$ – коэффициент несимметрии активных проводимостей фаз сети;

$\bar{b}_C = \frac{C_A + a^2 C_B + a C_C}{C_\Sigma}$ – коэффициент емкостной несимметрии сети;

$d = \frac{G_\Sigma}{\omega C_\Sigma}$ – относительная суммарная активная проводимость фаз сети относительно земли.

В нормальном состоянии электрической сети активной проводимости фаз относительно земли намного меньше емкостных проводимостей ($\bar{b}_G \ll \bar{b}_C$) и поэтому практически абсолютная величина напряжения смещения нейтрали равна

$$U_{Ncm} = E_\Phi \frac{\alpha_C}{\sqrt{d^2 + 1}}, \quad (3.2)$$

В кабельных сетях коэффициент несимметрии, а, следовательно, и U_{Ncm} , пренебрежимо малы, так как фазы кабеля расположены симметрично относительно его брони. В воздушных сетях емкости C_A , C_B , C_C не строго одинаковы даже при транспонировании проводов. Поэтому для них коэффициент несимметрии равен $0,005 \div 0,02$. Наличие на нейтрали напряжения \dot{U}_N (рис. 3.2, а) приводит к тому, что напряжения фаз относительно земли становятся неравными по величине и угол сдвига между ними отличается от 120 электрических градусов. Токи \dot{I}_A , \dot{I}_B , \dot{I}_C , определяемые проводимостями фаз сети, также образуют несимметричную звезду.

3.2. Режим устойчивого замыкания на землю

В незаземленных сетях замыкания на землю могут быть устойчивыми или дуговыми. Устойчивые замыкания в свою очередь разделяют на металлические замыкания и замыкания через переходное сопротивление, которое обозначим $R_{п}$. Этим сопротивлением может быть сопротивление тлеющей изоляции, сопротивление растеканию тока в земле.

Рассмотрим режим устойчивого замыкания фазы А. Для этого режима справедливо соотношение

$$(\dot{E}_A + \dot{U}_N)G_{\Pi} + (\dot{E}_A + \dot{U}_N)\underline{Y}_A + (\dot{E}_B + \dot{U}_N)\underline{Y}_B + (\dot{E}_C + \dot{U}_N)\underline{Y}_C = 0, \quad (3.3)$$

где $G_{\Pi} = \frac{1}{R}$ – проводимость в месте замыкания.

Решив (3.3) относительно \dot{U}_N , получим

$$\dot{U}_N = -\dot{E}_{\Phi} \left(\frac{G_{\Pi}}{\underline{Y}_A + \underline{Y}_B + \underline{Y}_C + G_{\Pi}} + \frac{\underline{Y}_A + a^2 \underline{Y}_B + a \underline{Y}_C}{\underline{Y}_A + \underline{Y}_B + \underline{Y}_C + G_{\Pi}} \right).$$

При определении напряжения на нейтрали в режиме однофазного замыкания можно пренебречь возможной несимметрией фаз сети, то есть считать $\underline{Y}_A = \underline{Y}_B = \underline{Y}_C = \underline{Y}_{\Phi}$. При этом

$$\frac{\underline{Y}_A + a^2 \underline{Y}_B + a \underline{Y}_C}{\underline{Y}_A + \underline{Y}_B + \underline{Y}_C + G_{\Pi}} = 0.$$

Следовательно,

$$\dot{U}_N = -\dot{E}_{\Phi} \frac{G_{\Pi}}{3\underline{Y}_{\Phi} + G_{\Pi}}. \quad (3.4)$$

Преобразуем (3.4) к виду

$$\dot{U}_N = -\dot{E}_{\Phi} \frac{1}{1 + R_{\Pi}(3G_{\Phi} + 3j\omega C_{\Phi})}, \quad (3.5)$$

где $G_{\Phi} = G_A = G_B = G_C$, $C_{\Phi} = C_A = C_B = C_C$.

Отношение абсолютного значения напряжения на нейтрали по (3.5) к его значению при $R_{\Pi} = 0$ принято называть коэффициентом полноты замыкания

$$\beta = \frac{1}{\sqrt{(1 + 3G_{\Phi}R_{\Pi})^2 + (3\omega C_{\Phi}R_{\Pi})^2}}.$$

Из (3.5) следует, что напряжение на нейтрали увеличивается по мере уменьшения сопротивления в месте повреждения. При $R_{\Pi} = 0$ напряжение на нейтрали имеет максимальное значение, равное фазной э.д.с. Напряжения фаз относительно земли при однофазном замыкании могут быть определены следующим образом:

– напряжение фазы А

$$\dot{U}_A = \dot{U}_N + \dot{E}_A = \dot{E}_\Phi \frac{3G_\Phi R_\Pi + 3j\omega C_\Phi R_\Pi}{1 + 3G_\Phi R_\Pi + 3j\omega C_\Phi R_\Pi}; \quad (3.6)$$

– напряжения неповрежденных фаз В и С

$$\begin{aligned} \dot{U}_B = \dot{U}_N + \dot{E}_B = \dot{E}_\Phi \frac{a^2(1 + 3G_\Phi R_\Pi + 3j\omega C_\Phi R_\Pi) - 1}{1 + 3G_\Phi R_\Pi + 3j\omega C_\Phi R_\Pi}; \\ \dot{U}_C = \dot{U}_N + \dot{E}_C = \dot{E}_\Phi \frac{a(1 + 3G_\Phi R_\Pi + 3j\omega C_\Phi R_\Pi) - 1}{1 + 3G_\Phi R_\Pi + 3j\omega C_\Phi R_\Pi}. \end{aligned} \quad (3.7)$$

Векторная диаграмма напряжений при замыкании фазы А на землю представлена на рис. 3.2, б. Как видно из диаграммы и из соотношений (3.5) – (3.8), при $R_\Pi = 0$ (векторы проведены сплошными линиями) напряжение нейтрали по абсолютному значению равно фазной э.д.с., а напряжения неповрежденных фаз относительно земли равны междуфазному напряжению ($\sqrt{3}E_\Phi$).

По мере увеличения сопротивления в месте замыкания напряжение нейтрали уменьшается. При этом конец вектора \dot{U}_N перемещается по полуокружности. Векторы напряжений неповрежденных фаз, равные сумме векторов соответствующих фаз ЭДС и напряжения нейтрали, так же скользят по полуокружностям. На диаграмме пунктиром показано положение векторов для случая, когда сопротивление в месте замыкания равно суммарному емкостному сопротивлению сети относительно земли $R_\Pi = 1/3\omega C_\Phi$. Треугольник междуфазных напряжений остается неизменным, то есть замыкание фазы на землю не влияет на работу присоединенных приемников энергии.

На рис.3.3 показано как изменяются напряжения на нейтрали и фазах сети при изменении сопротивления в месте замыкания, выраженного в долях от эквивалентного емкостного сопротивления сети относительно земли $R_{\Pi*} = R_\Pi 3\omega C$. Все напряжения также представлены в относительных единицах при базисном напряжении, равном E_Φ .

Кривые на рис. 3.3 построены на основе формул (3.5) – (3.7). При этом принято, что активное сопротивление изоляции фаз бесконечно велико, то есть $G_\Phi = 0$. Из рис. 3.3 следует, что при некотором значении $R_{\Pi*}$ напряжение на одной из неповрежденных фаз может несколько превысить линейное напряжение.

Далее определим ток в месте замыкания. Согласно схеме на рис. 3.1

$$\begin{aligned} \dot{I}_3 &= -\dot{I}_A - \dot{I}_B - \dot{I}_C = -(\dot{E}_A + \dot{U}_N)Y_\Phi - (\dot{E}_B + \dot{U}_N)Y_\Phi - (\dot{E}_C + \dot{U}_N)Y_\Phi = \\ &= -(\dot{E}_A + \dot{E}_B + \dot{E}_C + 3\dot{U}_N)Y_\Phi. \end{aligned} \quad (3.8)$$

В (3.8) подставим \dot{U}_N по (3.5) и учтем, что $\dot{E}_A + \dot{E}_B + \dot{E}_C = 0$. В результате получим

$$\dot{I}_3 = \frac{\dot{E}_\Phi}{R_\Pi + \frac{1}{3G_\Phi + 3j\omega C_\Phi}}. \quad (3.9)$$

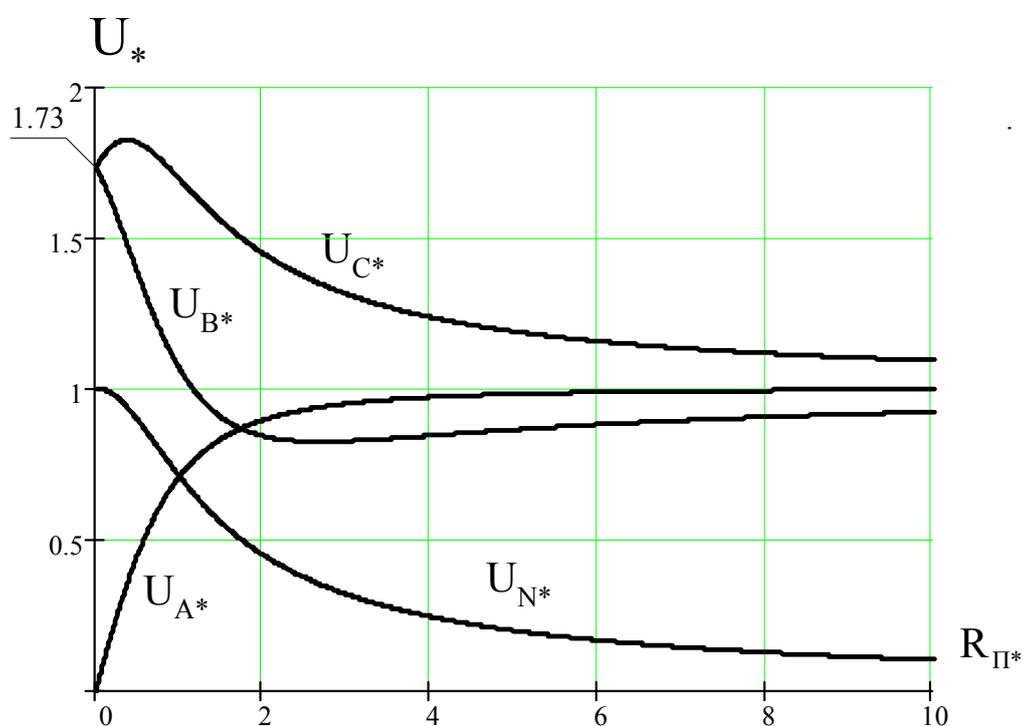


Рис. 3.3. Напряжения на нейтрали и фазах сети

Формуле (3.9) соответствует схема замещения нулевой последовательности, приведенная на рис. 3.4. На рис. 3.5 показано, как изменяется модуль относительного значения тока замыкания $I_{3*} = \frac{I}{I_{3R=0}}$ в зависимости от $R_{\Pi*}$. Здесь $I_{3R=0}$ – ток замыкания при $R_\Pi = 0$.

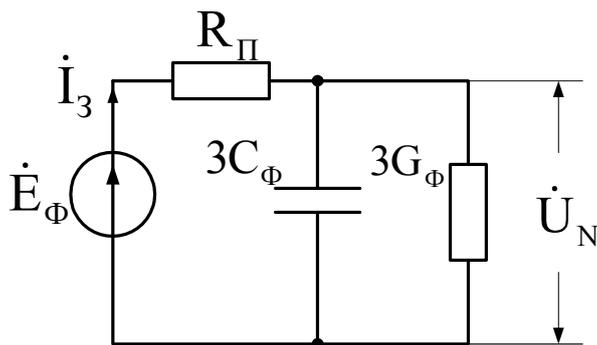


Рис. 3.4. Схема замещения нулевой последовательности сети с замкнутой на землю фазой

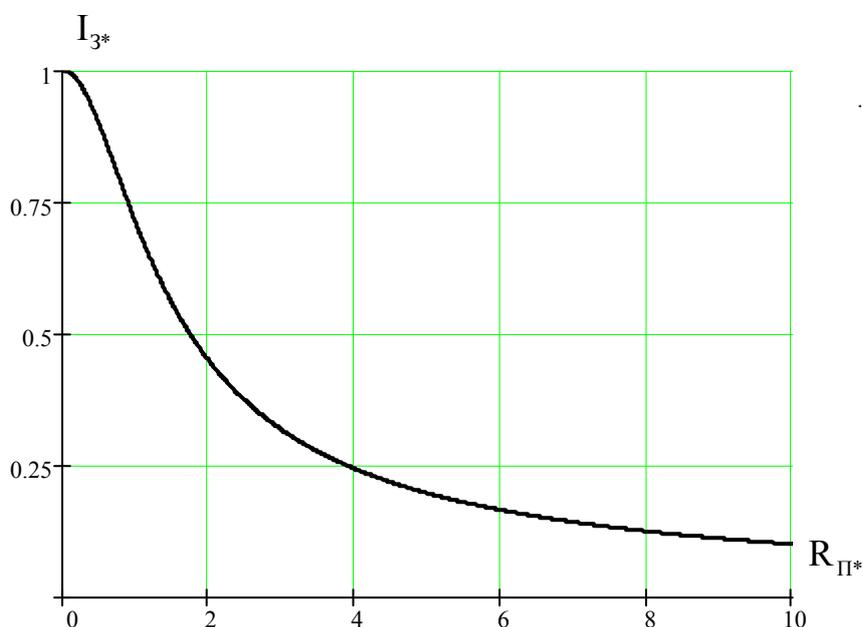


Рис. 3.5. Ток замыкания

Ток замыкания \dot{I}_3 может быть представлен в виде суммы двух составляющих: емкостной \dot{I}_c и активной \dot{I}_a . В качестве величин, характеризующих параметры конкретной сети, используются эти токи при металлическом замыкании ($R_{II} = 0$)

$$\dot{I}_{3R=0} = \dot{E}_\Phi 3j\omega C_\Phi + \dot{E}_\Phi 3G_\Phi = \dot{I}_c + \dot{I}_a.$$

Используя введенное ранее относительное значение суммарной активной проводимости фаз сети (d), абсолютное значение тока замыкания при $R_{II} = 0$ можно выразить следующим образом

$$I_{3R=0} = E_\Phi 3\omega C_\Phi \sqrt{1 + d^2}.$$

3.3. Режим дугового замыкания на землю

3.3.1. Общие сведения о дуге переменного тока

Для изучения электрических процессов при дуговых замыканиях, в частности с целью выявления возможных перенапряжений, необходимо принять некоторую модель дугового замыкания в соответствующих схемах замещения электрической сети.

Электрическая дуга – это сильно ионизированный столб газа, ставший проводящим под влиянием высокой температуры. Высокая проводимость ствола дуги, близкая к проводимости металлов, объясняется главным образом термической ионизацией, то есть распадом молекул газа на электроны и ионы вследствие высокой температуры. Наряду с ионизацией в плазме идут процессы деионизации, а именно рекомбинация и диффузия ионов и электронов.

Если скорость ионизации равна скорости деионизации, то дуга будет устойчивой. Если какой-то из процессов преобладает, дуга будет неустойчивой.

Для решения задачи моделирования дуги в электрической схеме замещения необходимо учитывать динамическую вольтамперную характеристику дуги, которая имеет место при переменном токе (рис. 3.6).

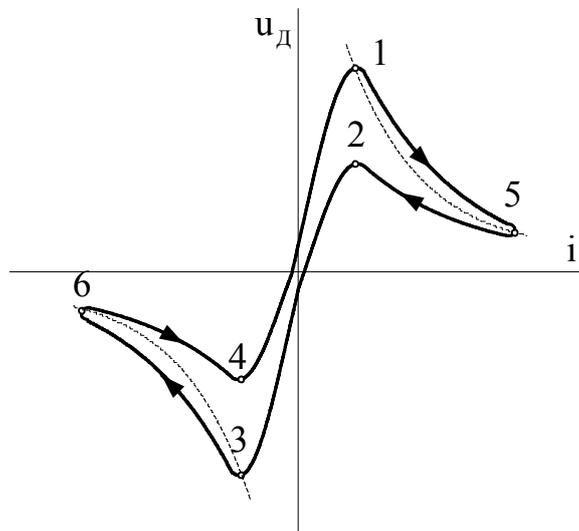


Рис. 3.6. Динамическая вольтамперная характеристика дуги

Как видно, на участках 1 – 5, 5 – 2, 3 – 6, 6 – 4 дуговой промежуток имеет отрицательное сопротивление. Это объясняется тем, что «... температура газа дугового столба играет весьма значительную роль в процессах ионизации и деионизации дуговой плазмы, так как при спаде температуры образование новых ионов в дуговом столбе резко уменьшается и усиливается деионизация ранее образовавшихся» [12, стр. 19].

В этой же работе [12] имеются данные, показывающие, что температура газа и диаметр дугового столба дуги переменного тока следуют за изменением тока с некоторым небольшим запаздыванием, которое тем меньше, чем интенсивнее внешние деионизирующие факторы, например, скорость воздушного потока при открытой дуге. Совокупность отмеченных обстоятельств приводит к резкому повышению проводимости дугового столба с ростом тока и понижению проводимости с уменьшением тока.

На участках 2 – 3 и 1 – 4 термическая ионизация резко снижается, проводимость столба дуги уменьшается быстрее, чем снижается ток, особенно при наличии факторов, способствующих интенсивной деионизации.

Вид зависимости напряжения на дуге при изменении тока в функции времени при таких условиях показан на рис. 3.7.

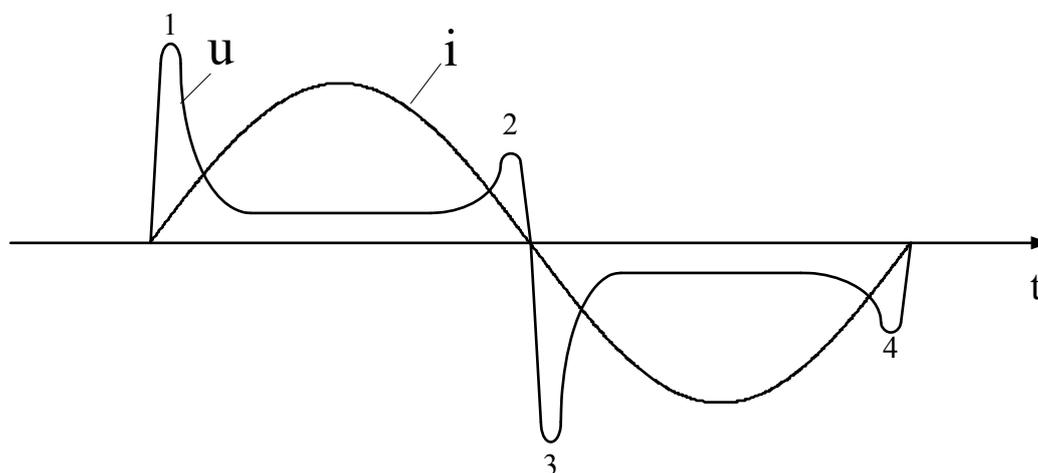


Рис. 3.7. Зависимость напряжения на дуге от времени

При подходе тока к нулю дуговой столб представляет собой весьма тонкий шнур, который способен разрушиться в очень короткий отрезок времени (несколько десятков микросекунд). В таких условиях дуга каждый полупериод как бы гасится и зажигается. При интенсивной деионизации напряжение на дуге в начале полупериода образует резко выраженный пик. Наличие такого пика указывает на то, что во время прохождения тока через нуль дуговой столб приобрел значительную электрическую прочность. Процессы, имеющие место при прохождении тока через нуль, имеют первостепенное значение с точки зрения ее угасания, поэтому рассмотрим подробнее их физическую сущность.

При каждом прохождении тока через нуль дуговой промежуток приобретает большую или меньшую электрическую прочность (в зависимости от условий деионизации), но вместе с этим на промежутке устанавливается напряжение, определяемое электрическими процессами в сети. На-

ступит ли погасание дуги или дуга загорится вновь зависит от того, что быстрее восстанавливается – электрическая прочность промежутка или напряжение на нем.

Графическое пояснение сказанного представлено на рис. 3.8, где цифрой 1 обозначена кривая восстановления напряжения на промежутке после прохождения тока через нуль, а кривые 2 и 3 представляют различные случаи восстановления электрической прочности промежутка. При восстановлении электрической прочности по кривой 2 возникает повторное зажигание дуги в момент времени t_1 , а при восстановлении по кривой 3 повторного зажигания дуги не происходит.

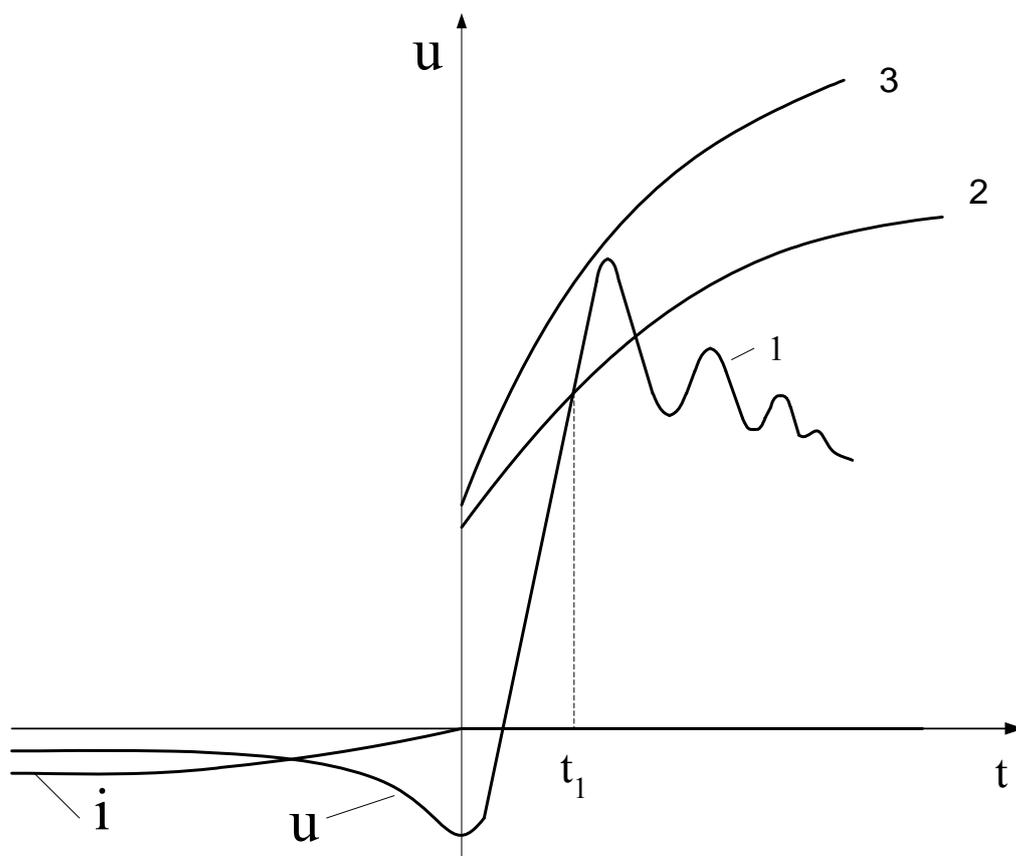


Рис. 3.8. Возможное взаимное расположение кривых восстанавливающегося напряжения и электрической прочности промежутка

Так как суммарное напряжение на дуге в течение полного полупериода изменения тока сравнительно мало, а процесс гашения дуги в окрестностях нулевого значения тока происходит в течение весьма малого времени, то дуговой промежуток в схемах замещения можно представить приближенно в виде идеального ключа, который замыкается при достижении напряжением значения, равного пробивному, а размыкается при прохождении тока через нуль.

Важно обратить внимание на то, что вследствие тепловой инерции дугового столба условия погасания дуги при подходе тока к нулевому значению зависят от скорости изменения тока или от его частоты. Следовательно, при высокой частоте погасания дуги можно ожидать лишь при наличии условий достаточно сильной деионизации, а при низкой частоте – при слабой деионизации.

Как будет видно из дальнейшего, ток в месте замыкания (в дуге) на разных стадиях процесса может иметь частоты, отличающиеся в десятки раз.

Так как интенсивность деионизации дуги в месте замыкания имеет случайный характер, то необходимо учитывать, что дуга может гаснуть как при проходе тока через нуль на стадии, когда ток имеет высокую частоту, так и на стадии, когда его частота более низкая.

3.3.2 Переходные процессы при пробое фазы на землю и обрыве дуги

В сетях с изолированной нейтралью могут иметь место как устойчивые, так и перемежающиеся заземляющие дуги. Характер дуги зависит от величины тока замыкания и конкретных условий, в которых она возникла. Замыкание через устойчивую дугу эквивалентно замыканию через небольшое активное сопротивление. Перемежающейся называется дуга, в процессе горения которой имеют место следующие друг за другом пробои дугового промежутка (зажигания дуги) и погасания дуги. Перемежающаяся дуга вызывает переходные процессы, возникающие при каждом зажигании и погасании дуги. Переходный процесс после каждого очередного погасания дуги обуславливает начальные условия переходного процесса при следующем зажигании дуги. Определенное сочетание условий горения дуги и параметров сети могут привести к возникновению значительных перенапряжений.

Рассмотрим характер переходных процессов при пробое изоляции (например фазы А) на землю и последующем обрыве дуги, используя упрощенную схему трехфазной симметричной сети с изолированной нейтралью (рис. 3.9), в которой полагаем

$$C_A = C_B = C_C = C_\Phi, \quad C_{AB} = C_{BC} = C_{AC} = C_{M\Phi}, \quad L_A = L_B = L_C = L_\Phi \quad (3.10)$$

где $C_{M\Phi}$ и C_Φ – междуфазная и фазная емкости,

L_Φ – эквивалентная индуктивность источника питания, определяющая вместе с другими параметрами количественные характеристики переходных процессов.

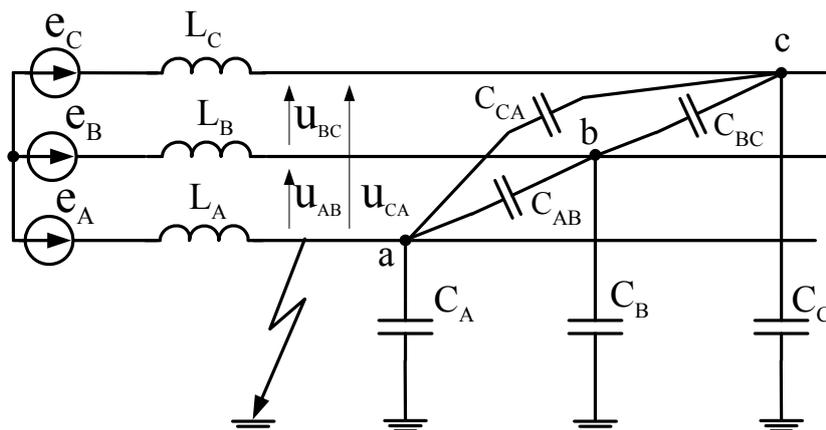


Рис. 3.9. Схема замещения сети с изолированной нейтралью

Для упрощения анализа переходного процесса также сделаем следующие допущения. Во-первых, до момента зажигания дуги будем считать напряжения на фазах равными ЭДС источника. Во-вторых, примем, что постоянная времени переходного процесса разряда емкости поврежденной фазы C_A весьма мала и поэтому напряжение на этой фазе в момент замыкания снижается до нуля практически мгновенно.

Основная цель дальнейшего рассмотрения переходных процессов заключается в том, чтобы выявить условия, при которых на неповрежденных фазах формируются повышенные напряжения.

Напряжения на неповрежденных фазах при устойчивом металлическом замыкании становятся равными междуфазным напряжениям в соответствии с (3.7) и (3.8). Переходный процесс от напряжений нормального режима (начальных напряжений $u_{нач}$) к напряжениям, имеющим место при устойчивом замыкании (принужденным напряжениям $u_{пр}$), в общем случае может иметь характер затухающих колебаний (рис. 3.10).

Этот процесс на фазах В и С с некоторыми допущениями описывается следующими выражениями

$$u_B = u_{Впр} + [u_{Внач}(t_1) - u_{Впр}(t_1)] e^{-\delta_1(t-t_1)} \cos \omega_1(t-t_1), \quad (3.11)$$

$$u_C = u_{Спр} + [u_{Снач}(t_1) - u_{Спр}(t_1)] e^{-\delta_1(t-t_1)} \cos \omega_1(t-t_1), \quad (3.12)$$

где ω_1 – частота свободных колебаний,

δ_1 – коэффициент затухания свободных колебаний.

Величины в квадратных скобках в (3.11), (3.12), равные разностям между начальными и принужденными значениями напряжений на

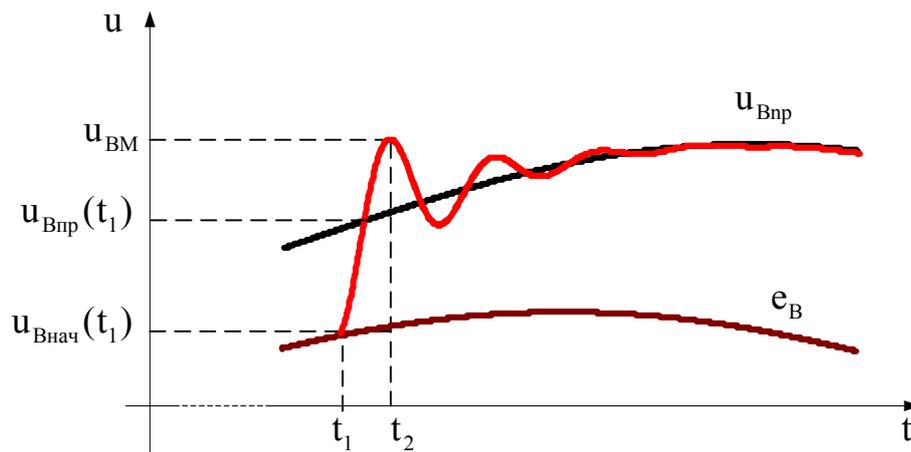


Рис. 3.10. Изменение напряжения на неповрежденной фазе при пробое изоляции (зажигании дуги)

неповрежденных фазах в момент зажигания дуги ($t = t_1$), есть начальные амплитуды свободных колебаний. Через половину периода свободных колебаний $\left(\frac{T_1}{2} = \frac{\pi}{\omega_1}\right)$ в момент времени t_2 мгновенное значение напря-

жения достигает своего максимума $u_{ВМ}$ (рис. 3.10). Задача заключается в том, чтобы, с учетом реальных параметров сети, найти возможное значение этого максимума. На этом этапе рассмотрения вопроса обратим внимание на то, что при прочих равных условиях значение максимума напряжения при переходном процессе зависит, главным образом, от разности между начальным и принужденным значениями напряжений в момент t_1 , от значения принужденного напряжения в момент t_2 и от степени затухания свободных колебаний к моменту t_2 .

При определении максимальных расчетных перенапряжений удобно использовать не коэффициент затухания δ_1 , а коэффициент, равный относительному уменьшению амплитуды за половину периода свободных колебаний, как это предложено в [4]. Так как расчетные перенапряжения при прочих равных условиях тем больше, чем меньше δ_1 , то при принимаемых далее расчетных условиях значение показателя степени экспоненциальной функции в (3.11), (3.12) в момент t_2 при $\delta_1 \ll \omega_1$

$$\delta_1(t_2 - t_1) = \frac{\delta_1 T_1}{2} = \frac{\delta_1}{\omega_1} \pi \ll 1.$$

Поэтому величину $e^{-\frac{\delta_1}{\omega_1} \pi}$ разложением в степенной ряд можно представить в виде

$$e^{-\frac{\delta_1}{\omega_1} \pi} \approx 1 - k_{\delta_1}, \quad (3.13)$$

где $k_{\delta_1} = \frac{\delta_1}{\omega_1} \pi$.

Начальная амплитуда свободных колебаний может быть определена довольно просто, если принять во внимание, что при неучете междуфазных емкостей разность между начальными и принужденными напряжениями на неповрежденных фазах в момент зажигания дуги всегда равна напряжению поврежденной фазы в этот момент времени. Это можно показать следующим образом. В любой момент времени для напряжений на фазах справедливы соотношения

$$\begin{aligned} u_A &= e_A + u_N, \\ u_B &= e_B + u_N, \\ u_C &= e_C + u_N, \end{aligned} \quad (3.14)$$

где u_N – напряжение на нейтрали, которое в общем случае не равно нулю.

В момент зажигания дуги на фазе А (момент t_1) интересующие нас напряжения равны:

– на поврежденной фазе

$$u_A(t_1) = e_A(t_1) + u_N(t_1), \quad (3.15)$$

– принужденные напряжения на неповрежденных фазах

$$\begin{aligned} u_{\text{Впр}}(t_1) &= -u_{\text{АВ}}(t_1) = e_B(t_1) - e_A(t_1), \\ u_{\text{Спр}}(t_1) &= u_{\text{СА}}(t_1) = e_C(t_1) - e_A(t_1), \end{aligned} \quad (3.16)$$

– начальные напряжения на неповрежденных фазах

$$\begin{aligned} u_{\text{Внач}}(t_1) &= e_B(t_1) + u_N(t_1), \\ u_{\text{Снач}}(t_1) &= e_C(t_1) + u_N(t_1). \end{aligned} \quad (3.17)$$

С учетом того, что из (3.15) $u_N(t_1) = u_A(t_1) - e_A(t_1)$, разность между начальными и принужденными напряжениями неповрежденных фаз в момент t_1

$$\begin{aligned} u_{\text{Внач}}(t_1) - u_{\text{Впр}}(t_1) &= u_A(t_1), \\ u_{\text{Снач}}(t_1) - u_{\text{Спр}}(t_1) &= u_A(t_1). \end{aligned} \quad (3.18)$$

Покажем далее, что наличие междуфазных емкостей приводит к некоторому изменению начальной амплитуды свободных колебаний. Как следует из схемы сети (рис. 3.9), при замыкании, например фазы А, емкость фазы В (C_B) соединяется параллельно с междуфазной емкостью (C_{AB}), а емкость фазы С (C_C) – с междуфазной емкостью (C_{CA}). В результате этого начинается быстропротекающий (практически мгновенно) переходный процесс выравнивания напряжений на параллельно соединенных емкостях. Поэтому на неповрежденных фазах напряжения скачкообразно меняются и их новые начальные значения можно определить исходя из того, что суммарный заряд пар емкостей (C_B , C_{AB} и C_C , C_{CA}) не может измениться мгновенно. Непосредственно перед зажиганием дуги суммарный заряд емкостей C_B и C_{AB} равен

$$Q_B = C_B u_B(t_1) + C_{AB} u_{AB}(t_1), \quad (3.19)$$

а емкостей C_C и C_{CA}

$$Q_C = C_C u_C(t_1) + C_{CA} u_{CA}(t_1). \quad (3.20)$$

После зажигания дуги заряды соответственно равны

$$Q_B = u_{Внач}(t_1) \cdot (C_B + C_{AB}), \quad (3.21)$$

$$Q_C = u_{Снач}(t_1) \cdot (C_C + C_{CA}). \quad (3.22)$$

Приравнивая попарно правые части (3.19), (3.21) и (3.20), (3.22), с учетом того, что $u_{AB}(t_1) = u_A(t_1) - u_B(t_1)$ и $u_{CA}(t_1) = u_C(t_1) - u_A(t_1)$, определим начальные значения напряжений на фазах В и С

$$u_{Внач}(t_1) = u_B(t_1) - u_A(t_1) \frac{C_{AB}}{C_B + C_{AB}}, \quad (3.23)$$

$$u_{Снач}(t_1) = u_C(t_1) - u_A(t_1) \frac{C_{CA}}{C_C + C_{CA}}, \quad (3.24)$$

Тогда разность между начальными и принужденными напряжениями равна

$$u_{Внач}(t_1) - u_{Впр}(t_1) = u_A(t_1)(1 - k_C), \quad (3.25)$$

$$u_{Снач}(t_1) - u_{Спр}(t_1) = u_A(t_1)(1 - k_C), \quad (3.26)$$

где $k_C = \frac{C_{AB}}{C_B + C_{AB}} = \frac{C_{CA}}{C_C + C_{CA}} = \frac{C_{МФ}}{C_{Ф} + C_{МФ}}$.

Коэффициент k_C характеризует влияние междуфазных емкостей. Обычно $C_{\text{мф}} = (0,25 \div 0,3)C_{\text{ф}}$, то есть $k_C = (0,2 \div 0,23)$. В расчетах далее принимается $k_C = 0,2$.

Влияние междуфазных емкостей на начальную амплитуду свободных колебаний напряжения неповрежденных фаз показано на рис. 3.11.

Напряжение на поврежденной фазе в момент очередного зажигания дуги в общем случае определяется мгновенным значением ЭДС источника и напряжением на нейтрали. Во время горения дуги $u_A = 0$, поэтому напряжение на нейтрали, как напряжение нулевой последовательности, равно

$$u_N = \frac{1}{3}(u_B + u_C). \quad (3.27)$$

Из (3.27) следует, что характер переходного процесса на нейтрали такой же, как и на неповрежденных фазах, а его интенсивность определяется разностью начального и принужденного напряжений на нейтрали. В момент замыкания в силу соотношения (3.27) напряжение на нейтрали также претерпевает скачок и становится равным

$$u_{\text{Ннач}} = \frac{1}{3}(u_{\text{Внач}} + u_{\text{Снач}}). \quad (3.28)$$

Принужденное напряжение на нейтрали $u_{\text{Нпр}}$, как это следует из (3.15), равно $u_{\text{Нпр}} = -e_A$, а в момент зажигания дуги $u_{\text{Нпр}}(t_1) = -e_A(t_1)$. Следовательно, начальная амплитуда свободных колебаний на нейтрали равна разности $[u_{\text{Ннач}}(t_1) - u_{\text{Нпр}}(t_1)]$.

Для количественной оценки возможных перенапряжений необходимо знать значения частоты свободных колебаний ω_1 и коэффициента затухания δ_1 .

Частоту свободных колебаний ω_1 можно определить по схеме рис. 3.12, которая получена с учетом того обстоятельства, что переходный процесс во время горения дуги в неповрежденных фазах В и С проходит синхронно и точки *b* и *c* по отношению к свободным составляющим можно считать точками равного потенциала.

В результате, с учетом допущения (3.10), схему замещения сети с изолированной нейтралью (рис. 3.9) можно представить как колебательный контур (рис. 3.12), где $R_{\text{экв}}$, $L_{\text{экв}}$ – соответственно эквивалентное активное сопротивление и эквивалентная индуктивность колебательного контура.

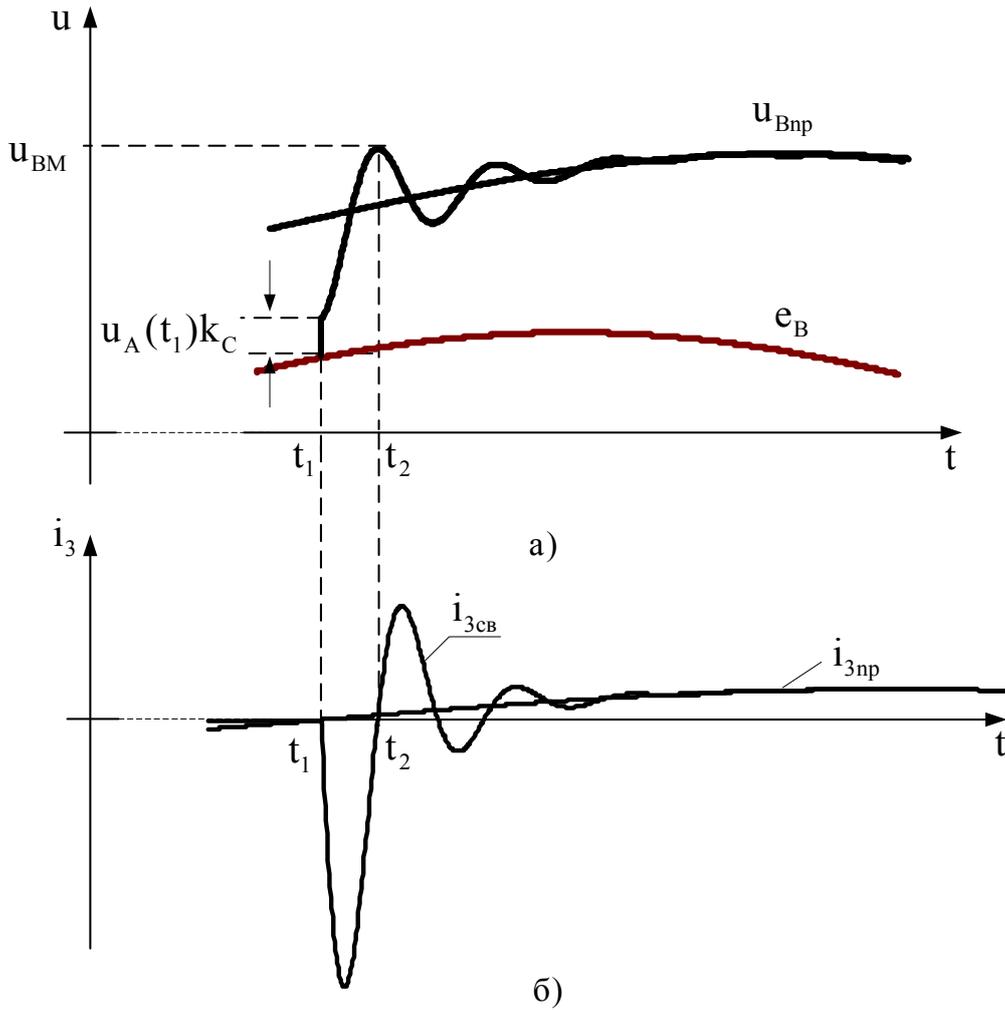


Рис. 3.11.
 а – влияние междуфазных емкостей на начальную амплитуду свободных колебаний;
 б – ток в месте замыкания

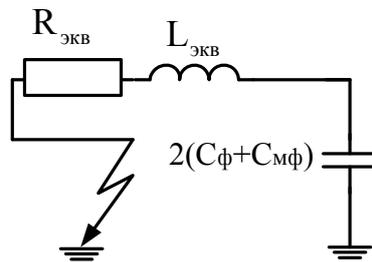


Рис. 3.12. Схема замещения для определения параметров переходного процесса

Учитывая также, что далее для получения максимально возможных перенапряжений переходный процесс считается слабо затухающим, можно принять частоту свободных колебаний равной резонансной частоте данного контура. Следовательно,

$$\omega_1 = \frac{1}{\sqrt{L_{\text{экв}} 2(C_{\text{ф}} + C_{\text{мф}})}}. \quad (3.29)$$

Реальные параметры электрических сетей таковы, что частота свободных колебаний $f_1 = \omega_1/2\pi$ может находиться в пределах 500÷3000 Гц.

Затухание свободной составляющей обусловлено активным сопротивлением в цепи тока замыкания на землю $R_{\text{экв}}$, которое состоит из сопротивлений токоведущих проводов, сопротивления в месте повреждения и сопротивления пути возврата тока замыкания. Коэффициент затухания свободной составляющей определяется следующим образом

$$\delta_1 = \frac{R_{\text{экв}}}{2L_{\text{экв}}}. \quad (3.30)$$

Сведения о возможных значениях $R_{\text{экв}}$ приведены в [4] и кратко сводятся к следующему. В воздушных высоковольтных сетях сопротивление $R_{\text{экв}}$ может изменяться в широких пределах в зависимости от характера повреждения. При повреждении изоляторов на деревянных опорах $R_{\text{экв}}$ может достигать нескольких МОм. Если повреждение произошло на металлической или железобетонной опоре, то $R_{\text{экв}}$ представляет собой величину, равную сумме сопротивления заземляющей дуги, сопротивления растеканию токов заземлителя опоры и сопротивления всей длины зоны земли, охваченной обратными токами. В кабельных сетях около 90% обратного тока протекает по оболочкам кабелей. В прилегающий к кабелям грунт, даже при его значительной удельной проводимости, может ответвляться лишь незначительная часть обратного тока, так как с удалением его от кабеля, по которому протекает прямой ток к месту повреждения, значительно возрастает собственная индуктивность петли тока.

Как указано выше, затухание свободной составляющей напряжения при расчете перенапряжений определяется через коэффициент $k_{\delta 1}$ (3.13).

По данным экспериментальных осциллографических исследований [4] в воздушных сетях $k_{\delta 1} = 0,2 \div 0,5$, в кабельных сетях $k_{\delta 1} = 0,2 \div 0,8$. Обычно для расчета максимально возможных перенапряжений принимают с запасом $k_{\delta 1} = 0,1$ [1,2].

После погасания дуги в общем случае также имеют место переходные процессы. Для решения задачи определения возможных перенапряжений важно на этом этапе рассмотреть переходные процессы изменения напряжения на нейтрали и на поврежденной фазе. После обрыва

дуги в какой-либо момент (например в момент t_2) на нейтрали остается напряжение, которое в соответствии с (3.27) равно

$$u_N(t_2) = \frac{1}{3}[u_B(t_2) + u_C(t_2)]. \quad (3.31)$$

Напряжение $u_N(t_2)$ по (3.31) есть начальное напряжение на нейтрали для переходного процесса после погасания дуги, а его принужденное значение равно нулю.

Характер переходного процесса изменения напряжения на нейтрали после погасания дуги решающим образом зависит от сопротивления в цепи нейтрали. В сети с изолированной нейтралью избыточные заряды на фазах, накопившиеся за время горения дуги и определяющие остаточное напряжение на нейтрали, могут стекать через конечное сопротивление изоляции фаз относительно земли и через первичные обмотки трансформаторов напряжения, нейтрали которых заземлены. Постоянная времени переходного процесса стекания избыточных зарядов в этом случае может быть довольно большой, поэтому напряжение на нейтрали за время нескольких циклов зажигания и погасания дуги практически может оставаться неизменным. Именно такое условие принимается при определении максимально возможных расчетных перенапряжений в сети с изолированной нейтралью.

Как будет поясняться в последующих разделах, основным положительным эффектом применения резистивного заземления нейтрали или заземления через дугогасящий реактор является получение определенного в качественном и количественном отношении переходного процесса для напряжения на нейтрали после погасания дуги.

Далее рассмотрим переходный процесс изменения напряжения на поврежденной фазе после погасания дуги. Этот процесс, как правило, также имеет вид затухающих колебаний, а его интенсивность, естественно, определяется разностью начального и принужденного значений напряжения в момент погасания дуги. Принужденное напряжение равно сумме напряжений источника и остаточного напряжения на нейтрали, а начальное – равно нулю.

Переходный процесс восстановления напряжения на поврежденной фазе для некоторого общего случая показан на рис. 3.13 и может быть описан следующим соотношением

$$u_A = u_{\text{Анр}} - u_{\text{Анр}}(t_2)e^{-\delta_2(t-t_2)} \cos \omega_2(t-t_2). \quad (3.32)$$

Так как $u_{\text{Анр}} = e_A + u_N$, то

$$u_A = e_A + u_N - [e_A(t_2) + u_N(t_2)]e^{-\delta_2(t-t_2)} \cos \omega_2(t-t_2). \quad (3.33)$$

В (3.33) ω_2 , δ_2 соответственно частота свободных колебаний и коэффициент затухания процесса восстановления напряжения.

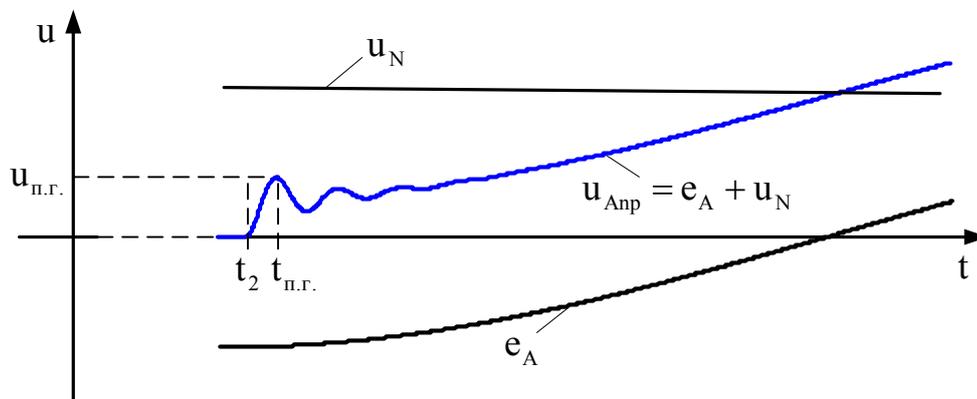


Рис. 3.13. Переходный процесс восстановления напряжения на поврежденной фазе

Эти параметры отличаются от аналогичных величин при замыкании фазы на землю, но их возможные значения частоты лежат в тех же пределах, что и значения частоты ω_1 и значения коэффициента затухания δ_1 .

Спустя время, равное полупериоду колебаний с частотой ω_2 $\left(\frac{T_2}{2} = \frac{\pi}{\omega_2}\right)$, восстанавливающееся напряжение достигает своего максимального значения ($u_{п.г.}$), которое в [4, 9, 12] названо пиком гашения (рис. 3.13).

Для определения напряжения пика гашения при восстановлении напряжения на поврежденной фазе, также как и при рассмотрении переходного процесса при горении дуги, можно использовать коэффициент, равный относительному уменьшению амплитуды за половину периода свободных колебаний, то есть принять

$$e^{-\frac{\delta_2 \pi}{\omega_2}} \approx 1 - k_{\delta_2},$$

где $k_{\delta_2} = \frac{\delta_2 \pi}{\omega_2}$.

Коэффициент k_{δ_2} может быть примерно такого же порядка как k_{δ_1} . Примем для расчета $k_{\delta_2} = 0,1$.

При горении дуги в месте замыкания протекает ток, который содержит принужденную составляющую промышленной частоты и свободные составляющие, которые обусловлены: изменением заряда емкостей неповрежденных фаз, разрядом емкости поврежденной фазы, об-

меном зарядами междуфазных и фазных емкостей при выравнивании их напряжений. При принятых выше допущениях две последние составляющие, вследствие быстрого затухания, далее не учитываются и ток в месте замыкания определяется суммой токов, протекающих через фазные емкости неповрежденных фаз В и С

$$i_3 = i_{3B} + i_{3C}. \quad (3.34)$$

Токи в (3.34) могут быть определены по известным напряжениям фаз следующим образом

$$i_{3B} = C_\Phi \frac{du_B}{dt}, \quad i_{3C} = C_\Phi \frac{du_C}{dt}.$$

С учетом (3.11), (3.12) и (3.25), (3.26) получим

$$i_3 = C_\Phi \frac{d}{dt} [u_{Bnp} + u_{Cnp}] + 2C_\Phi u_A(t_1)(1 - k_C) \frac{d}{dt} [e^{-\delta_1 t} \cos \omega_1(t - t_1)]. \quad (3.35)$$

Далее учтем, что $u_{Bnp} + u_{Cnp} = e_B + e_C - 2e_A$, $e_B + e_C = -e_A$. Если $e_A = E_{\Phi m} \sin \omega t$, то

$$i_3 = -3\omega C_\Phi E_{\Phi m} \cos \omega t - 2C_\Phi u_A(t_1)(1 - k_C) e^{-\delta_1(t-t_1)} [\delta_1 \cos \omega_1(t - t_1) + \omega_1 \sin \omega_1(t - t_1)]. \quad (3.36)$$

В (3.36) первая составляющая – принужденный емкостный ток замыкания промышленной частоты, вторая – переходный емкостный ток. Выражение для свободной составляющей переходного тока в месте замыкания получим путем дальнейшего упрощения выражения (3.36), учтя реальные соотношения между δ_1 и ω_1 .

Например, при частоте свободных колебаний $f_1 = 1000$ Гц и $k_{\delta_1} = 0,1$ $\omega_1 = 6280$ рад/с, а коэффициент затухания $\delta_1 = 210$ 1/с. Так как $\delta_1 \ll \omega_1$ можно принять, что

$$i_{3св} \approx -2\omega_1 C_\Phi u_A(t_1) e^{-\delta_1(t-t_1)} \sin \omega_1(t - t_1). \quad (3.37)$$

Принужденный емкостный ток замыкания промышленной частоты по (3.36) равен

$$i_{3np} = -3\omega C_\Phi E_{\Phi m} \cos \omega t. \quad (3.38)$$

График тока в месте замыкания по (3.37), (3.38) представлен на рис. 3.11, б. Так как $\omega_1 \gg \omega$, то при малом затухании амплитуда свободного тока в месте замыкания значительно превосходит амплитуду устано-

вившегося тока. Это обстоятельство весьма важно, так как создает условия, при которых прохождение суммарного тока замыкания через нуль в течение первых периодов свободных колебаний определяется свободным током, то есть дуга может погаснуть в моменты времени: $T_1/2$; T_1 ; $3/2T_1$.

При переходе тока через нуль имеет место попытка гашения, результат которой зависит от соотношения между скоростями восстановления электрической прочности дугового промежутка и напряжения на нем. Если дуга не погаснет ни при первом прохождении тока замыкания через нуль, ни в последующие моменты перехода, то свободные колебания затухнут и все величины примут значения вынужденных составляющих.

Если дуга погаснет, например, при первом прохождении тока замыкания через нуль (в момент t_2), то вновь будет иметь место переходный процесс, который накладывается на еще не закончившийся переходный процесс, вызванный предыдущим замыканием на землю.

После затухания свободных колебаний происходит более медленный подъем напряжения на поврежденной фазе с частотой источника. Если погасание дуги является окончательным, то u_N через несколько периодов промышленной частоты уменьшается до нуля. Напряжения на фазах по отношению к земле станут равными фазным э.д.с. источника, то есть восстановится нормальный режим работы сети.

В случае повторного пробоя и последующего погасания дуги имеют место процессы, качественно подобные описанным ранее. Однако их количественные характеристики будут другими, так как напряжения на фазах при повторном пробое отличаются от соответствующих напряжений при первом пробое, поскольку напряжение на нейтрали не равно нулю, как это было при первом пробое.

Далее рассмотрим процессы при зажигании и погасании дуги при вполне определенных условиях, что позволит дать количественную оценку интересующих нас электрических величин.

При анализе переходных процессов, возникающих при зажигании и погасании дуги, необходимо определять мгновенные значения напряжений в определенные моменты времени. Для этого учтем, что мгновенные значения э.д.с. источника для любого момента времени приняты равными

$$e_A = E_{\Phi m} \sin \omega t;$$

$$e_B = E_{\Phi m} \sin(\omega t + 240^\circ);$$

$$e_C = E_{\Phi m} \sin(\omega t + 120^\circ).$$

Принужденные значения напряжений фаз после окончания переходного процесса, вызванного зажиганием дуги между фазой А и землей, в соответствии с векторной диаграммой (рис. 3.2)

$$u_A = 0;$$

$$u_{\text{Впр}} = -u_{\text{АВ}} = e_B - e_A = \sqrt{3}E_{\text{Фм}} \sin(\omega t + 210^\circ);$$

$$u_{\text{Спр}} = u_{\text{СА}} = e_C - e_A = \sqrt{3}E_{\text{Фм}} \sin(\omega t + 150^\circ).$$

Рассмотрим переходный процесс при пробое изоляции фазы А на землю с последующим погасанием дуги. Пусть пробой произошел в момент времени $t_1 = \frac{3\pi}{2\omega}$, то есть, когда напряжение поврежденной фазы равно

$$u_A(t_1) = -E_{\text{Фм}}.$$

По (3.25) и (3.26) разность между начальными и принужденными напряжениями на фазах В и С, то есть начальные амплитуды свободных колебаний, будут равны

$$u_{\text{Внач}}(t_1) - u_{\text{Впр}}(t_1) = -E_{\text{Фм}}(1 - k_C),$$

$$u_{\text{Снач}}(t_1) - u_{\text{Спр}}(t_1) = -E_{\text{Фм}}(1 - k_C).$$

Напряжения на фазах В и С будут изменяться в соответствии со следующими соотношениями

$$u_B = u_{\text{Впр}} - E_{\text{Фм}}(1 - k_C)e^{-\delta_1(t-t_1)} \cos \omega_1(t - t_1),$$

$$u_C = u_{\text{Спр}} - E_{\text{Фм}}(1 - k_C)e^{-\delta_1(t-t_1)} \cos \omega_1(t - t_1).$$

Напряжение на нейтрали в соответствии с (3.27) равно

$$u_N = \frac{1}{3}(u_{\text{Впр}} + u_{\text{Спр}}) - \frac{2}{3}E_{\text{Фм}}(1 - k_C)e^{-\delta_1(t-t_1)} \cos \omega_1(t - t_1).$$

Из (3.27) следует, что $\frac{1}{3}(u_{\text{Впр}} + u_{\text{Спр}}) = -E_{\text{Фм}} \sin \omega t$, поэтому

$$u_N = -E_{\text{Фм}} \sin \omega t - \frac{2}{3}E_{\text{Фм}}(1 - k_C)e^{-\delta_1(t-t_1)} \cos \omega_1(t - t_1).$$

Напряжения на неповрежденных фазах и на нейтрали достигают максимального значения через половину периода свободных колебаний

(момент t_2) от момента зажигания дуги (момент t_1). В этот момент времени $\omega_1(t_2 - t_1) = \pi$, а $\cos \omega_1(t - t_1) = -1$. Так как частота свободных колебаний ω_1 намного больше рабочей частоты ω , то вполне можно считать, что за время $\frac{T_1}{2} = \frac{\pi}{\omega_1}$ принужденные составляющие практически не изменяются и принять их равными мгновенным значениям в момент t_1 . При принятом моменте замыкания $\omega t_1 = 270^\circ$ и поэтому по (3.36)

$$u_{\text{Впр}}(t_1) = u_{\text{Спр}}(t_1) = 1,5E_{\Phi\text{м}}.$$

Таким образом, после первого зажигания дуги максимальные напряжения ($U_{\text{ВМ}}$, $U_{\text{СМ}}$) на неповрежденных фазах и на нейтрали (U_{NM}) равны

$$u_{\text{ВМ}} = u_{\text{СМ}} = 1,5E_{\Phi\text{м}} + E_{\Phi\text{м}}(1 - k_{\text{С}})(1 - k_{\delta_1}),$$

$$u_{\text{NM}} = E_{\Phi\text{м}} + \frac{2}{3}E_{\Phi\text{м}}(1 - k_{\text{С}})(1 - k_{\delta_1}).$$

При $k_{\text{С}} = 0,2$ и $k_{\delta_1} = 0,1$ получаем

$$u_{\text{ВМ}} = u_{\text{СМ}} = 2,22E_{\Phi\text{м}}; \quad u_{\text{NM}} = 1,48E_{\Phi\text{м}}.$$

Напряжение пика гашения определяется по (3.33) с учетом того, что пик гашения наступает к моменту времени

$$t_{\text{п.г.}} = t_2 + \frac{T_2}{2} = t_2 + \frac{\pi}{\omega_2},$$

и поэтому

$$e^{-\delta_2(t_{\text{п.г.}} - t_2)} \approx (1 - k_{\delta_2}) = 0,9, \quad \omega_2(t_{\text{п.г.}} - t_2) = \pi.$$

Тогда

$$\begin{aligned} u_{\text{п.г.}} &= [e_{\text{А}}(t_2) + u_{\text{N}}(t_2)] - [e_{\text{А}}(t_2) + u_{\text{N}}(t_2)](1 - k_{\delta_2}) \cos \pi = \\ &= (-E_{\Phi\text{м}} + 1,48E_{\Phi\text{м}}) - (-E_{\Phi\text{м}} + 1,48E_{\Phi\text{м}}) \cdot 0,9(-1) = 0,91E_{\Phi\text{м}}. \end{aligned}$$

Для определения тока в месте замыкания воспользуемся соотношениями (3.37), (3.38). Свободная составляющая переходного тока в месте замыкания по (3.37) равна

$$i_{\text{зсв}} \approx 2\omega_1 C_{\Phi} E_{\Phi\text{м}} \sin \omega_1(t - t_1).$$

Принужденный емкостный ток замыкания промышленной частоты по (3.38) равен

$$i_{3np} = 3C_{\Phi} E_{\Phi m} \omega \cos \omega t .$$

На рис. 3.14 показаны кривые изменения напряжений относительно земли для поврежденной фазы А (U_A) (рис. 3.14, а), неповрежденной фазы В (U_B) (рис. 3.14, б), напряжение на нейтрали U_N (рис. 3.14, в), а также ток замыкания на землю – i_3 (рис. 3.14, г). Сплошными линиями изображены кривые напряжений и тока при загорании и последующем обрыве дуги, спустя половину периода свободных колебаний емкостного тока, а пунктирными линиями кривые при устойчивом замыкании.

На рис. 3.14, а наряду с восстанавливающимся напряжением приведены возможные кривые восстанавливающейся электрической прочности дугового промежутка, вид которых зависит от большого числа трудно учитываемых факторов. В случае I электрическая прочность промежутка восстанавливается медленнее, чем напряжение на нем и дуга становится устойчивой. В случае II произойдет погасание дуги в момент t_2 , но в момент t_3 дуга загорится вновь. При такой ситуации имеет место дуговое замыкание, которое принято называть перемежающимся. Случай III, когда электрическая прочность промежутка в течение всего времени выше восстанавливающегося напряжения, соответствует окончательному погасанию дуги.

Полученные соотношения являются основой для определения расчетных максимальных перенапряжений при повторяющихся зажиганиях и погасаниях дуги.

3.3.3. Теории формирования перенапряжений при дуговых замыканиях на землю

Разработано несколько теорий формирования перенапряжений на неповрежденных фазах при дуговых замыканиях. Процесс формирования перенапряжений в соответствии с этими теориями изложены в ряде работ [4, 9, 13, 14]. Значение перенапряжений в конечном счете зависит от остаточного напряжения на нейтрали и от пробивного напряжения в момент очередного зажигания дуги в процессе перемежающегося замыкания.

Три, известные в настоящее время и рассматриваемые ниже, теории возникновения перенапряжений отличаются принятыми условиями горения дуги, которые и обуславливают различные напряжения на нейтрали к моменту очередного зажигания дуги. Общим для всех теорий является предположение о том, что электрическая прочность дугового промежутка (пробивное напряжение) к моменту каждого очередного

пробоя равна максимальному значению восстанавливающегося напряжения на поврежденной фазе.

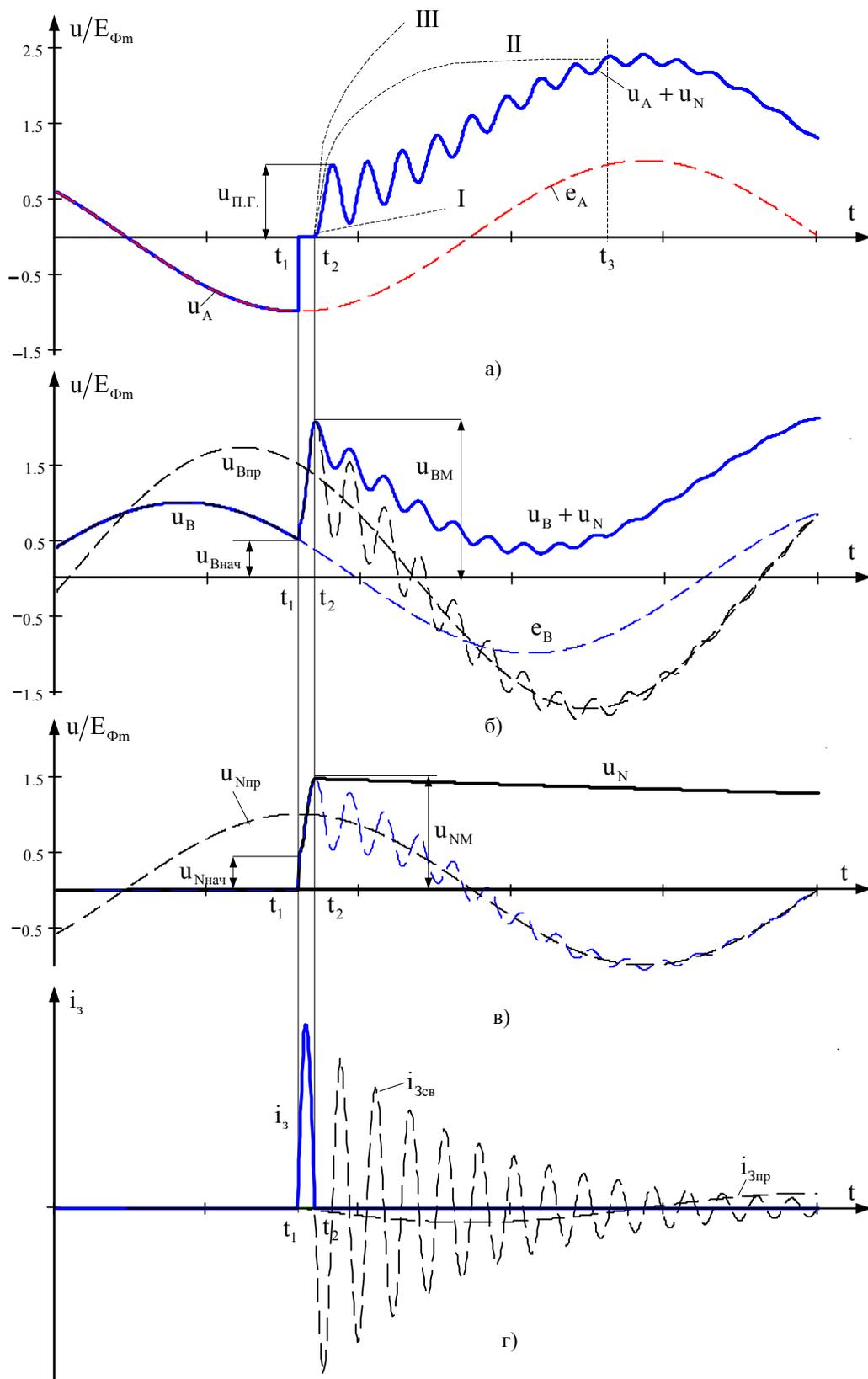


Рис. 3.14. Переходные процессы при дуговом замыкании в сети с изолированной нейтралью

Кроме того, во всех теориях принимается, что напряжение на нейтрали, сформировавшееся при предыдущем зажигании дуги, не изменяется к моменту последующего зажигания.

Теория Петерсена

Характерной особенностью теории Петерсена является предположение о том, что после каждого зажигания дуги она гаснет при первом прохождении суммарного тока замыкания через нуль. Поскольку, как пояснялось выше, амплитуда переходной составляющей значительно больше амплитуды установившегося емкостного тока, можно считать, что дуга горит в течение времени $\Delta t_d = \frac{\pi}{\omega_1}$. В момент погасания дуги

принужденное напряжение на поврежденной фазе не равно нулю и поэтому в соответствии с (3.32) имеет место переходный процесс восстанавливающегося напряжения (рис. 3.13) с высокочастотным пиком $U_{п.г.}$. Однако предполагается, что электрическая прочность дугового промежутка нарастает быстрее, чем восстанавливающееся с частотой ω_2 напряжение на поврежденной фазе.

По теории Петерсена каждый последующий пробой изоляции происходит с интервалом в половину периода промышленной частоты на максимуме напряжения поврежденной фазы. При неучете затухания напряжения на нейтрали, очередное n -ое зажигание дуги произойдет при напряжении на поврежденной фазе равным

$$u_{An} = (u_{NM(n-1)} + E_{\phi m}) \quad (3.39)$$

где $u_{NM(n-1)}$ – напряжение на нейтрали, сформировавшееся в предыдущем $n - 1$ цикле зажигания и гашения дуги.

Таким образом, начальная амплитуда свободных колебаний на неповрежденных фазах (например на фазе В) при каждом очередном пробое равна

$$u_{BM} = u_{NM(n-1)} + E_{\phi m}. \quad (3.40)$$

Максимальное перенапряжение при очередном пробое формируется спустя время $\Delta t_d = \frac{\pi}{\omega_1}$ и, с учетом влияния междуфазных емкостей и затухания переходного процесса равно

$$u_{BMn} = 1,5E_{\phi m} + (u_{NM(n-1)} + E_{\phi m})(1 - k_C)(1 - k_{\delta 1}). \quad (3.41)$$

Как и ранее пренебрегаем изменением принужденного напряжения на фазах В и С за время горения дуги.

За счет роста u_{NM} от пробоя к пробую перенапряжение u_{BMn} увеличивается. Однако можно показать, что после некоторого числа циклов пробоя изоляции и гашения дуги рост u_{BMn} прекращается, так как уравнение, полученное из предположения возможности выполнения условия

$$u_{BMn} = u_{BM(n-1)} \quad (3.42)$$

дает определенное решение относительно u_{BMn} . Для того, чтобы решить уравнение (3.42) нужно учесть, что в соответствии с (3.27) и с учетом того, что процессы на фазах В и С одинаковы напряжение на нейтрали

$$u_{NMn} = \frac{1}{3}(u_{BM(n-1)} + u_{CM(n-1)}) = \frac{2}{3}u_{BM(n-1)}. \quad (3.43)$$

Поскольку предполагается прекращение роста u_{BM} , то в выражение (3.43) следует подставить $U_{BM(n-1)} = U_{BMn}$ и тогда

$$u_{BMn} = 1,5E_{\phi m} + \left(\frac{2}{3}u_{BMn} + E_{\phi m} \right) (1 - k_C)(1 - k_{\delta 1}). \quad (3.44)$$

Из (3.44) получим

$$u_{BMn} = E_{\phi m} \frac{1,5 + (1 - k_C)(1 - k_{\delta 1})}{1 - \frac{2}{3}(1 - k_C)(1 - k_{\delta 1})}. \quad (3.45)$$

При принятых ранее значениях $k_C = 0,2$ и $k_{\delta 1} = 0,1$ по (3.45) получим, что по теории Петерсена возможное перенапряжение $U_{BMn} = 4,27E_{\phi m}$.

Теория Петерса и Слепяна

По теории Петерса и Слепяна максимальные перенапряжения определяются при условии, когда после очередного зажигания дуга гаснет при первом прохождении через нуль принужденной составляющей тока замыкания. Все остальные допущения остаются такими же, как и в теории Петерсена. Поскольку к этому моменту свободные составляющие частоты ω_1 затухают, то, независимо от числа циклов зажигания и гашения дуги, при каждом очередном гашении остающееся напряжение

на нейтрали определяется только принужденными составляющими и по (3.27) равно

$$u_N = \frac{1}{3}(u_{Впр} + u_{Спр}) = -u_A = -E_{\Phi m} \sin \omega t_{\text{гаш}(n-1)}, \quad (3.46)$$

где $t_{\text{гаш}(n-1)}$ – момент погасания дуги после предыдущего пробоя.

В соответствии с условиями рассматриваемой теории $\omega t_{\text{гаш}(n-1)}$ за вычетом целого числа периодов равно либо $\frac{\pi}{2}$, либо $\frac{3\pi}{2}$ и поэтому к следующему n -му зажиганию дуги остающееся напряжение на нейтрали $u_{N(n-1)}$ соответственно равно $-E_{\Phi m}$ или $+E_{\Phi m}$.

Ближайший максимум напряжения на поврежденной фазе достигается спустя половину периода промышленной частоты после погасания дуги, когда напряжение на нейтрали и ЭДС источника имеют одинаковые знаки. Если, например, принять $\omega t_{\text{гаш}(n-1)} = \frac{\pi}{2}$, то есть $u_{N(n-1)} = -E_{\Phi m}$, то максимум напряжения на поврежденной фазе в момент зажигания дуги, когда $\omega t_n = \frac{3\pi}{2}$ будет равен $-2E_{\Phi m}$. Это значение напряжения и определяет начальную амплитуду свободных колебаний частоты ω_1 на неповрежденных фазах. Принужденные напряжения при $\omega t_n = \frac{3\pi}{2}$ на фазах В и С равны $1,5E_{\Phi m}$. Приняв, как и ранее, принужденные напряжения неизменными за половину периода свободных колебаний частоты ω_1 получим следующие значения максимальных перенапряжений по теории Петерса и Слепяна

$$u_{ВМ} = u_{СМ} = 1,5E_{\Phi m} + 2E_{\Phi m}(1 - k_C)(1 - k_{\delta 1}).$$

При принятых выше значениях k_C и $k_{\delta 1}$ получим $u_{ВМ} = u_{СМ} = 2,94E_{\Phi m}$.

Дополнительно следует отметить, что при горении дуги по теории Петерса и Слепяна переходный процесс восстановления напряжения на поврежденной фазе после гашения дуги отсутствует. Это объясняется тем, что в момент гашения дуги принужденное напряжение на поврежденной фазе равно нулю, так как в этот момент мгновенное значение э.д.с. источника равно и противоположно по знаку напряжению на ней-

трали. Например, при $\omega t_{\text{гаш}} = \frac{\pi}{2}$ мгновенное значение э.д.с. $e_A = E_{\Phi_m}$, а мгновенное значение напряжения на нейтрали $u_N = -E_{\Phi_m}$.

Теория Белякова

Согласно теории Белякова Н.Н. предполагается, что дуга может погаснуть как при первом, так и любом последующем переходе через нуль свободной составляющей тока замыкания (в отличие от теории Петерсена, по которой дуга гаснет при первом прохождении свободной составляющей тока через нуль). Если дуга гаснет при каком-либо прохождении через нуль свободной составляющей тока замыкания, при предшествующем ее зажигании вблизи максимума ЭДС поврежденной фазы, то, во-первых, знаки напряжения смещения нейтрали и ЭДС поврежденной фазы источника различны и, во-вторых, можно допустить, что за время горения дуги последняя не изменяется и равна E_{Φ_m} . Если кроме этого также пренебречь затуханием свободной составляющей восстанавливающегося напряжения частоты ω_2 , то есть считать $e^{-\delta_2(t-t_2)} = 1$, то по (3.33) при $\omega_2(t - t_2) = \pi$ получим

$$u_{\text{п.г.}} = 2(u_N - E_{\Phi_m}). \quad (3.47)$$

Соотношение (3.47), полученное при принятых выше допущениях, позволяет определить остаточное напряжение на нейтрали исходя из ожидаемой электрической прочности дугового промежутка к моменту достижения восстанавливающимся напряжением пика гашения ($u_{\text{п.г.}}$).

На основе специальных экспериментов, проведенных Беляковым Н.Н., установлено, что, например, в сетях 6–10 кВ, дуга не загорается вновь после ее погасания под действием восстанавливающегося напряжения с частотой ω_2 , если $u_{\text{п.г.}} \leq 0,4E_{\Phi_m}$ [9, 13]. Приняв $u_{\text{п.г.}} = 0,4E_{\Phi_m}$ по (3.47) получим, значение напряжения на нейтрали, сформировавшееся в предшествующем цикле зажигания и гашения дуги

$$u_N = \frac{u_{\text{п.г.}}}{2} + E_{\Phi_m} = 1,2E_{\Phi_m}.$$

В отличие от теории Петерса и Слепяна в теории Белякова принимается во внимание, что наибольшее перенапряжение возникает на отстающей по отношению к поврежденной фазе (в данном случае на фазе В) и при зажигании дуги не на максимуме э.д.с. поврежденной фазы, а с некоторым опережением этого момента времени. Этот момент времени или соответствующий ему фазовый угол (φ_3) относительно момента пе-

рехода через нуль ЭДС поврежденной фазы может быть определен из выражения для перенапряжения на фазе В. В соответствии с (3.11) при $t - t_1 = \frac{T_1}{2}$ с учетом (3.13)

$$u_{\text{ВМ}} = \sqrt{3}E_{\text{Фм}} \sin(\varphi_3 + 210^\circ) + \left[\sqrt{3}E_{\text{Фм}} \sin(\varphi_3 + 210^\circ) - E_{\text{Фм}} \sin(\varphi_3 + 240^\circ) - u_{\text{N}} \right] (1 - k_{\text{C}})(1 - k_{\delta 1}) \quad (3.48)$$

Решение уравнения $\frac{du_{\text{ВМ}}}{dt} = 0$ дает

$$\text{tg } \varphi_3 = \frac{2}{\sqrt{3}}(1 - k_{\text{C}})(1 - k_{\delta 1}) + \sqrt{3}. \quad (3.49)$$

При $k_{\text{C}} = 0,2$ и $k_{\delta 1} = 0,1$ $\varphi_3 = 68,7^\circ$.

При полученных выше значениях φ_3 и u_{N}

$$u_{\text{ВМ}} = 3,24E_{\text{Фм}}.$$

Если же принять, что очередной пробой изоляции происходит не при $\varphi_3 = 68,7^\circ$, а при максимуме э.д.с. поврежденной фазы, то перенапряжение на неповрежденной фазе

$$u_{\text{ВМ}} = 1,5E_{\text{Фм}} + (u_{\text{N}} + E_{\text{Фм}})(1 - k_{\text{C}})(1 - k_{\delta 1}) = 1,5E_{\text{Фм}} + (1,2E_{\text{Фм}} + E_{\text{Фм}}) \cdot 0,8 \cdot 0,9 = 3,08. \quad (3.50)$$

4. СЕТИ С КОМПЕНСАЦИЕЙ ЕМКОСТНОГО ТОКА

Как следует из изложенного в главе 3, дуга емкостного тока в сети с незаземленной нейтралью при сравнительно небольших токах может иметь перемежающийся характер и быть причиной значительных перенапряжений. При больших токах дуга может стать устойчивой и длительное горение ее в конце концов приводит к междуфазному короткому замыканию.

Поэтому необходимо принимать меры для возможно быстрой ликвидации дуги замыкания. Одним из известных и широко используемых вариантов решения такой задачи является заземление нейтрали через катушку, индуктивность которой подбирается определенным образом. Заземляющая катушка получила название дугогасящей катушки или ду-

гогасящего реактора. Данный термин, как будет видно из дальнейшего, очень точно отображает назначение и механизм действия этого аппарата.

Дугогасящий реактор создает при замыкании на землю двойное действие: во-первых, он существенно уменьшает (компенсирует) ток в месте замыкания, а во-вторых, замедляет восстановление напряжения на поврежденной фазе после обрыва дуги. Оба эти обстоятельства способствуют гашению дуги.

Способность дугогасящего реактора компенсировать емкостный ток замыкания на землю определяет одно из принятых названий сетей, заземленных через дугогасящий реактор – компенсированные сети.

4.1. Компенсированная сеть при устойчивом замыкании на землю

Наиболее распространенным вариантом подключения дугогасящих реакторов является использование специальных заземляющих трансформаторов со схемой соединения звезда-треугольник (рис. 4.1, а). Для этой цели могут также использоваться силовые трансформаторы, имеющиеся в сети, если их обмотки имеют схему соединения звезда-треугольник.

При наличии у трансформатора обмотки, соединенной в треугольник, его сопротивление нулевой последовательности невелико и практически равно сопротивлению прямой последовательности. В данном случае это имеет существенное значение, так как сопротивление нулевой последовательности трансформатора при замыкании на землю оказывается включенным последовательно с дугогасящим реактором. Мощность трансформатора, к которому подключается дугогасящий реактор, должна быть выбрана с учетом его нагрузки и дополнительного тока дугогасящего реактора [1, 15]. Если трансформатор используется только для подключения дугогасящего реактора, то его мощность должна быть равна мощности реактора [1]. В этом случае эквивалентное реактивное сопротивление трансформатора токам нулевой последовательности составляет несколько процентов от сопротивления дугогасящего реактора. Наличие последовательного сопротивления практически никак не влияет на процессы при замыкании на землю, если сопротивление дугогасящего реактора выбирается с учетом этого сопротивления.

Если пренебречь малым сопротивлением заземляющего трансформатора, то при анализе можно дугогасящий реактор перенести в нейтральную точку эквивалентного источника питания, так как при принятых допущениях потенциалы нейтральной точки источника и заземляющего трансформатора одинаковы. Такое преобразование схемы не

приводит к каким-либо принципиальным искажениям рассматриваемых процессов.

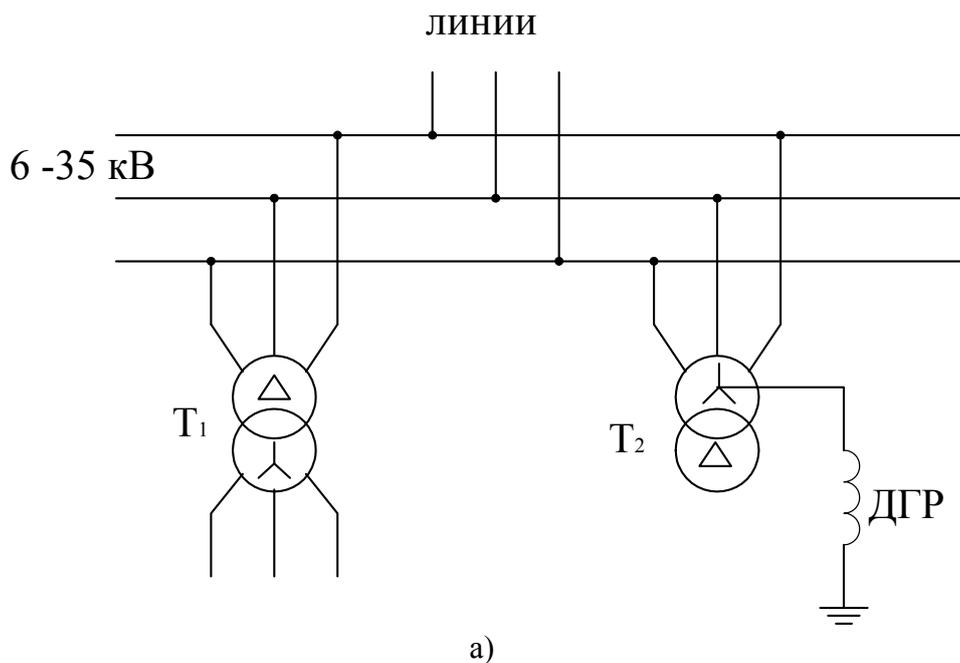
Принятая с учетом сказанного трехфазная схема замещения компенсированной сети для последующего анализа представлена на рис. 4.1, б. Так же как и в сети с изолированной нейтралью в этом режиме можно пренебречь продольными сопротивлениями элементов сети и заменять распределенные емкости и активные проводимости фаз относительно земли сосредоточенными.

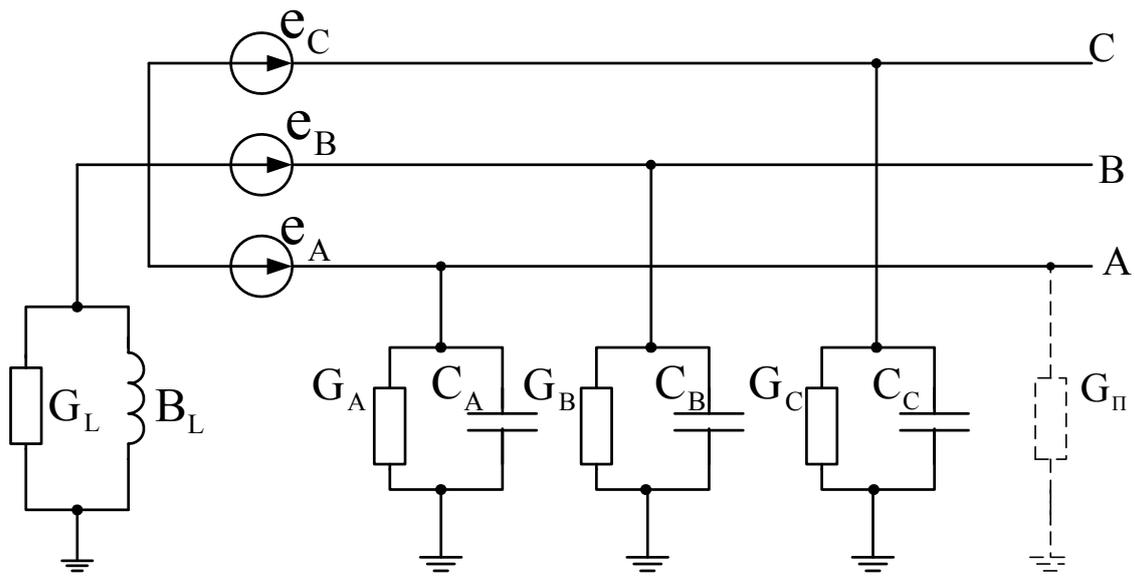
В компенсированной сети, как это будет видно из дальнейшего, в некоторых случаях, в частности при замыкании на землю, необходимо учитывать, что практически электродвижущие силы источника не строго синусоидальны, поэтому зададим их в виде

$$\begin{aligned}
 e_A &= \sum_1^{\nu} E_{\Phi m \nu} \sin \nu \omega t, \\
 e_B &= \sum_1^{\nu} E_{\Phi m \nu} \sin \left(\nu \omega t + \frac{4}{3} \nu \pi \right), \\
 e_C &= \sum_1^{\nu} E_{\Phi m \nu} \sin \left(\nu \omega t + \frac{2}{3} \nu \pi \right).
 \end{aligned}
 \tag{4.1}$$

где $\nu = 1, 3, 5, 7, \dots$

Физические причины, вызывающие несинусоидальность э.д.с. источника, таковы, что они содержат только нечетные гармоники, что и отражено в (4.1).





б)

Рис. 4.1.

а – схема сети с компенсированным заземлением нейтрали
 ДГР – дугогасящий реактор;

б – трехфазная схема замещения с компенсированным заземлением нейтрали

Будем считать, что ЭДС источника симметричны. При задании ЭДС в виде (4.1) это означает, что гармоники образуют:

- при $\nu = 1, 7, 13 \dots$ – трехфазные системы прямой последовательности;
- при $\nu = 5, 11, 17 \dots$ – трехфазные системы обратной последовательности;
- при $\nu = 3, 9, 15 \dots$ – трехфазные системы нулевой последовательности.

Для любого значения ν электрические величины, характеризующие режим компенсированной сети при устойчивом замыкании на землю через переходную проводимость G_{II} , например, на фазе А, определяются следующими соотношениями:

напряжение на нейтрали

$$\dot{U}_{N\nu} = -\frac{\dot{E}_{A\nu} \underline{Y}_{A\nu} + \dot{E}_{B\nu} \underline{Y}_{B\nu} + \dot{E}_{C\nu} \underline{Y}_{C\nu} + \dot{E}_{A\nu} G_{II}}{\underline{Y}_{A\nu} + \underline{Y}_{B\nu} + \underline{Y}_{C\nu} + G_{II} + G_L + B_L}; \quad (4.2)$$

напряжение на поврежденной фазе

$$\begin{aligned} \dot{U}_{Av} &= \dot{E}_{Av} + \dot{U}_{Nv} = \\ &= \frac{\dot{E}_{Av} (\underline{Y}_A + \underline{Y}_B + \underline{Y}_C) + \dot{E}_{Av} (G_L + B_L)}{\underline{Y}_A + \underline{Y}_B + \underline{Y}_C + G_{II} + G_L + B_L} - \\ &- \frac{\dot{E}_{Av} \underline{Y}_A + \dot{E}_{Bv} \underline{Y}_B + \dot{E}_{Cv} \underline{Y}_C}{\underline{Y}_A + \underline{Y}_B + \underline{Y}_C + G_{II} + G_L + B_L}; \end{aligned} \quad (4.3)$$

ТОК В МЕСТЕ ЗАМЫКАНИЯ

$$\begin{aligned} \dot{I}_{3v} &= \dot{U}_{Av} \cdot G_{II} = \\ &= \frac{\dot{E}_{Av} (\underline{Y}_A + \underline{Y}_B + \underline{Y}_C + B_L + G_L) G_{II}}{\underline{Y}_A + \underline{Y}_B + \underline{Y}_C + G_{II} + G_L + B_L} - \\ &- \frac{G_{II} (\dot{E}_{Av} \underline{Y}_A + \dot{E}_{Bv} \underline{Y}_B + \dot{E}_{Cv} \underline{Y}_C)}{\underline{Y}_A + \underline{Y}_B + \underline{Y}_C + G_{II} + G_L + B_L}; \end{aligned} \quad (4.4)$$

напряжения на неповрежденных фазах В и С

$$\begin{aligned} \dot{U}_{Bv} &= \dot{E}_{Bv} + \dot{U}_{Nv} = \\ &= \frac{\dot{E}_{Bv} (\underline{Y}_A + \underline{Y}_B + \underline{Y}_C + G_{II} + G_L + B_L)}{\underline{Y}_A + \underline{Y}_B + \underline{Y}_C + G_{II} + G_L + B_L} - \\ &- \frac{\dot{E}_A G_{II} + (\dot{E}_{Av} \underline{Y}_A + \dot{E}_{Bv} \underline{Y}_B + \dot{E}_{Cv} \underline{Y}_C)}{\underline{Y}_A + \underline{Y}_B + \underline{Y}_C + G_{II} + G_L + B_L}; \end{aligned} \quad (4.5)$$

$$\begin{aligned} \dot{U}_{Cv} &= \dot{E}_{Cv} + \dot{U}_{Nv} = \\ &= \frac{\dot{E}_{Cv} (\underline{Y}_A + \underline{Y}_B + \underline{Y}_C + G_{II} + G_L + B_L)}{\underline{Y}_A + \underline{Y}_B + \underline{Y}_C + G_{II} + G_L + B_L} - \\ &- \frac{\dot{E}_{Av} G_{II} + (\dot{E}_{Av} \underline{Y}_A + \dot{E}_{Bv} \underline{Y}_B + \dot{E}_{Cv} \underline{Y}_C)}{\underline{Y}_A + \underline{Y}_B + \underline{Y}_C + G_{II} + G_L + B_L}. \end{aligned} \quad (4.6)$$

В формулах (4.2), (4.3), (4.4), (4.5) и (4.6)

$\dot{E}_{Av} = \dot{E}_{Bv} = \dot{E}_{Cv} = \dot{E}_\Phi$ – действующие значения фазных ЭДС частоты ω ;

$\underline{Y}_{Av} = G_A + j\omega C_A$; $\underline{Y}_{Bv} = G_B + j\omega C_B$; $\underline{Y}_{Cv} = G_C + j\omega C_C$ – полные проводимости фаз относительно земли на частоте ω ;

$G_{II} = 1/R_{II}$ – проводимость в месте замыкания;

$B_L = 1/jv\omega L$ – реактивная проводимость дугогасящего реактора;

G_L – активная проводимость, учитывающая потери в дугогасящем реакторе.

Реальная несимметрия проводимостей фаз оказывает малое влияние на ток в месте замыкания, поэтому его определим, положив $G_A = G_B = G_C = G_\Sigma = G_\Phi$ и $C_A = C_B = C_C = C_\Sigma = C_\Phi$. Поэтому

$$G_A + G_B + G_C = 3G_\Phi \text{ и } C_A + C_B + C_C = 3C_\Phi. \quad (4.7)$$

Для гармонических составляющих, образующих системы ЭДС прямой и обратной последовательностей с частотой этих составляющих $\dot{E}_{Av} + \dot{E}_{Bv} + \dot{E}_{Cv} = 0$ и поэтому ток замыкания равен

$$\dot{I}_{3v} = \frac{\dot{E}_{Av} \left(3G_\Phi + G_L + j3v\omega C_\Phi - j\frac{1}{v\omega L} \right)}{\left(3G_\Phi + G_L + j3v\omega C_\Phi - j\frac{1}{v\omega L} \right) + \frac{1}{R_\Pi}} \cdot \frac{1}{R_\Pi}. \quad (4.8)$$

Преобразуем (4.8) к виду

$$\dot{I}_{3v} = \frac{\dot{E}_{Av}}{R_\Pi + \frac{1}{\left[(G_L + 3G_\Phi) + j\left(3v\omega C_\Phi - \frac{1}{v\omega L} \right) \right]}}. \quad (4.9)$$

Для гармонических составляющих, образующих систему нулевой последовательности $\dot{E}_{Av} = \dot{E}_{Bv} = \dot{E}_{Cv}$, а ток замыкания равен

$$\dot{I}_{3v} = \frac{\dot{E}_{Av} (B_L + G_L)}{3G + G_L + j3v\omega C - j\frac{1}{v\omega L} + \frac{1}{R_\Pi}} \cdot \frac{1}{R_\Pi}. \quad (4.10)$$

Приняв в (4.10) $R_\Pi = 0$, получим

$$\dot{I}_{3v} = \dot{E}_{Av} \left(\frac{1}{jv\omega L} + G_L \right). \quad (4.11)$$

Из (4.11) видно, что токи гармоник с частотами кратными трем определяются сопротивлением дугогасящего реактора, которое на частоте

тах этих гармоник велико. Поэтому в месте замыкания токи гармоник кратных трем малы и их в дальнейшем не учитываем.

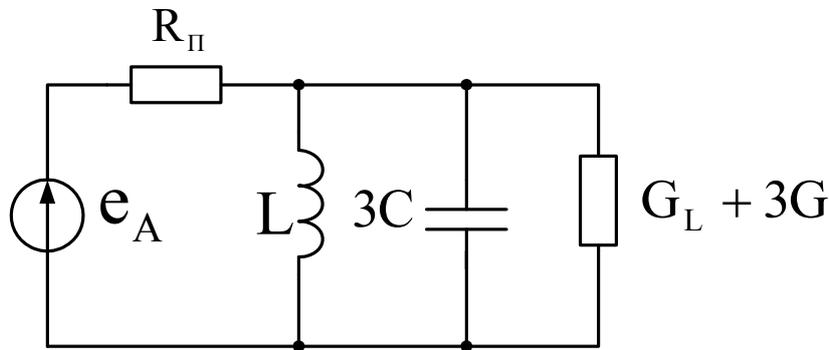


Рис. 4.2. Схема замещения нулевой последовательности компенсированной сети при замыкании на землю через переходное сопротивление R_{Π} для гармонических составляющих, образующих системы прямой и обратной последовательностей

Вернемся к выражению (4.9) для тока гармоник не кратных трем. Этому выражению соответствует схема замещения нулевой последовательности, приведенная на рис. 4.2. Из (4.9), а так же из схемы замещения видно, что при выборе индуктивности дугогасящего реактора такой, когда при $\nu = 1$ $1/\omega L = 3\omega C$, реактивная составляющая тока основной (промышленной) частоты равна нулю при любом значении переходного сопротивления в месте замыкания. Отсюда ясен механизм компенсирующего действия дугогасящего реактора, а также очевидно, что при указанном выше условии компенсируется только ток основной частоты, а токи высших гармоник практически не компенсируется, так как при всех $\nu > 1$ $1/\nu\omega L \ll 3\nu\omega C$.

Практически важно определить значение тока замыкания при металлическом замыкании на землю, то есть при $R_{\Pi} = 0$. Для этого случая запишем выражение действующего значения тока в следующем виде

$$I_3 = \sqrt{E_{\Phi\nu}^2 \left(3\omega C_{\Phi} - \frac{1}{\omega L} \right)^2 + \sum_1^{\nu} E_{\Phi\nu}^2 (G_L + 3G_{\Phi})^2 + \sum_3^{\nu} E_{\Phi\nu}^2 \left(3\nu\omega C_{\Phi} - \frac{1}{\nu\omega L} \right)^2} \quad (4.12)$$

В этом выражении первое слагаемое – реактивная составляющая тока основной частоты, второе – действующее значение активной составляющей тока, третье – действующее значение реактивной составляющей, обусловленной высшими гармониками.

В реальных сетях амплитуды высших гармоник ЭДС значительно меньше амплитуды основной гармоники, поэтому в активной состав-

ляющей можно учитывать только основную гармонику. Реактивной составляющей высших гармоник пренебрегать не следует, так как она значительна и при малых амплитудах гармоник ЭДС из-за возрастания емкостной проводимости сети на частотах высших гармоник. Проводимость дугогасящего реактора на высших гармониках, напротив, уменьшается и поэтому токи высших гармоник, ответвляющиеся в него, малы и их можно не учитывать.

В связи со сказанным практически в токе замыкания на землю учитываются следующие составляющие.

1. Реактивная составляющая основной частоты

$$I_{1p} = E_{\phi 1} \left(3\omega C_{\phi} - \frac{1}{\omega L} \right). \quad (4.13)$$

2. Активная составляющая основной частоты

$$I_{1a} = E_{\phi 1} (3G_{\phi} + G_L). \quad (4.14)$$

3. Емкостная составляющая высших гармоник

$$I_{Cv} = \sqrt{\sum_3^v E_{\phi v} v 3\omega C_{\phi}}. \quad (4.15)$$

Рассмотрим эти составляющие тока замыкания более подробно. Составляющая I_{1p} обусловлена тем, что практически всегда имеет место отклонение от условия точной компенсации, то есть $1/\omega L \neq 3\omega C_{\phi}$. Степень отклонения от условия точной компенсации характеризуется расстройкой компенсации ν , которая определяется следующим образом:

$$\nu = 1 - \frac{I_{L1}}{I_{C1}}, \quad (4.16)$$

где $I_{L1} = E_{\phi 1} \frac{1}{\omega L}$ – индуктивная составляющая тока дугогасящего реактора;

$I_{C1} = E_{\phi 1} \cdot 3\omega C_{\phi}$ – емкостный ток замыкания на землю.

При точной компенсации индуктивная составляющая тока дугогасящего реактора равна емкостному току сети и $\nu = 0$. При $I_L < I_C$ имеет место недокомпенсация ($\nu > 0$), при $I_L > I_C$ имеет место перекомпенсация ($\nu < 0$). Очевидно, что ν может быть представлена также в следующем виде

$$\upsilon = 1 - \frac{1}{\omega L \cdot 3\omega C_{\Phi}} = 1 - \frac{\omega_0^2}{\omega^2}, \quad (4.17)$$

где $\omega_0 = \sqrt{\frac{1}{3LC_{\Phi}}}$ – резонансная частота колебательного контура, образованного емкостью сети и индуктивностью дугогасящего реактора.

Активная составляющая тока I_{1a} в свою очередь состоит из двух слагаемых. Одна из них – $E_{\Phi 1} \cdot 3G$ обусловлена утечками изоляции сети и при хорошем состоянии изоляции составляет $2 \div 3\%$ от емкостного тока сети. Вторая обусловлена потерями в дугогасящем реакторе и составляет около 2% тока I_L . Активную составляющую тока принято характеризовать безразмерной величиной

$$d = \frac{I_{1a}}{I_C} = \frac{3G_{\Phi} + G_L}{3\omega C_{\Phi}}, \quad (4.18)$$

которая называется коэффициентом демпфирования или коэффициентом успокоения. Присвоение величине d именно такого термина будет ясно из дальнейшего изложения. В соответствии с приведенными выше возможными значениями проводимости изоляции сети и потерь в дугогасящем реакторе коэффициент демпфирования обычно принимают $d = 0,05$.

Емкостная составляющая высших гармоник (4.15) определяется степенью искажения фазных напряжений. В настоящее время на промышленных предприятиях все больше используются установки и технологические процессы, требующие питания постоянным током. Для получения постоянного тока применяются управляемые и неуправляемые полупроводниковые преобразователи. Нагрузки, питающиеся через полупроводниковые преобразователи, потребляют несинусоидальный ток, содержащий нечетные гармоники. Из-за падения напряжения на продольных сопротивлениях от протекания несинусоидального тока, происходит искажение фазных напряжений. Причем содержание высших гармоник тем больше, чем электрически ближе рассматриваемая точка сети к нагрузке, потребляющей несинусоидальный ток.

Сравнительно небольшие по амплитуде гармоники в фазных напряжениях создают значительный емкостный ток замыкания. Так, например, если амплитуда 11-й гармоники э.д.с. составляет 5% от амплитуды основной гармоники ($E_{\Phi 11} = 0,05E_{\Phi 1}$), то действующее значение 11-й гармоники емкостного тока замыкания равно

$$I_{11} = 0,05E_{\Phi 1} \cdot 3 \cdot 11\omega C_{\Phi} = 0,55E_{\Phi 1} 3\omega C_{\Phi},$$

то есть составляет более половины емкостного тока основной частоты. Составляющие высших гармоник, как это следует из изложенного, не компенсируются дугогасящим реактором, и при большой величине существенно ухудшают условия гашения дуги.

Далее обозначение номера первой гармоники («1») в индексе электрических величин опускаем.

Определим напряжения на неповрежденных фазах и напряжение на нейтрали при устойчивом замыкании на землю. По-прежнему считаем проводимости фаз относительно земли одинаковыми. Как следует из изложенного выше, высшие гармоники ЭДС источника оказывают существенное влияние только на ток замыкания, а на уровни напряжения практически не влияют, поэтому учитываем в напряжениях только основные гармоники.

Выражение для напряжения на нейтрали по (4.2) при таких условиях и замыкании фазы А имеет вид

$$\dot{U}_N = -\dot{E}_A \frac{\frac{1}{R_{\Pi}}}{j\left(3\omega C_{\Phi} - \frac{1}{\omega L}\right) + 3G_{\Phi} + G_L + \frac{1}{R_{\Pi}}}.$$

Поделив числитель и знаменатель на $3\omega C_{\Phi}$, после некоторых преобразований получим

$$\dot{U}_N = -\dot{E}_A \frac{(dR_{\Pi*} + 1) - j\nu R_{\Pi*}}{(dR_{\Pi*} + 1)^2 + (\nu R_{\Pi*})^2}, \quad (4.19)$$

где $R_{\Pi*} = R_{\Pi} \cdot 3\omega C_{\Phi}$ – переходное сопротивление в месте замыкания в долях от емкостного сопротивления, определяемого суммарной емкостью фаз сети относительно земли.

Абсолютное значение напряжения на нейтрали

$$U_N = \frac{E_{\Phi}}{\sqrt{(dR_{\Pi*} + 1)^2 + (\nu R_{\Pi*})^2}}. \quad (4.20)$$

Напряжение на неповрежденных фазах при тех же условиях

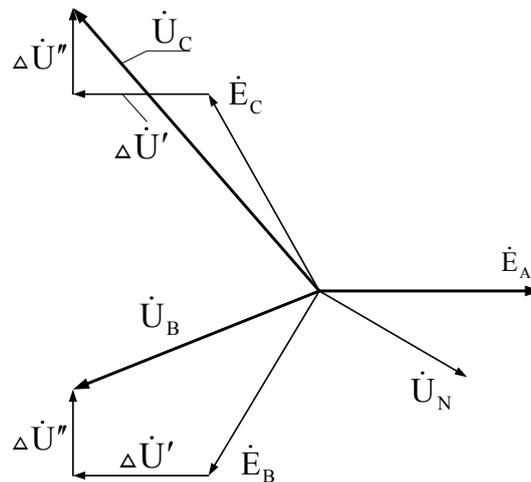
$$\begin{aligned} \dot{U}_B &= \dot{E}_B - \dot{E}_A \frac{(dR_{\Pi^*} + 1) - j\nu R_{\Pi^*}}{(dR_{\Pi^*} + 1)^2 + (\nu R_{\Pi^*})^2}; \\ \dot{U}_C &= \dot{E}_C - \dot{E}_A \frac{(dR_{\Pi^*} + 1) - j\nu R_{\Pi^*}}{(dR_{\Pi^*} + 1)^2 + (\nu R_{\Pi^*})^2}. \end{aligned} \quad (4.21)$$

Выражениям (4.21) соответствует векторная диаграмма на рис. 4.3, построенная при $\nu > 0$, то есть при недокомпенсации. С помощью этой векторной диаграммы определяем абсолютные значения напряжений на неповрежденных фазах

$$U_{C,B} = E_{\Phi} \sqrt{\left[0,5 + \frac{R_{\Pi^*} + 1}{(dR_{\Pi^*} + 1)^2 + (\nu R_{\Pi^*})^2} \right]^2 + \left[\frac{\sqrt{3}}{2} \pm \frac{\nu R_{\Pi^*}}{(dR_{\Pi^*} + 1)^2 + (\nu R_{\Pi^*})^2} \right]^2}. \quad (4.22)$$

Знак «плюс» в формуле (4.22) относится к опережающей по отношению к поврежденной фазе, а знак «минус» – к отстающей. При $\nu < 0$, то есть при перекомпенсации, знаки меняются местами.

На рис. 4.4 приведены кривые зависимости напряжений на нейтрали и на неповрежденной фазе (на которой оно наибольшее) от переходного сопротивления в месте замыкания при расстройках компенсации $\nu = 0,2$, $\nu = 0$ и для сравнения также при $\nu = 1$, что соответствует сети с изолированной нейтралью. Также как и ранее напряжение на графике отнесено к рабочей фазной ЭДС.



$$\Delta \dot{U}' = \frac{dR_{\Pi^*} + 1}{(dR_{\Pi^*} + 1)^2 + (\nu R_{\Pi^*})^2}, \quad \Delta \dot{U}'' = \frac{\nu R_{\Pi^*}}{(dR_{\Pi^*} + 1)^2 + (\nu R_{\Pi^*})^2}.$$

Рис. 4.3. Векторная диаграмма напряжений при однофазном замыкании через переходное сопротивление в компенсированной сети ($R_{\Pi^*} = 4, \nu = 0,2, d = 0,05$)

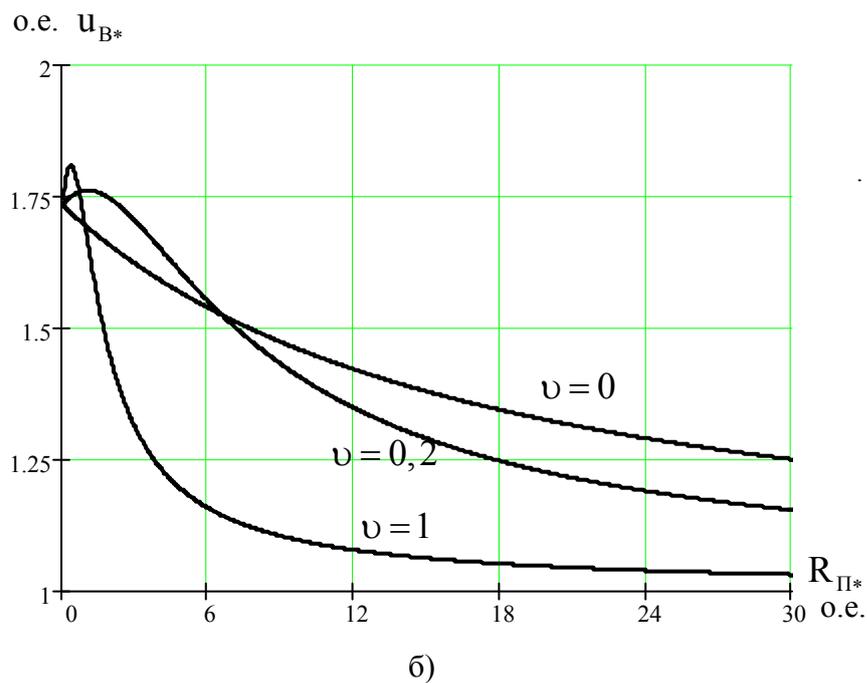
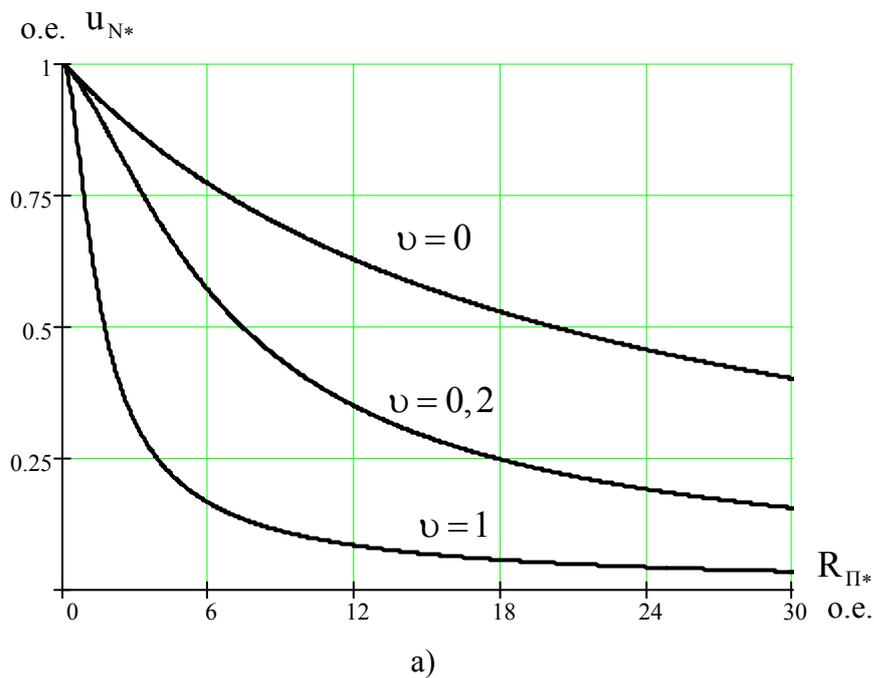


Рис. 4.4. Зависимость напряжения на нейтрали (а) и на неповрежденной фазе (б) при однофазном замыкании в компенсированной сети от переходного сопротивления и расстройки компенсации при $d = 0,05$

Из кривых рис. 4.4, б следует, что наибольшие напряжения при металлическом замыкании фазы на землю практически равны линейному напряжению независимо от значения ν . То есть в этом отношении ком-

пенсированная сеть практически не отличается от сети с изолированной нейтралью. В то же время можно сказать, что компенсированная сеть более чувствительна к замыканию на землю в том смысле, что значительное напряжение на нейтрали и соответственно возрастание напряжений на неповрежденных фазах имеют место при больших переходных сопротивлениях, чем в сети с изолированной нейтралью. Эта «чувствительность» тем выше, чем ближе настройка дугогасящего реактора к резонансной и чем меньше d . Так, например, при $R_{n^*} = 10$ и $d = 0,05$ в сети с изолированной нейтралью напряжение на опережающей фазе $u_C = 1,09E_{\phi m}$, а в сети с компенсацией емкостного тока и $\nu = 0$ $u_C = 1,45E_{\phi m}$.

4.2. Компенсированная сеть в нормальном режиме

При рассмотрении этого режима существенное значение имеет возможное различие проводимостей фаз относительно земли.

Напряжение на нейтрали в этом режиме получим по (4.2), приняв при $\nu = 1$ $C_A \neq C_B \neq C_C$, $G_A \neq G_B \neq G_C$ и $R_{\Pi} \rightarrow \infty$, ($G_{\Pi} = 0$) получим

$$\dot{U}_N = -\dot{E}_A \frac{G_A + a^2 G_B + a G_C + j\omega(C_A + a^2 C_B + a C_C)}{G_Y + G_L + j\left(\omega C_Y - \frac{1}{\omega L}\right)}.$$

Действуя также, как и при выводе выражения для напряжения смещения нейтрали, с учетом соотношений (4.17), (4.18), в которых $3C_{\phi} = C_{\Sigma}$ получим

$$\dot{U}_N = -\dot{E}_A \left[\frac{\alpha_G + j\alpha_C}{d + j\nu} \right]. \quad (4.23)$$

В нормальном режиме можно учитывать только несимметрию емкостей фаз. Тогда абсолютное значение напряжения смещения на нейтрали по (4.23) равно

$$U_{Ncm} = E_{\phi} \frac{\alpha_C}{\sqrt{d^2 + \nu^2}}. \quad (4.24)$$

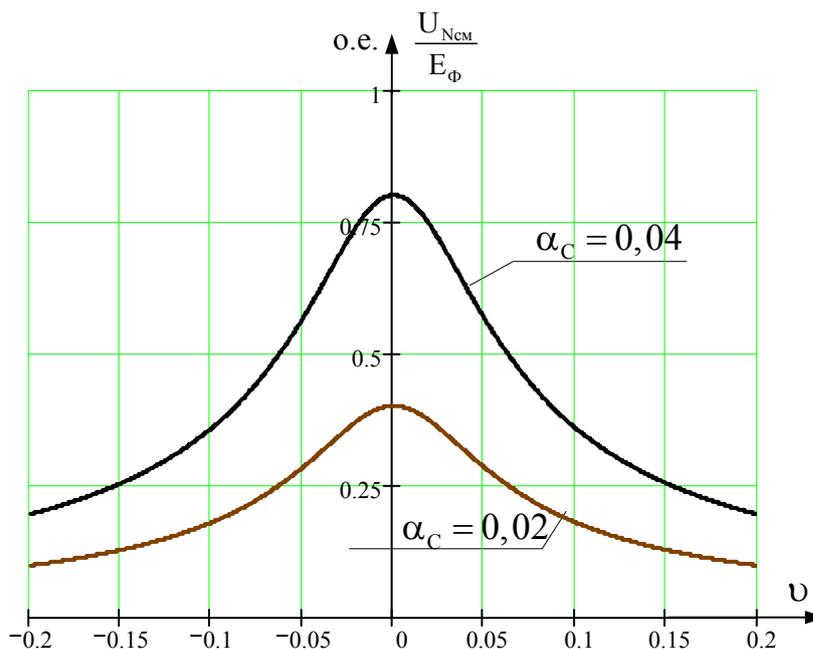


Рис. 4.5. Зависимость напряжения смещения нейтрали в компенсированной сети в нормальном режиме от расстройки компенсации при $d = 0.05$

На рис. 4.5 построены графики зависимости напряжения смещения нейтрали U_{NCM} от расстройки компенсации при различных значениях α_C . Как видно, даже при небольших значениях коэффициента несимметрии, напряжение смещения нейтрали, при настройке дугогасящего реактора близкой к резонансной, может быть большим, а это в свою очередь приводит к повышению напряжений на фазах относительно земли.

Напряжение несимметрии в кабельных сетях практически равно нулю, по причине указанной выше, а в воздушных сетях может быть значительным. У воздушных линий 35 кВ в зависимости от расположения проводов фаз на опоре коэффициент емкостной несимметрии лежит в пределах примерно от 0,015 до 0,04 [15]. Поэтому напряжение смещения нейтрали при настройках дугогасящего реактора близких к резонансным иногда достигают недопустимых значений. По правилам устройства электроустановок в длительном рабочем режиме сети напряжение смещения нейтрали допускается не более 15% от номинального фазного напряжения и не более 30% в течение одного часа. Для снижения коэффициента несимметрии, а следовательно, и напряжения смещения нейтрали, производится транспонирование проводов фаз, что приводит в среднем по всей сети к выравниванию расположения проводов относительно земли. По существующим правилам с помощью

транспозиции проводов фаз коэффициент емкостной несимметрии сети должен быть снижен до значения не более 0,0075. Однако это не исключает возникновения несимметрии при неполнофазном включении или отключении выключателей отдельных присоединений, обрывах фаз т.п.

При прочих равных условиях напряжение смещения нейтрали в неполнофазном режиме будет меньше, если в нормальном режиме дугогасящий реактор был настроен с перекомпенсацией, так как при отключении на каком-либо участке одной или двух фаз суммарная емкость сети уменьшается, что приводит к еще большей перекомпенсации, то есть к удалению от резонансной настройки. Очевидно, что при недокомпенсации картина будет обратной.

С этой точки зрения режим небольшой перекомпенсации является предпочтительным по сравнению с недокомпенсацией.

4.3. Переходные процессы при замыкании на землю в сети с компенсацией емкостного тока

Рассмотрим влияние дугогасящего реактора на переходные процессы при зажигании и гашении заземляющей дуги. Схема замещения для анализа переходных процессов приведена на рис. 4.6. На этой схеме не показаны активные сопротивления проводов фаз, так как на характер рассматриваемых электрических величин и, в частности, на затухание свободных составляющих тока и напряжения оказывают влияние не только эти сопротивления, но и результирующее сопротивление $R_{\text{экв}}$, в состав которого входит сопротивление на пути возврата тока замыкания через землю, а в кабельных сетях и сопротивление проводящей оболочки кабелей. Причем сопротивление $R_{\text{экв}}$ различно для разных стадий переходного процесса. Например, для переходных составляющих высокой частоты оно может увеличиваться из-за поверхностного эффекта. Поэтому для переходных составляющих, как и ранее, принимаются коэффициенты затухания, сведения о значении которых имеются в [4].

При зажигании дуги так же как и в сети с изолированной нейтралью происходит дозаряд емкостей неповрежденных фаз до линейного напряжения. Дугогасящий реактор на этот процесс практически никакого влияния не оказывает, так как он оказывается зашунтированным индуктивностью поврежденной фазы, которая во много раз меньше индуктивности дугогасящего реактора. Поэтому дозаряд емкостей неповрежденных фаз сопровождается затухающими колебаниями, на частоту и скорость затухания которых дугогасящий реактор практически не влияет.

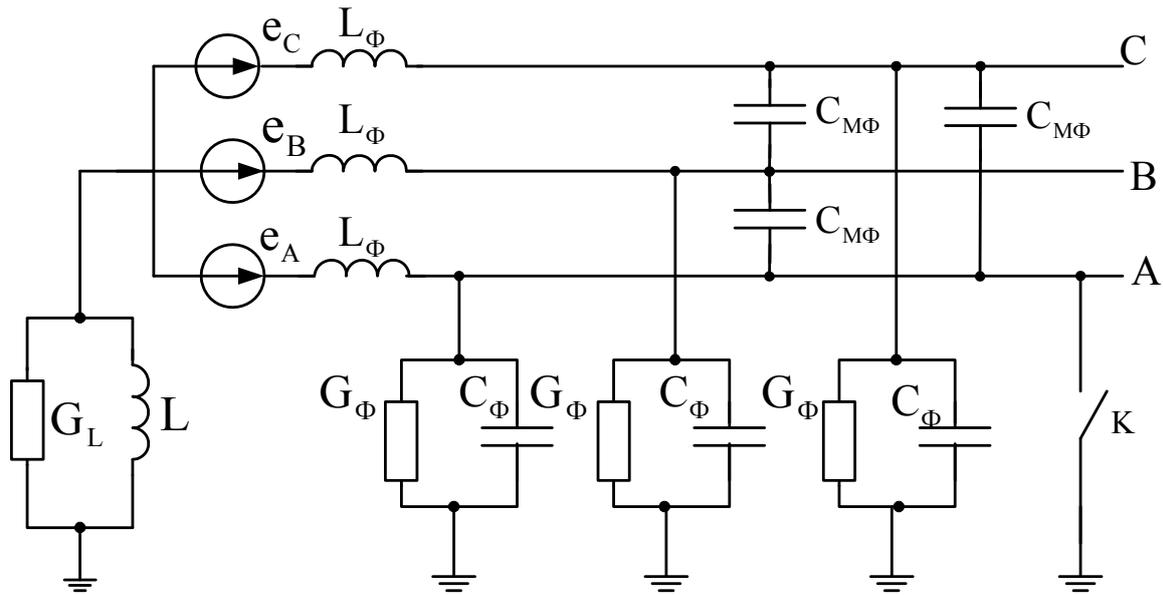


Рис. 4.6. Трехфазная схема замещения для анализа переходных процессов в сети с компенсацией емкостных токов

Как видно из схемы (рис. 4.6), в момент замыкания дугогасящий реактор подключается к э.д.с. источника поврежденной фазы, что вызывает определенный переходный процесс изменения тока дугогасящего реактора.

Если учесть, что индуктивности фаз $L_\phi \ll L$, можно принять $L_\phi \approx 0$. Тогда схема электрической цепи для этого переходного процесса примет вид, показанный на рис. 4.7.

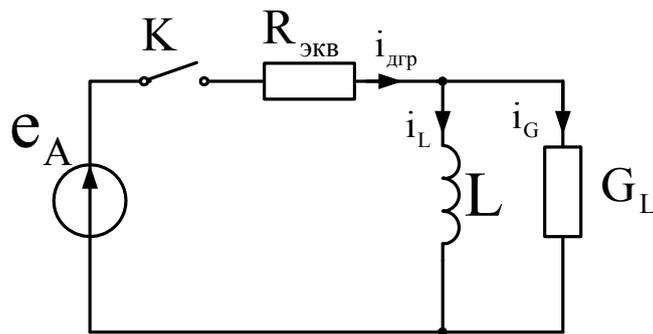


Рис. 4.7. Схема замещения для анализа переходных процессов в цепи дугогасящего реактора при замыкании на землю

Переходный процесс в цепи дугогасящего реактора (рис. 4.7) описывается дифференциальным уравнением

$$L \left(\frac{1}{R_{\text{экв}}} + G_L \right) \frac{di_L}{dt} + i_L = \frac{e_A}{R_3}. \quad (4.25)$$

Если принять, что в момент замыкания начальная фаза э.д.с. имеет некоторое значение φ_3 , а начальное значение тока $i_L = 0$, то решение уравнения (4.25) будет иметь вид

$$i_L = I_m \sin(\omega t + \varphi_3 - \varphi) - [I_m \sin(\varphi_3 - \varphi)] e^{-t/\tau_L}, \quad (4.26)$$

где

$$I_m = \frac{E_{\Phi m}}{\sqrt{R_{\text{экв}}^2 + \omega^2 L^2}}, \quad \varphi = \arctg \frac{\omega L}{R_3}, \quad \tau_L = L \left(\frac{1}{R_{\text{экв}}} + G_L \right).$$

Реальные параметры дугогасящего реактора таковы, что $\omega L \gg R_3$ и поэтому $\varphi \approx 90^\circ$. Замыкание на землю происходит в подавляющем большинстве случаев в результате пробоя изоляции, когда напряжение на поврежденной фазе близко к максимальному значению, то есть $\varphi_3 \approx 90^\circ$. При таких условиях, как видно из (4.26), аперiodическая составляющая тока близка к нулю, поэтому эту составляющую переходного тока замыкания далее не учитываем.

Таким образом, в целом можно считать, что переходный процесс установления электрических величин после замыкания на землю (зажигания дуги) в компенсированной сети практически не отличается от переходного процесса в сети с изолированной нейтралью.

После гашения дуги, напротив, дугогасящий реактор оказывает решающее влияние на переходный процесс, так как он существенно изменяет проводимость сети относительно земли, и поэтому изменяет характер переходного процесса стекания избыточных зарядов и, следовательно, характер изменения напряжения на нейтрали.

Процесс изменения напряжения на нейтрали после гашения дуги может быть рассмотрен по схеме замещения, представленной на рис. 4.8.

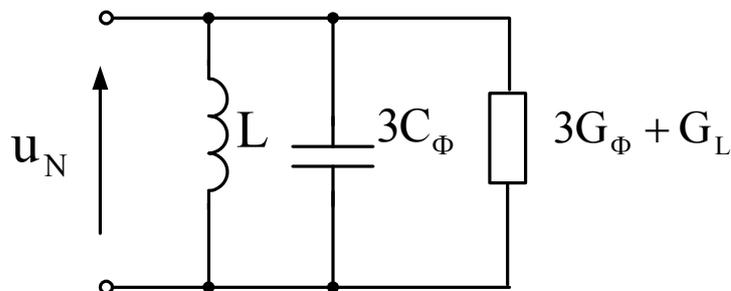


Рис. 4.8. Схема замещения сети с компенсацией емкостных токов после гашения дуги в месте замыкания

Как видно, эта схема представляет собой колебательный контур, переходный процесс в котором описывается дифференциальным уравнением

$$\frac{d^2 u_N}{dt^2} + \frac{(3G_\Phi + G_L)}{3C_\Phi} \frac{du_N}{dt} + \frac{1}{L3C_\Phi} u_N = 0, \quad (4.27)$$

где u_N – мгновенное значение напряжения свободных колебаний.

С учетом (4.17) и (4.18) уравнение (4.27) можно представить в виде

$$\frac{d^2 u_N}{dt^2} + \omega d \frac{du_N}{dt} + \omega^2 (1 - \nu) u_N = 0. \quad (4.28)$$

Корни характеристического уравнения, соответствующего (4.28) являются комплексными сопряженными, так как практически всегда $\left(\frac{d}{2}\right)^2 \ll (1 - \nu)$, и равны

$$p_{1,2} = \left[\frac{d}{2} \pm \sqrt{\left(\frac{d}{2}\right)^2 - (1 - \nu)} \right] \omega.$$

Поэтому решение уравнения (4.28) имеет вид

$$u_N = U_{Nm} e^{-\frac{d}{2}\omega t} \sin(\omega_3 t + \varphi_{N0}), \quad (4.29)$$

где $\omega_3 = \omega \sqrt{(1 - \nu) - \left(\frac{d}{2}\right)^2}$ – частота свободных колебаний переходного процесса изменения напряжения на нейтрали;
 U_{Nm} , φ_{N0} – начальная амплитуда и начальная фаза свободных колебаний напряжения на нейтрали.

Дополнительно следует также отметить, что с достаточно высокой точностью можно полагать, что $\omega_3 \approx \omega \sqrt{(1 - \nu)}$, так как, как указано выше, $\left(\frac{d}{2}\right)^2 \ll (1 - \nu)$.

После обрыва дуги свободные колебания по (4.29) накладываются на рабочие напряжения всех трех фаз. На поврежденной фазе мгновенное значение результирующего напряжения равно

$$u_A = e_A + u_N. \quad (4.30)$$

Значения U_{Nm} , φ_{N0} определяются начальными мгновенными значениями напряжения (u_{N0}) и тока (i_{L0}) в контуре (рис. 4.8) в момент гашения дуги. Принимая во внимание, что на частоте свободных колебаний ω_3 $\frac{1}{\omega_3 L} \gg 3G_\Phi + G_L$, можно считать для токов в контуре

$$i_C = 3C_\Phi \frac{du_N}{dt} \approx i_L. \quad (4.31)$$

Таким образом, если момент гашения дуги принимается за начало переходного процесса изменения напряжения на нейтрали, то из начальных условий при $t = 0$: $u_N = u_{N0}$, $i_L = i_{L0}$ из (4.29), (4.31) получим следующие уравнения для определения U_{Nm} , φ_{N0}

$$\begin{aligned} u_{N0} &= U_{Nm} \sin(\varphi_{N0}); \\ i_{L0} &= 3C_\Phi \omega_3 U_{Nm} \cos(\varphi_{N0}). \end{aligned} \quad (4.32)$$

Решая уравнения системы (4.32) получим

$$\begin{aligned} U_{Nm} &= \sqrt{u_{N0}^2 + \left(\frac{i_{L0}}{\omega_3 3C_\Phi} \right)^2}; \\ \operatorname{tg} \varphi_{N0} &= \frac{u_{N0} \omega_3 3C_\Phi}{i_{L0}}. \end{aligned} \quad (4.33)$$

Таким образом, начальные условия для решения (4.29) различны в зависимости от того в какой момент гаснет дуга после предыдущего ее зажигания. Процесс формирования начальных условий и последующего изменения напряжения на нейтрали и на поврежденной фазе, в случае, если дуга гаснет при первом прохождении через нуль свободной составляющей тока, рассмотрим при тех же условиях, при которых построены кривые переходного процесса для сети с изолированной нейтралью (рис. 3.14). В рассмотренном примере ток дугогасящего реактора до замыкания был равен нулю и за время горения дуги, равном $\frac{T_1}{2}$ практически не изменяется, так как постоянная времени цепи дугогасящего реактора намного больше, чем время горения дуги. Поэтому, полагая в (4.33) $i_{L0} = 0$, получим $U_{Nm} = u_{N0}$, $\varphi_{N0} = 90^\circ$. Следовательно, напряжение на нейтрали после погасания дуги изменяется по закону

$$u_N = U_{Nm} e^{-\frac{d}{2} \omega t} \cos(\omega_3 t). \quad (4.34)$$

В момент гашения дуги сумма напряжений $e_A + u_N \neq 0$, поэтому, также как и в сети с изолированной нейтралью, имеет место переходный процесс восстановления напряжения на поврежденной фазе с частотой ω_2 и формирование определенного пика гашения.

Если пробивное напряжение дугового промежутка больше $u_{п.г}$, то далее напряжение на поврежденной фазе с учетом (4.34) изменяется по закону

$$u_N = -E_{\phi m} \cos\left(\omega\left(t + \frac{T_1}{2}\right)\right) + U_{Nm} e^{-\frac{d}{2}\omega t} \cos(\omega_3 t). \quad (4.35)$$

При получении (4.35) принято, что замыкание произошло в момент времени $t_1 = \frac{3}{2\pi\omega}$. В дальнейшем, также как и ранее, влиянием небольшого начального сдвига $\omega\frac{T_1}{2}$ на мгновенные значения э.д.с. пренебрегаем.

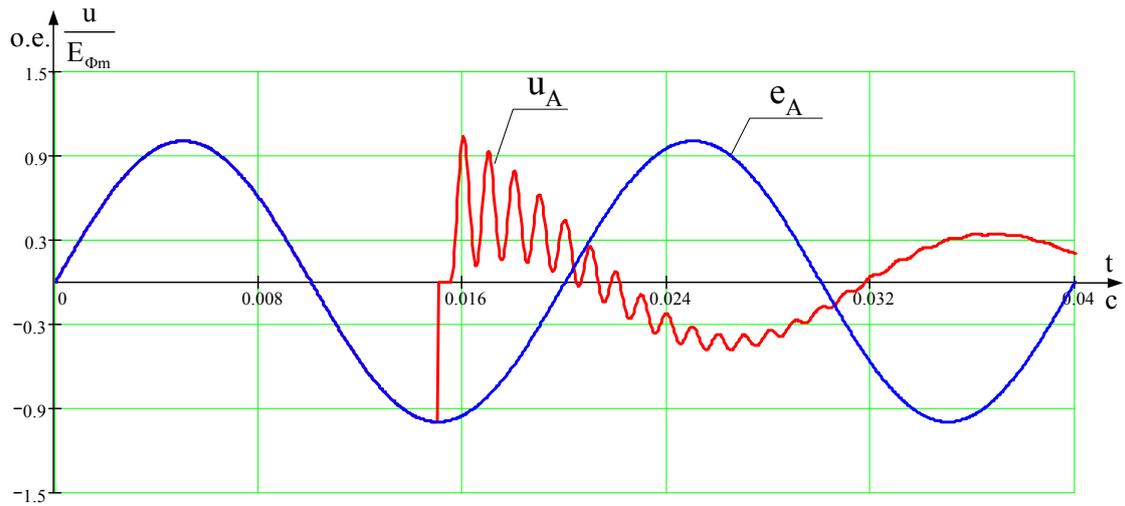
При числовых данных, принятых в главе 3, в момент гашения дуги $u_{N0} = 1,48E_{\phi m}$. На рис. 4.9 иллюстрируются описываемые переходные процессы при получении которых принято: $t = 0$, $d = 0,05$, $T_1 = 10^{-3}$ с, $\nu = 0$. Процессы изменения напряжения на поврежденной фазе и напряжения на нейтрали показаны в разных масштабах времени – для 2-х периодов промышленной частоты (рис. 4.9, а, б, в) и для 20 периодов (рис. 4.9, г, д).

Далее рассмотрим процесс, когда дуга гаснет при прохождении через нуль принужденной составляющей тока замыкания. Из (4.16) и (4.18) следует, что параметры ν и d равны соответственно реактивной и активной составляющим тока замыкания, отнесенным к суммарному емкостному току, поэтому мгновенное значение установившегося тока замыкания связано с установившемся напряжением на нейтрали $u_N = -E_{\phi m} \sin(\omega t)$ следующим образом

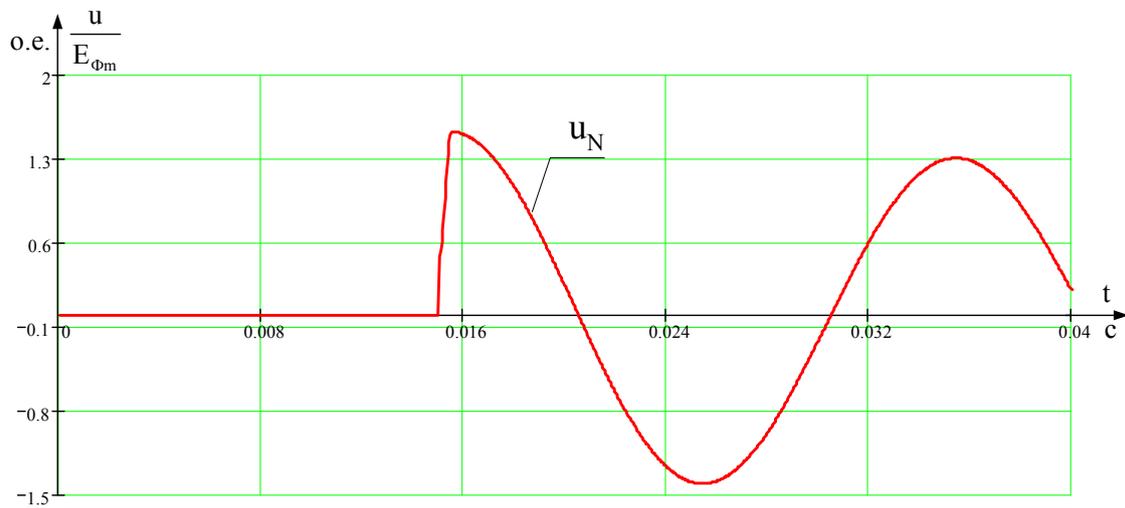
$$i_3 = -E_{\phi m} 3C_{\phi} \omega (d \sin \omega t + \nu \cos \omega t). \quad (4.36)$$

Момент перехода тока замыкания через нуль определяется решением уравнения (4.36) при $i_3 = 0$, что дает

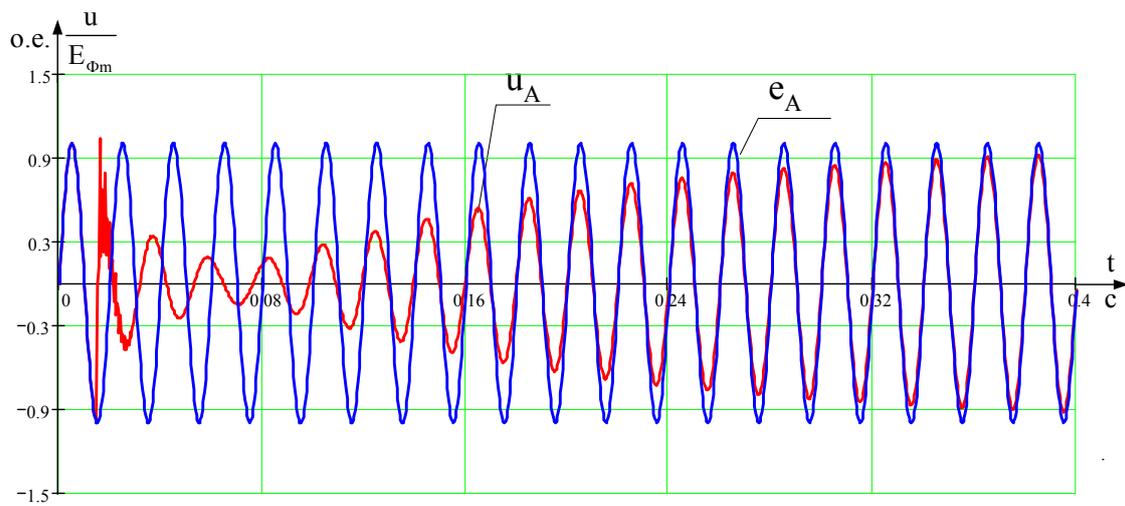
$$\varphi_{\text{гаш}} = \omega t_{\text{гаш}} = \text{arctg}\left(-\frac{\nu}{d}\right), \quad (4.37)$$



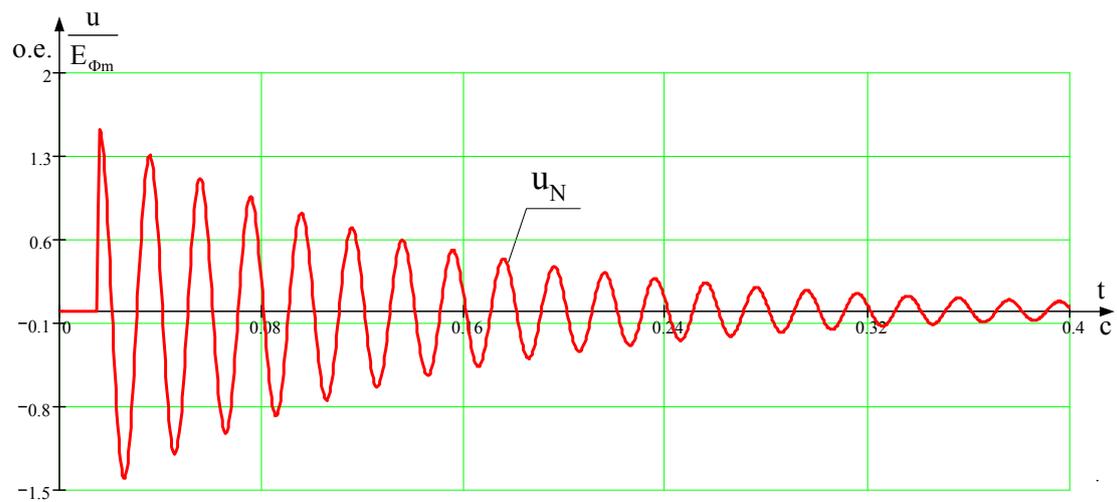
а



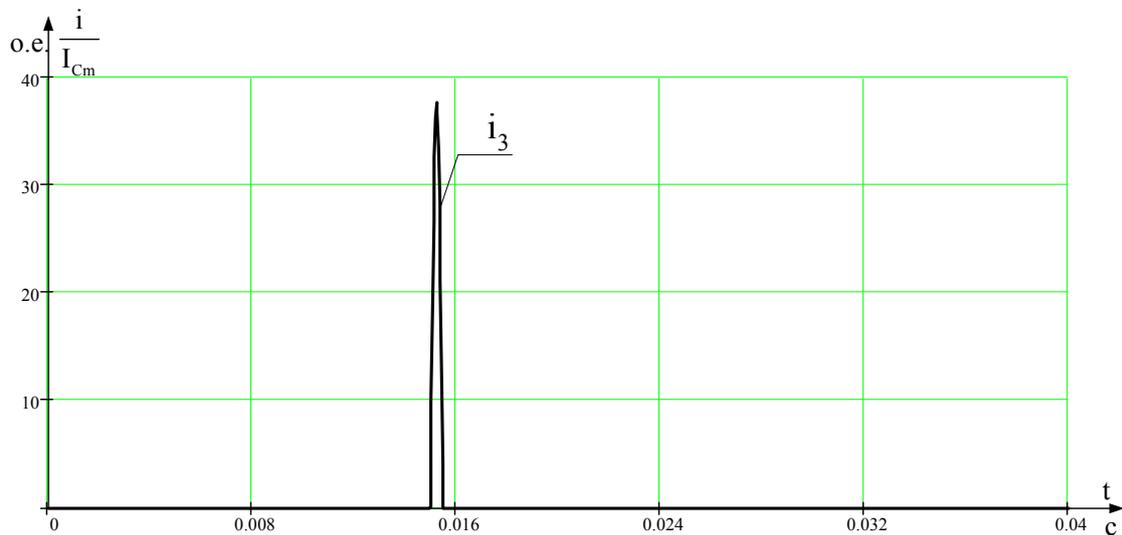
б



в



Г



Д

Рис. 4.9.

- а – процесс восстановления напряжения на поврежденной фазе в течение двух полупериодов промышленной частоты;
- б – напряжение на нейтрали в течение двух полупериодов промышленной частоты;
- в – процесс восстановления напряжения на поврежденной фазе в течение десяти полупериодов промышленной частоты;
- г – напряжение на нейтрали в течение десяти полупериодов промышленной частоты;
- д – свободная составляющая тока замыкания;
(дуга гаснет при первом прохождении через нуль)

где $\varphi_{\text{гаш}}$ – фазовый угол между моментами прохождения через нуль э.д.с. источника поврежденной фазы и тока замыкания.

При гашении дуги, когда через нуль проходит принужденная составляющая тока замыкания, при любом сочетании ν и d мгновенное значение ЭДС источника поврежденной фазы противоположно по знаку напряжению на нейтрали, то есть $e_A + u_N = 0$. Поэтому высокочастотный процесс восстановления напряжения отсутствует и напряжение на поврежденной фазе с момента гашения дуги изменяется в соответствии со следующим соотношением

$$u_A = E_{\Phi m} \left[\sin(\omega t + \varphi_{\text{гаш}}) - e^{-\frac{d}{2}\omega t} \sin(\omega_3 t + \varphi_{\text{гаш}}) \right]. \quad (4.38)$$

Процесс восстановления напряжения на поврежденной фазе по (4.38) при $\nu = 0,05$ и $d = 0,05$ иллюстрируется на рис. 4.10.

Таким образом, как видно из рис. 4.10, в целом заземление нейтрали через дугогасящий реактор, настроенный в резонанс с суммарной емкостью сети относительно земли, приводит к существенному замедлению восстановления напряжения на поврежденной фазе. Это обстоятельство является одним из факторов способствующих гашению дуги, так как за время восстановления напряжения может происходить деионизация дугового промежутка.

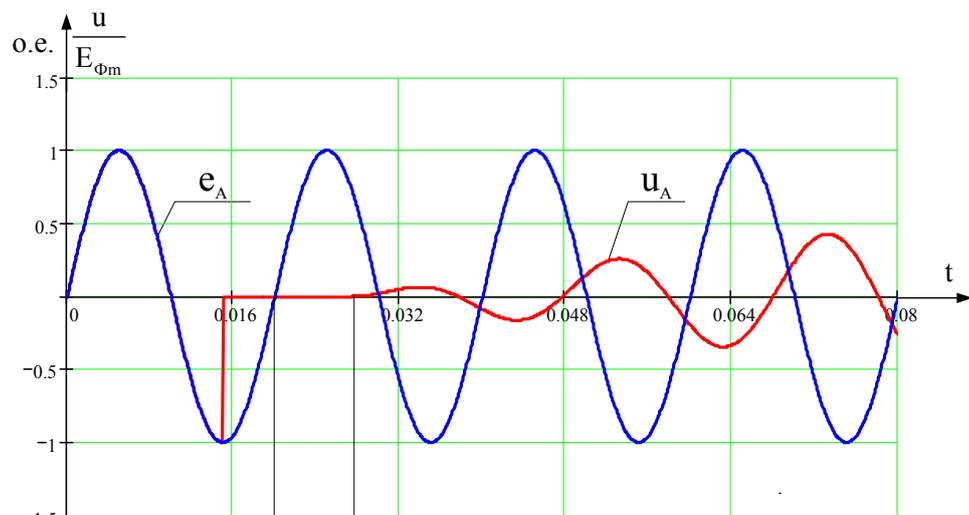
Далее рассмотрим процесс восстановления напряжения на поврежденной фазе более детально для того, чтобы выяснить влияние различных факторов на скорость восстановления напряжения. Проводимый ниже анализ получается более простым и наглядным в случае погасания дуги при прохождении принужденной составляющей тока через нуль, поэтому за основу принимаем соотношение (4.38).

Графики восстанавливающегося напряжения, построенные в соответствии с (4.36) и (4.38) при различных сочетаниях ν и d , приведены на рис. 4.11. При точной настройке компенсации ($\nu = 0$) и $d \neq 0$, как следует из (4.42), $\omega_3 \approx \omega$ и поэтому

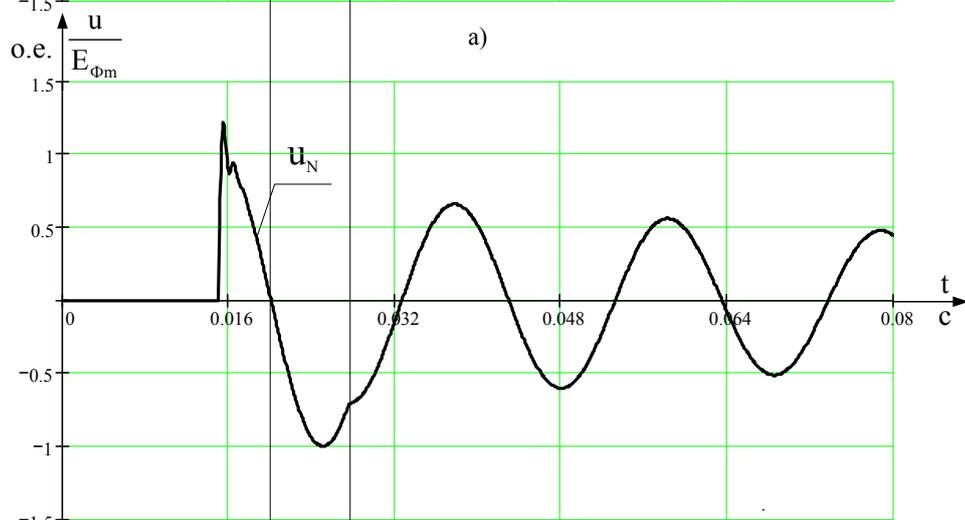
$$u_A = \left(1 - e^{-\frac{d}{2}\omega t} \right) E_{\Phi m} \sin(\omega t + \varphi_{\text{гаш}}). \quad (4.39)$$

Таким образом, при точной настройке компенсации напряжение на поврежденной фазе восстанавливается по экспоненциальному закону с постоянной времени $\tau_b = \frac{2}{d\omega}$. При $\nu = 0$ в процессе восстановления на-

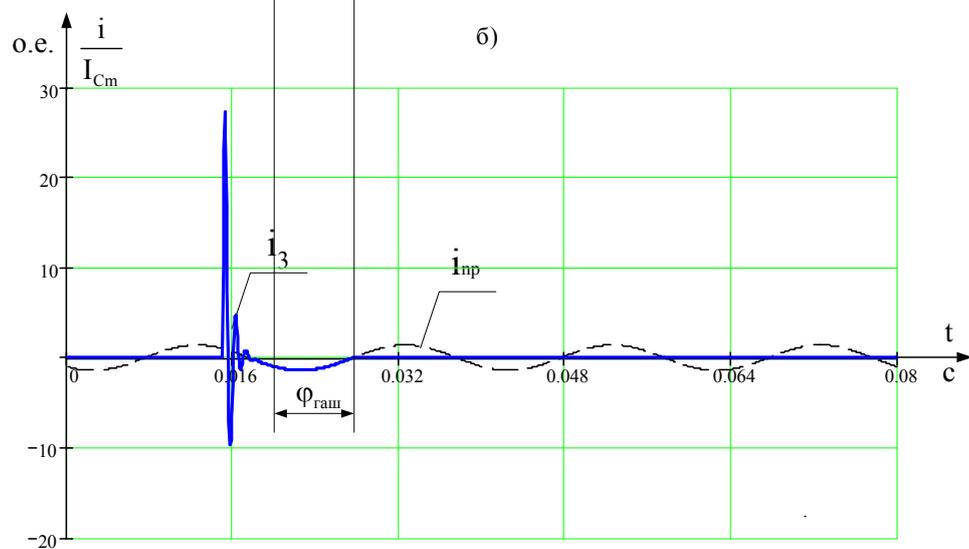
пряжение не повышается выше амплитуды фазного рабочего напряжения.



а)

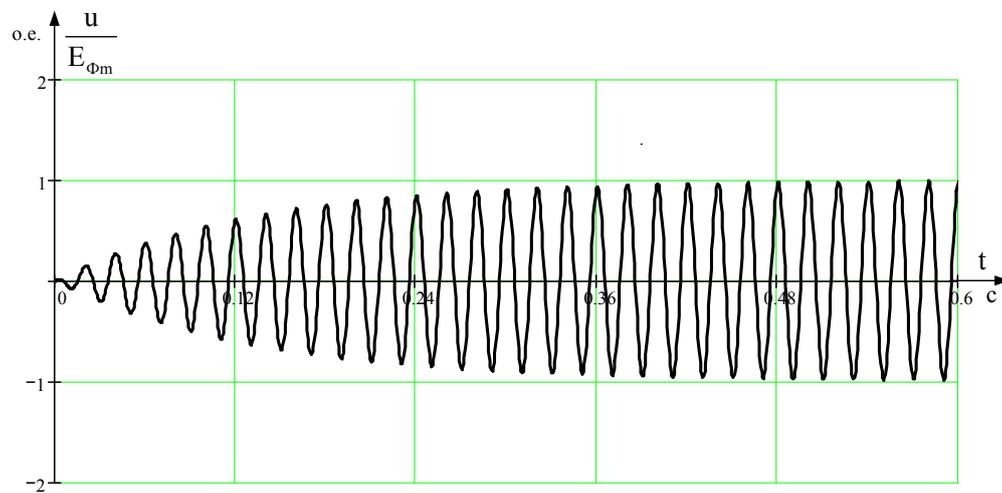


б)

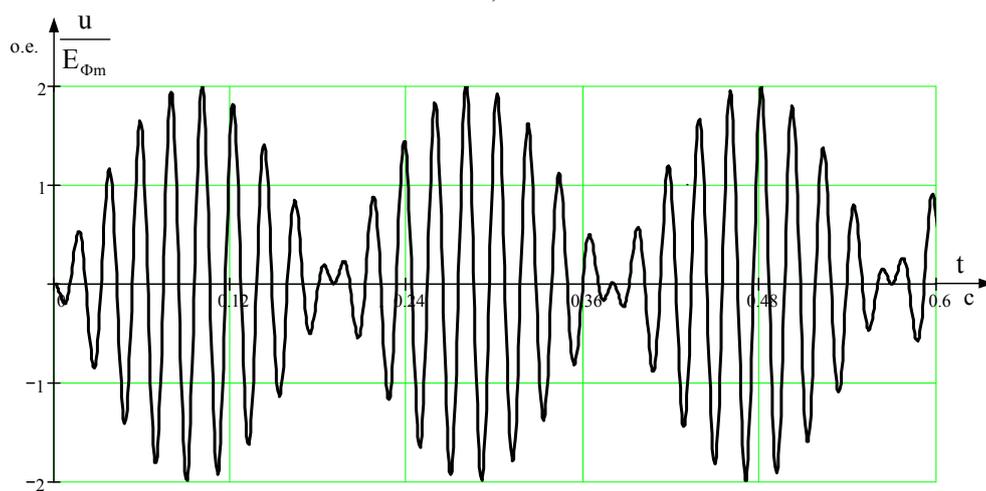


в)

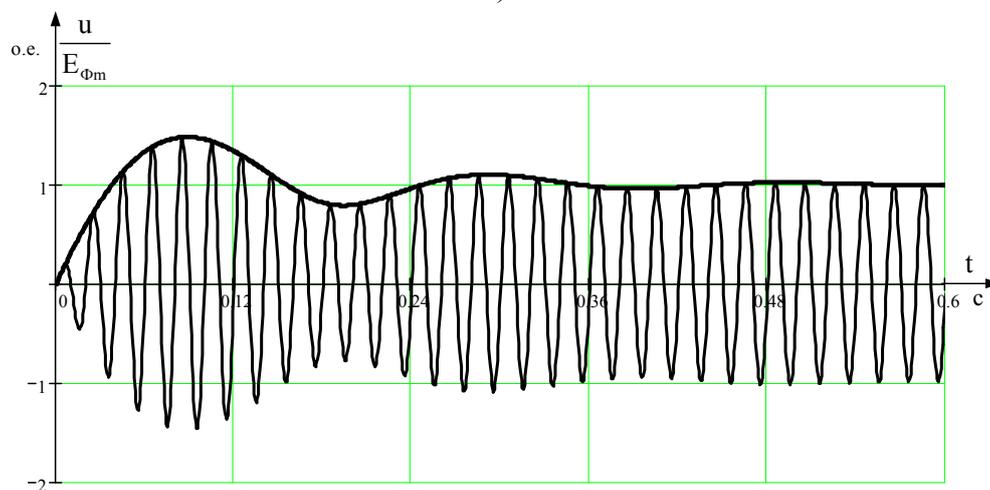
Рис. 4.10. Процесс восстановления напряжения на поврежденной фазе и на нейтрали после гашения дуги при первом прохождении через нуль принужденной составляющей тока замыкания при $\nu = 0,05$ и $d = 0,05$



а)



б)



в)

Рис. 4.11. Восстанавливающееся напряжение на поврежденной фазе после гашения дуги

а – при $\nu = 0$, $d = 0.05$; б – при $\nu = 0.2$, $d = 0$; в – при $\nu = 0.2$, $d = 0.05$

Если принять практически нереальный случай, когда $\nu \neq 0$ и $d = 0$, и учесть, что при этом $\omega_3 = \omega\sqrt{1-\nu}$, получим

$$u_A = 2E_{\Phi m} \sin\left(\frac{1-\sqrt{1-\nu}}{2}\omega t\right) \cdot \cos\left(\frac{1+\sqrt{1-\nu}}{2}\omega t + \varphi_{\text{гаш}}\right). \quad (4.40)$$

В этом случае напряжение на поврежденной фазе представляет собой процесс, который принято называть биением (рис. 4.11, б). Частота огибающей биений равна полуразности рабочей частоты сети и частоты свободных колебаний напряжения на нейтрали $\frac{1}{2}(\omega - \omega_3) = \frac{1}{2}\omega(1 - \sqrt{1-\nu})$, а частота изменяющегося напряжения – полусумме этих частот $\frac{1}{2}(\omega + \omega_3) = \frac{1}{2}\omega(1 + \sqrt{1-\nu})$.

Очевидно, что при отсутствии потерь ($d = 0$) свободные колебания существовали бы бесконечно долго, что, безусловно, недопустимо, так как при этом длительно искажались бы фазные напряжения, даже после окончательного погасания дуги. Потери приводят к затуханию (демпфированию колебаний), чем и объясняется присвоение коэффициенту d термина коэффициент демпфирования.

В реальных сетях необходимо учитывать, что одновременно $\nu \neq 0$ и $d \neq 0$. В этом случае напряжение на поврежденной фазе также имеет характер биений с одновременным затуханием амплитуды (рис. 4.11, в).

Отклонение настройки дугогасящего реактора от резонансной, как видно, может привести к тому, что, спустя некоторое время, напряжение на поврежденной фазе даже превысит рабочее фазное напряжение. Однако и в этом случае скорость восстановления напряжения значительно меньше, чем в сети с изолированной нейтралью, так как она определяется не рабочей частотой сети, а частотой огибающей напряжения по (4.40). Даже при больших, редко имеющих место, расстройках компенсации частота огибающей много меньше рабочей частоты. Так, например, при $\nu = 0,2$ и $\nu = -0,2$ частоты огибающей соответственно равны $0,052\omega$ и $0,048\omega$.

Следует также отметить, что напряжения на неповрежденных фазах при переходе к нормальным фазным напряжениям после гашения дуги также имеют характер биений, так как

$$\begin{aligned} u_B &= e_B + u_N, \\ u_C &= e_C + u_N. \end{aligned} \quad (4.41)$$

4.4. Перенапряжения при дуговых замыканиях в сети с компенсацией емкостных токов

Вопросы о перенапряжениях при повторных зажиганиях заземляющей дуги в сетях с компенсацией емкостного тока исследован в ряде работ, но наиболее глубоко в [4]. Излагаемый ниже материал построен в основном на использовании этой работы.

Механизм формирования напряжений на неповрежденных фазах при дуговых замыканиях в сети с компенсацией емкостного тока такой же, как и в сети с изолированной нейтралью. Это объясняется тем, что заземление нейтрали через дугогасящий реактор не влияет на переходный процесс изменения зарядов емкостей неповрежденных фаз, вызванный замыканием на землю (начинающийся в момент зажигания дуги). В той же степени здесь возможны допущения, принимаемые для рассмотрения этого вопроса в сети с изолированной нейтралью. Например, допущения о неизменности принужденного напряжения на неповрежденной фазе за половину периода свободных колебаний частоты ω_1 . Поэтому в общем случае максимальное значение напряжения на неповрежденных фазах спустя время, равное $\frac{T_1}{2} = \frac{\pi}{\omega_1}$ после очередного зажигания дуги может быть определено (для фазы В) следующим образом

$$u_{\text{ВМ}} = e_{\text{АВ}}(t_1) + [e_{\text{АВ}}(t_{\text{п}}) - u_{\text{В}}(t_{\text{п}})](1 - k_{\delta 1})(1 - k_{\text{С}}). \quad (4.42)$$

Выражение в квадратных скобках в (4.42) – есть начальная амплитуда свободной составляющей напряжения частоты ω_1 без учета влияния междуфазных емкостей. Как было показано выше (3.18), эта величина равна напряжению на поврежденной фазе в момент зажигания дуги. Следовательно,

$$u_{\text{ВМ}} = e_{\text{АВ}}(t_1) + u_{\text{А}}(t_1)(1 - k_{\delta 1})(1 - k_{\text{С}}). \quad (4.43)$$

Далее необходимо выявить условия, при которых величина $u_{\text{ВМ}}$ имеет возможные наибольшие значения и, что важно в данном случае, зависимость этого наибольшего значения от расстройки компенсации ν .

Сначала выявим условия, при которых после погасания дуги восстанавливающееся напряжение на поврежденной фазе по (4.39) или по (4.40) имеет максимальное значение. Очевидно, что это будет иметь место, когда э.д.с. поврежденной фазы источника и напряжение свобод-

ных колебаний на нейтрали одновременно достигают амплитудных значений одного знака или, что одно и то же, когда достигается максимум огибающей биений напряжения на поврежденной фазе.

Из-за отличия частот э.д.с. источника и свободных колебаний напряжения на нейтрали фазовый сдвиг между ними изменяется по закону $\Delta\varphi = (\omega - \omega_3)t$. Совмещение амплитуд e_A и u_N , как следует из (4.39), (4.40), имеет место спустя время t_M после гашения дуги, удовлетворяющее условию

$$(\omega - \omega_3)t_M = \pm\pi. \quad (4.44)$$

Знак «+» в (4.44) соответствует недокомпенсации ($\nu > 0$), когда $\omega > \omega_3$, а знак «-» перекомпенсации ($\nu < 0$), когда $\omega < \omega_3$. Далее, принимая, как и ранее, $\omega_3 \approx \omega\sqrt{1-\nu}$, отрезок времени t_M будем определять по формуле

$$t_M = \frac{\pi}{\omega|1 - \sqrt{1-\nu}|}. \quad (4.45)$$

Таким образом, максимальное напряжение на поврежденной фазе при условии, когда дуга гаснет при прохождении через нуль суммарного тока замыкания в соответствии с (4.35) равно

$$u_{AM} = E_{\Phi m} + U_{Nm} e^{-\frac{d}{2}\omega t_M}. \quad (4.46)$$

При гашении дуги при прохождении через нуль принужденного значения тока замыкания по (4.38) получим

$$u_{AM} = E_{\Phi m} + E_{\Phi m} e^{-\frac{d}{2}\omega t_M}. \quad (4.47)$$

На рис. 4.12 представлена зависимость наибольшего напряжения u_{AM} от расстройки компенсации, полученная по соотношениям (4.46) и (4.47). Из этой зависимости следует, что ожидаемые перенапряжения существенно зависят от расстройки компенсации.

Чтобы получить оценку теоретически возможных перенапряжений, следует учесть следующую особенность переходных процессов в компенсированной сети, заключающуюся в том, что в момент, когда достигается максимум напряжения на поврежденной фазе, принужденное напряжение на неповрежденных фазах может иметь любое значение, в том числе и максимальное, равное $\sqrt{3}E_{\Phi m}$. Это объясняется, во-первых, тем, что частота восстанавливающегося напряжения на поврежденной фазе

$\omega \frac{1 + \sqrt{1 - \nu}}{2}$ в общем случае не кратна рабочей частоте источника питания. Во-вторых, важно также и то, что период биений в реальном диапазоне возможных значений расстройки компенсации ν значительно больше периода переменного напряжения на нейтрали. Поэтому в область максимума огибающей попадает несколько амплитуд напряжения на поврежденной фазе, близких по значению к u_{AM} по (4.46) или по (4.47).

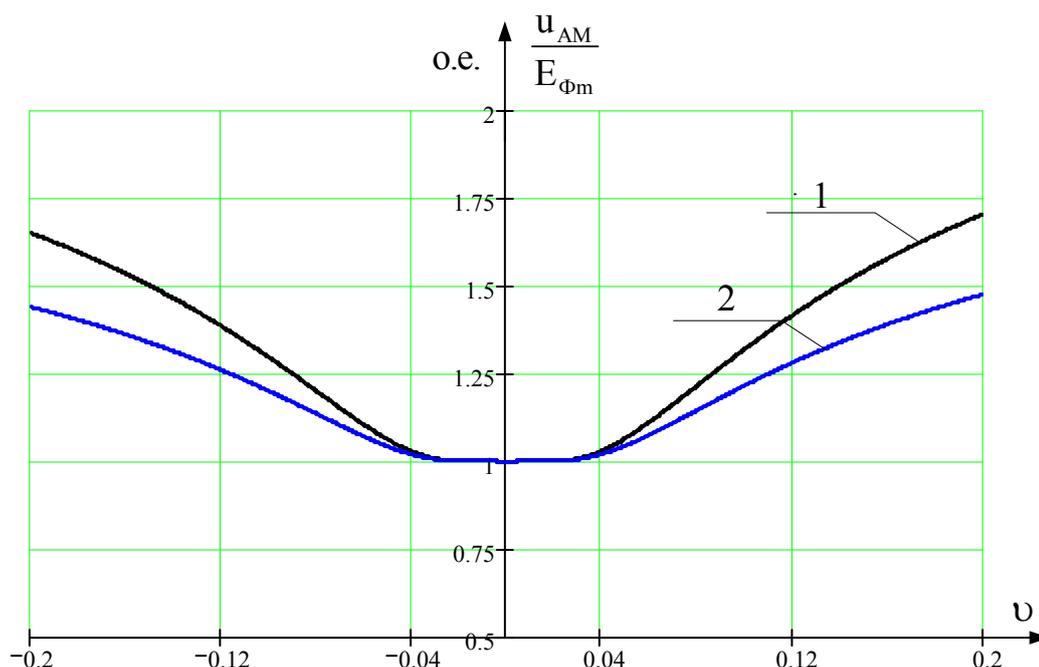


Рис. 4.12. Максимальное восстанавливающееся напряжение на поврежденной фазе после гашении дуги при $d = 0,05$
 1 – при прохождении через нуль суммарного тока замыкания;
 2 – при прохождении через нуль принужденного значения тока замыкания

Например, при недокомпенсации в 20% ($\nu = 0,2$) амплитуды напряжения в моменты времени опережающие и отстающие от момента t_M на $\frac{2\pi}{\omega_3}$ снижаются всего лишь на 6% (рис. 4.13).

Как видно, в области максимума огибающей на поврежденной фазе повторное зажигание дуги может произойти вблизи момента одного из максимумов напряжения. Из (4.43) следует, что максимальное перенапряжение будет при зажигании дуги, например, в момент t_3 (рис. 4.13), так как в этот момент и напряжение на поврежденной фазе практи-

чески наибольшее и принужденное напряжение на неповрежденной фазе близко к амплитудному.

Таким образом, при принятых условиях расчетное перенапряжение будет равно

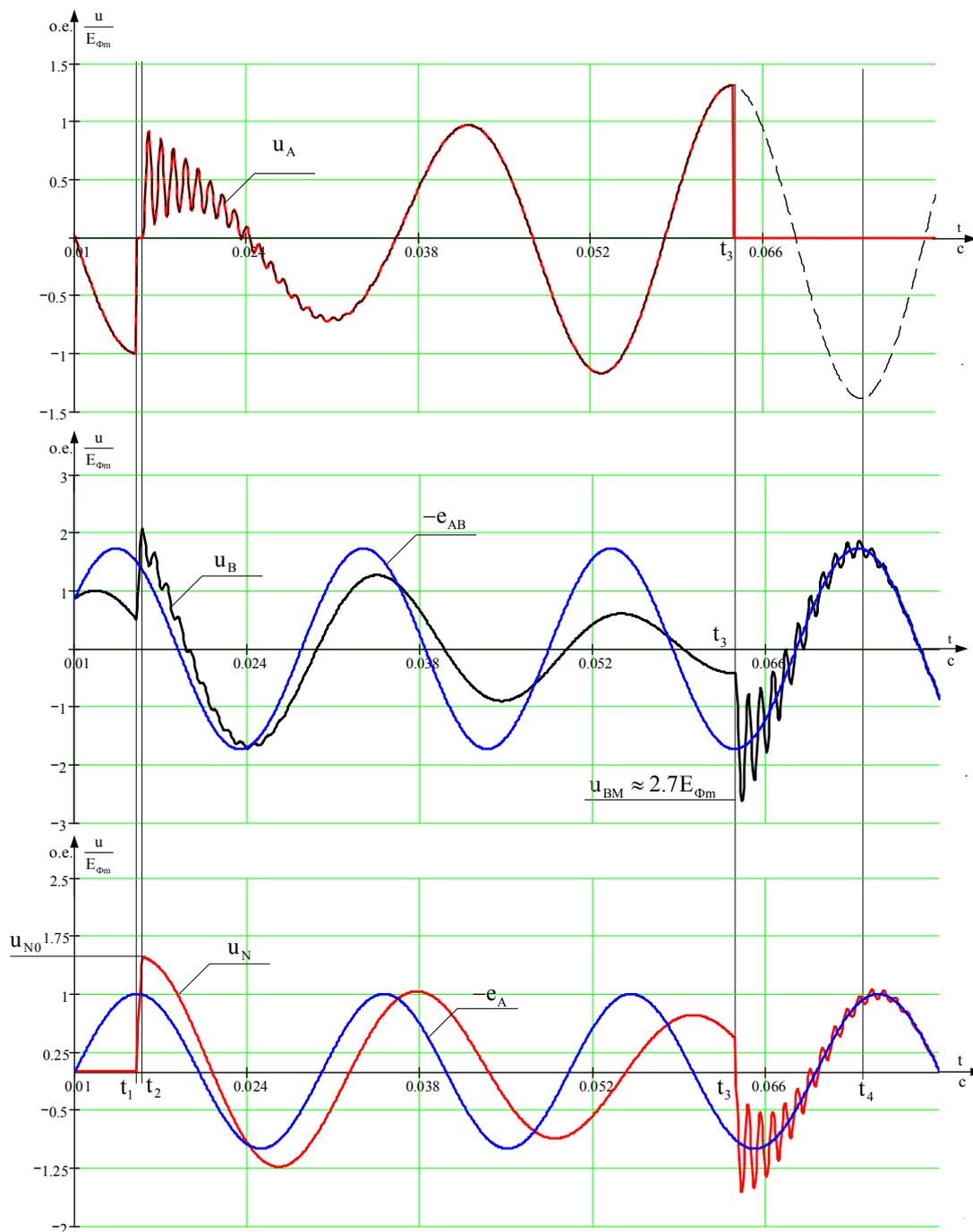


Рис. 4.13. Процесс формирования перенапряжений на неповрежденной фазе в сети с компенсацией емкостного тока $\nu = 0,2, d = 0,05$

$$u_{\text{ВМ}} = \sqrt{3}E_{\text{Фм}} + u_{\text{АМ}}(1 - k_{\delta 1})(1 - k_{\text{С}}). \quad (4.48)$$

Определим перенапряжения при следующих условиях и параметрах: $\nu = 0,3$ (недокомпенсация), $d = 0,05$, $k_{\delta 1} = 0,1$, $k_{\text{С}} = 0,2$, $u_{\text{НМ}} = 1,48E_{\text{Фм}}$. При этих исходных данных $u_{\text{ВМ}} = 3,1E_{\text{Фм}}$. Однако, как указывается в [4], следует учесть, что, во-первых, совпадение момента достижения максимума восстанавливающегося напряжения с моментом, когда принужденное напряжение $e_{\text{АВ}} = \sqrt{3}E_{\text{Фм}}$, маловероятно и, во-вторых, такое допущение дает завышенное значение перенапряжений при точной настройке компенсации ($\nu = 0$). При $\nu = 0$ после затухания напряжения на нейтрали и зажигания дуги при $u_{\text{А}} = E_{\text{Фм}}$ принужденные напряжения на неповрежденных фазах равно $1,5E_{\text{Фм}}$. Поэтому перенапряжения не могут превышать их значений при первом зажигании дуги. Следовательно, принимая значение принужденного напряжения равным $\sqrt{3}E_{\text{Фм}}$, получим неправильное представление о фактическом влиянии точности настройки компенсации емкостных токов на снижение возможных перенапряжений.

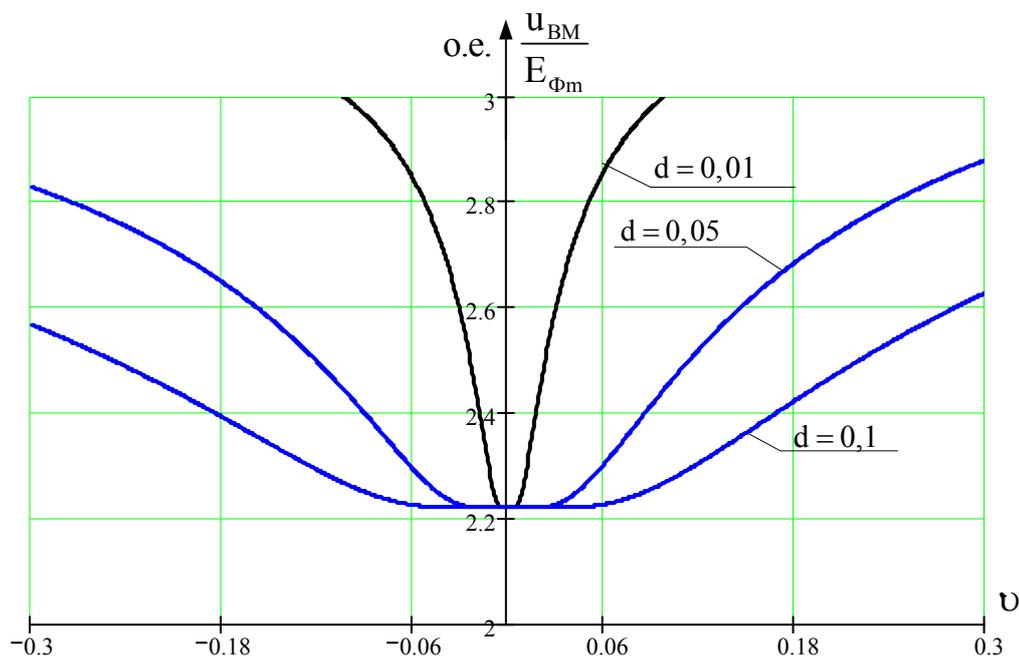


Рис. 4.14. Расчетные перенапряжения на неповрежденной фазе при повторных зажиганиях дуги

В связи с изложенным влияние расстройки компенсации и коэффициента демпфирования на перенапряжения будем рассматривать, принимая принужденное напряжение $e_{\text{АВ}} = 1,5E_{\text{Фм}}$. Таким образом, с учетом соотношений (4.43), (4.45) получим

$$u_{\text{ВМ}} = 1,5E_{\Phi\text{м}} + \left[E_{\Phi\text{м}} + U_{\text{Нм}} e^{-\frac{d\pi}{2|1-\sqrt{1-\nu}|}} \right] (1 - k_{\delta 1})(1 - k_{\text{C}}). \quad (4.49)$$

На рис. 4.14 по (4.49) построены зависимости возможных перенапряжений на неповрежденной фазе В от расстройки компенсации при различных значениях коэффициента демпфирования d . В расчетах, как и ранее, принято $u_{\text{НМ}} = 1,48E_{\Phi\text{м}}$, $k_{\delta 1} = 0,1$, $k_{\text{C}} = 0,2$.

4.5. Влияние точности настройки компенсации емкостных токов на процессы, определяющие эффективность компенсации

При применении компенсации емкостного тока естественно возникает вопрос о допустимых отклонениях от точной настройки дугогасящих устройств. При этом, очевидно, что расстройка компенсации не должна превышать значение, при которых возможно заметное снижение эффективности от применения компенсации емкостных токов.

В работе [4] понятие эффективности компенсации емкостных токов определено, как способность дугогасящих аппаратов (реакторов) ограничивать:

- токи через место повреждения;
- перенапряжения;
- скорости восстанавливающихся напряжений после гашения заземляющей дуги.

Также в работе [4] вводится количественный показатель эффективности компенсации, как доля замыканий на землю, не перешедших в короткие замыкания, от общего числа замыканий

$$\mathcal{E}_{\text{К}} = 1 - \frac{n_{\text{к.з.}}}{n_{\text{общ}}} \left(\frac{n_{\text{общ}} - n_{\text{к.з.}}}{n_{\text{общ}}} \right),$$

где $n_{\text{общ}}$ и $n_{\text{к.з.}}$ – соответственно общее число замыканий на землю и число замыканий, перешедших в короткие замыкания.

Возможны различные причины перехода однофазного замыкания в междуфазные. При замыкании в кабеле может иметь место повреждение изоляции других фаз за счет теплового действия тока однофазного замыкания. Довольно распространенной причиной перехода однофазных замыканий в междуфазные (двойные замыкания на землю) является

пробой изоляции на одной из неповрежденных фаз из-за перенапряжений, возникающих при повторных зажиганиях дуги.

Значимость приведенных выше трех факторов, от которых зависит эффективность компенсации, различна в зависимости от места однофазного замыкания (закрытая или открытая дуга), общего уровня изоляции сети и других обстоятельств.

При рассмотрении влияния расстройки компенсации на остаточный ток замыкания следует учитывать, что практически всегда этот ток содержит высшие гармоники

$$I_3 = I_C \sqrt{d^2 + x^2 + \sum I_{v*}^2},$$

где I_3 – ток замыкания;

I_C – суммарный емкостный ток;

I_{v*} – относительное действующее значение k -ой гармоники тока замыкания.

Доля высших гармоник может быть значительной, так как емкостный ток при прочих равных условиях пропорционален номеру гармоники. Таким образом, относительное влияние сравнительно небольших расстроек компенсации на действующее значение остаточного тока ослабляется.

В ряде работ [1, 4] на основе теоретических исследований и опыта эксплуатации большую значимость придают фактору скорости восстанавливаемых напряжений или, однозначно связанному со скоростью, времени восстановления напряжения на поврежденной фазе до значения, близкого к амплитуде номинального фазного напряжения.

В работе [4] снижение этого времени на определенную величину рекомендуется как мера для назначения максимально допустимой расстройки компенсации.

За основу для определения времени восстановления принимается уравнение для огибающей восстанавливающегося напряжения, соответствующей процессу при погасании дуги, когда через нуль проходит принужденная составляющая тока (4.38). Мгновенное значение огибающей равно абсолютной величине разности векторов (рис. 4.15), отображающих составляющие выражения (4.38).

Так как текущее значение угла δ на векторной диаграмме (рис. 4.15) равно $\omega t(1 - \sqrt{1 - \nu})$, то формула для огибающей будет иметь вид

$$U_{ор} = E_{\phi m} + \sqrt{1 + e^{-\dot{d}t} - 2e^{-\frac{d}{2}\omega t} \cos(1 - \sqrt{1 - \nu})\omega t}. \quad (4.50)$$

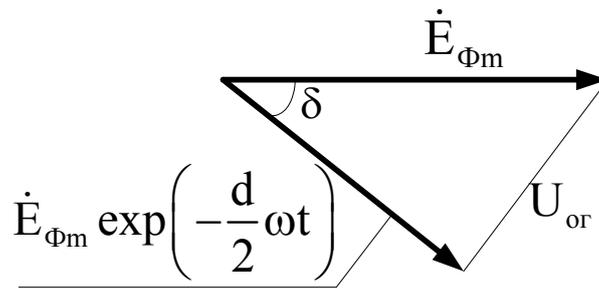


Рис. 4.15. Векторная диаграмма к выводу формулы для огибающей восстанавливающегося напряжения

Решая уравнение $U_{\text{зад}} = U_{\text{ог}}$ относительно t , получим зависимость времени восстановления напряжения от u и d .

На рис. 4.16 приведены зависимости времени восстановления напряжения до значения, равного $0,9 E_{\Phi m}$.

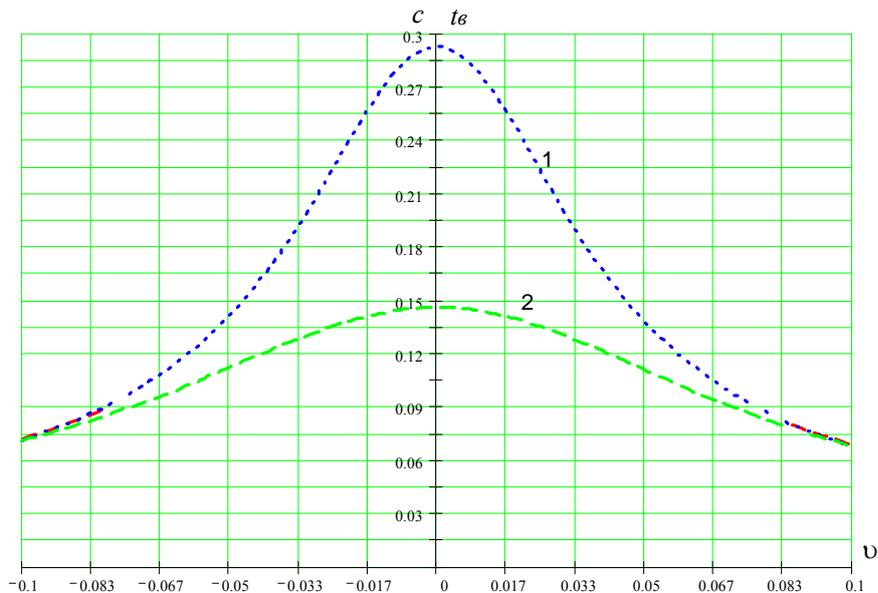


Рис. 4.16. Зависимости расчетного времени восстановления напряжения до $0,9 E_{\Phi m}$
 1 – при $d = 0,05$
 2 – при $d = 0,1$

В [1] в качестве характеристики скорости восстановления напряжения используется начальная скорость возрастания огибающей напряжения, которую получают по выражению (4.50). Относительно этого параметра в работе [1] говорится, что «...в особенности важна начальная скорость возрастания огибающей (напряжения), которая является мерой стремления к повторному зажиганию дуги».

По поводу влияния остаточного тока в этой же работе отмечается «...абсолютная величина остаточного тока важна, но, тем не менее,

имеет второстепенное значение» (по сравнению со скоростью восстановления напряжения, авт.).

Начальная скорость нарастания напряжения по огибающей, как это делается в [1], может быть найдена также с помощью векторной диаграммы, но с учетом того, что рассматривается начальная стадия процесса по прошествии малого отрезка времени Δt .

Векторная диаграмма для таких условий и необходимые дополнительные построения и обозначения приведены на рис. 4.17.

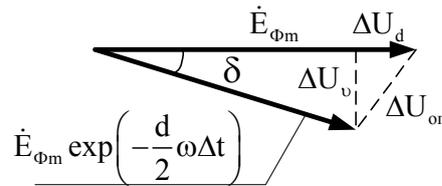


Рис. 4.17. Векторная диаграмма к определению начальной скорости восстанавливающегося напряжения по огибающей

Из диаграммы (рис. 4.17) $\Delta U_{or} = \sqrt{\Delta U_d^2 + \Delta U_v^2}$. Величины ΔU_d и ΔU_v с учетом малости угла δ равны

$$\Delta U_d \approx E_{\phi m} - E_{\phi m} \exp\left(-\frac{d}{2} \omega \Delta t\right), \quad (4.51)$$

$$\Delta U_v \approx E_{\phi m} \sin(1 - \sqrt{1 - \nu}) \omega \Delta t.$$

Так как Δt малая величина, то в разложении функций времени в степенные ряды можно не учитывать члены, содержащие малые величины в степени выше первой. Кроме того, учитывая, что расстройка компенсации также ограничена сравнительно малой величиной получим $\sqrt{1 - \nu} \approx 1 - \frac{1}{2} \nu$. Выражения (4.51) тогда примут вид

$$\Delta U_d \approx E_{\phi m} \frac{d}{2} \omega \Delta t, \quad (4.52)$$

$$\Delta U_v \approx E_{\phi m} \frac{\nu}{2} \omega \Delta t.$$

Мгновенные значения огибающей в начальной стадии

$$U_{or} = E_{\phi m} \frac{\omega}{2} \Delta t \sqrt{d^2 + \nu^2}, \quad (4.53)$$

а искомая начальная скорость

$$\frac{du_{or}}{dt} = \frac{\Delta u_{or}}{\Delta t} = E_{\Phi m} \frac{\omega}{2} \sqrt{d^2 + v^2}. \quad (4.54)$$

Как видно, по (4.54) параметры d и v в одинаковой степени влияют на начальную скорость возрастания огибающей напряжения, также как и на значение остаточного тока рабочей частоты.

В заключение дадим сравнительную оценку степени влияния отклонения настройки компенсации на изменение факторов, влияющих на эффективность компенсации. В качестве критерия степени влияния примем расстройку компенсации, при которой значение фактора изменяется на 10% при $d = 0,05$. Результаты расчетов сведены в таблицу 4.1.

Таблица 4.1

Фактор	Расстройка компенсации, при которой значение фактора изменяется на 10% при $d = 0,05$
Время восстановления напряжения до $0,9U_{\Phi m}$	$\pm 1,5\%$
Начальная скорость восстановления напряжения	$\pm 2,3\%$
Остаточный ток в месте замыкания без учета высших гармоник	$\pm 2,3\%$
Перенапряжения при дуговых замыканиях	$-14\%, +13\%$

Таким образом, при принятых расчетных условиях наиболее чувствительным к расстройке компенсации является время восстановления напряжения до заданного значения после погасания дуги, а наименее чувствительным – перенапряжения при повторных зажиганиях и погасаниях дуги.

5. СЕТИ С РЕЗИСТИВНЫМ ЗАЗЕМЛЕНИЕМ НЕЙТРАЛИ

Режим изолированной нейтрали имеет существенный недостаток, заключающийся в возможности появления больших перенапряжений при повторных зажиганиях дуги. Причиной больших перенапряжений является остаточное напряжение на нейтрали, обусловленное избыточными зарядами на емкостях фаз сети, которые не успевают стекать к очередному зажиганию дуги через естественные проводимости между фазами сети и землей. Поэтому совершенно очевидным способом снижения перенапряжений является создание пути для стекания избыточных зарядов с помощью заземления нейтрали сети через резистор с таким сопротивлением, при котором практически полное стекание избыточных зарядов обеспечивается к моменту возможного повторного зажигания дуги, то есть за половину периода промышленной частоты.

Забегая вперед, скажем, что при выборе сопротивления заземляющего резистора только из этого условия, ток в месте замыкания увеличивается не намного (примерно в 1,5 раза), и поэтому в большинстве случаев, также как и при изолированной нейтрали и при компенсации емкостного тока, допустима работа сети при однофазном замыкании в течение некоторого времени.

Предложения по применению резистивного заземления нейтрали известны давно [1, 2, 3]. В этих же работах довольно подробно рассмотрены все принципиальные вопросы, связанные с таким режимом заземления нейтрали. В настоящее время вопросы, связанные с теорией и практикой применения резистивного заземления нейтрали активно разрабатываются. Результаты этих разработок изложены в [14, 16, 17, 18]

Известны предложения, согласно которым следует принимать такое сопротивление заземляющего резистора, при котором активная составляющая тока замыкания составляет 30, 60 А. В этом случае сеть должна быть оснащена быстродействующей защитой от замыканий на землю, действующей на отключение, так как длительное протекание таких токов в месте замыкания недопустимо.

При этом немаловажно отметить, что выполнение защиты от замыканий на землю при токах замыкания $30 \div 60$ А при прочих равных условиях упрощается. Простота выполнения быстродействующей селективной защиты является одним из аргументов в пользу такого выбора сопротивления заземляющего резистора. При этом мощность заземляющего резистора может выбираться из условия протекания по нему тока в течение небольшого промежутка времени.

Заземление нейтрали через активное сопротивление принято кратко называть – резистивным заземлением нейтрали. Основная область применения резистивного заземления нейтрали – сети со сравнительно небольшими емкостными токами, при которых еще не рекомендуется, по существующим нормам, установка дугогасящих реакторов.

Наиболее распространенным видом таких сетей являются сети 6 кВ собственных нужд электростанций, сети, питающие передвижные механизмы открытых горных разработок, а также воздушные распределительные сети $6 \div 35$ кВ.

Заземляющий резистор, также как и дугогасящий реактор, может подключаться к нейтрали специального трансформатора с соединением обмоток звезда – треугольник или к какому-либо силовому трансформатору, у которого имеется обмотка, соединенная в треугольник (рис. 5.1).

По поводу соотношения сопротивления трансформатора и сопротивления заземляющего резистора справедливы те же замечания, которые сделаны при рассмотрении схемы подключения дугогасящего реактора.

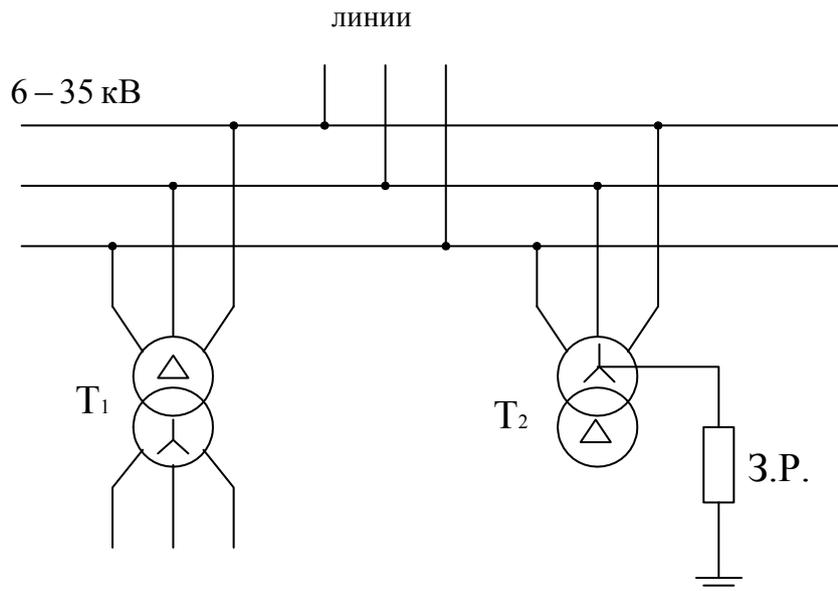


Рис. 5.1. Схема сети с резистивным заземлением нейтрали
З.Р. – заземляющий резистор

Если при резистивном заземлении нейтрали ток остается на таком уровне, что возможна длительная работа сети при однофазном замыкании, то такой режим принято условно называть высокоомным резистивным заземлением. Если же увеличение тока таково, что длительная работа сети при замыкании на землю недопустима, то режим условно называют низкоомным резистивным заземлением.

Важно также обратить внимание на то, что даже при резистивном заземлении, создающим активную составляющую тока в несколько десятков ампер и условно называемым низкоомным, эквивалентное сопротивление нулевой последовательности намного больше сопротивлений прямой и обратной последовательностей. Поэтому при резистивном заземлении, также как в сети с изолированной нейтралью и в сети с компенсацией емкостного тока, при замыкании на землю практически не происходит искажения линейных напряжений.

5.1. Сети с резистивным заземлением нейтрали при устойчивом замыкании на землю и нормальном режиме работы сети

Необходимые соотношения при устойчивом замыкании на землю и в нормальном режиме для сети с резистивным заземлением нейтрали можно получить по схеме замещения, приведенной на рис. 5.2.

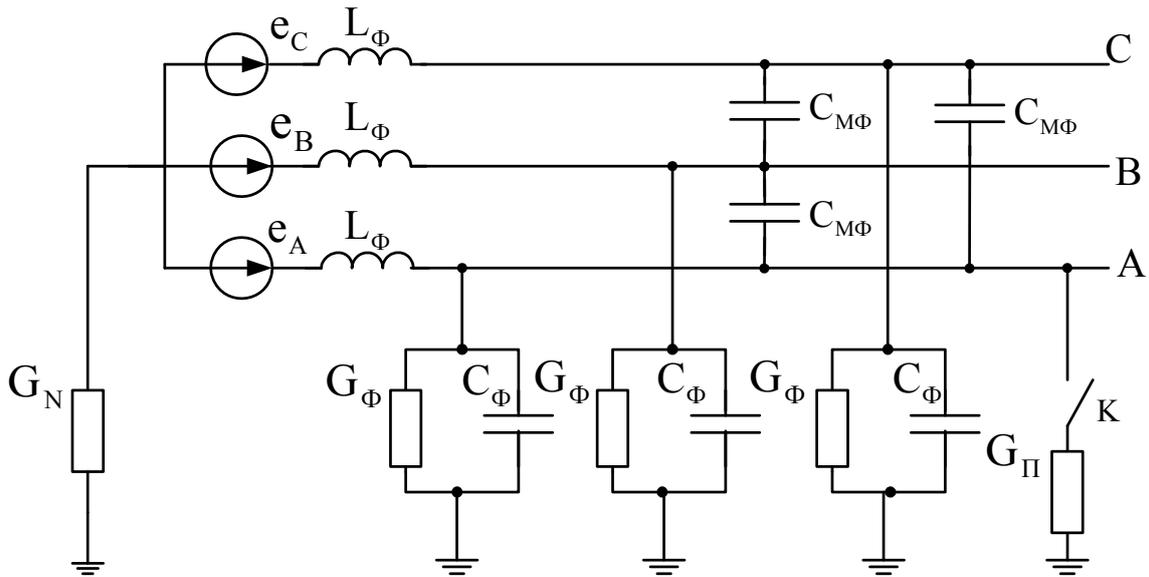


Рис. 5.2. Схема замещения сети с резистивным заземлением нейтрали

Эта схема замещения является частным случаем схемы, используемой для рассмотрения сети с компенсацией емкостного тока, если $B_L = \frac{1}{\omega L} = 0$, $G_L = G_N = \frac{1}{R_N}$.

Очевидно, что и соотношения, полученные для компенсированной сети, будут соответствовать сети с резистивным заземлением нейтрали при указанных выше условиях.

Однако, в отличие от сети с компенсацией емкостных токов в данном случае можно ограничиться определением токов только для рабочей частоты, так как составляющие высших гармоник при резистивном заземлении нейтрали по отношению к полному току замыкания значительно меньше, чем в компенсированной сети по отношению к остаточному току. Таким образом, электрические величины, характеризующие режим сети с резистивным заземлением нейтрали при устойчивом замыкании на землю, определяются следующими соотношениями:

напряжение на нейтрали

$$\dot{U}_N = -\frac{\dot{E}_A G_{\Pi}}{3\underline{Y}_{\phi} + G_{\Pi} + G_N}; \quad (5.1)$$

напряжение на поврежденной фазе

$$\dot{U}_A = \dot{E}_A + \dot{U}_N = \frac{\dot{E}_A (3\underline{Y}_{\phi} + G_N)}{3\underline{Y}_{\phi} + G_{\Pi} + G_N}; \quad (5.2)$$

ТОК В МЕСТЕ ЗАМЫКАНИЯ

$$\dot{I}_3 = \dot{U}_A \cdot G_{\Pi} = \frac{\dot{E}_A (3\underline{Y}_{\Phi} + G_N) G_{\Pi}}{3\underline{Y}_{\Phi} + G_{\Pi} + G_N}; \quad (5.3)$$

напряжения на неповрежденных фазах В и С

$$\dot{U}_B = \dot{E}_B + \dot{U}_N = \frac{\dot{E}_B (3\underline{Y}_{\Phi} + G_N) - \dot{E}_A G_{\Pi}}{3\underline{Y}_{\Phi} + G_{\Pi} + G_N}; \quad (5.4)$$

$$\dot{U}_C = \dot{E}_C + \dot{U}_N = \frac{\dot{E}_C (3\underline{Y}_{\Phi} + G_N) - \dot{E}_A G_{\Pi}}{3\underline{Y}_{\Phi} + G_{\Pi} + G_N}. \quad (5.5)$$

В формулах (5.1) – (5.5)

$\dot{E}_A = \dot{E}_B = \dot{E}_C = \dot{E}_{\Phi}$ – действующие значения фазных ЭДС рабочей частоты ω ;

$\underline{Y}_A = \underline{Y}_B = \underline{Y}_C = \underline{Y}_{\Phi} = G_{\Phi} + j\omega C_{\Phi}$ – полные проводимости фаз относительно земли;

$G_{\Pi} = 1/R_{\Pi}$ – проводимость в месте замыкания;

G_N – проводимость заземляющего резистора.

Представим (5.3) в виде

$$\dot{I}_3 = \frac{\dot{E}_A}{R_{\Pi} + \frac{1}{3G_{\Phi} + G_N + j3\omega C_{\Phi}}}. \quad (5.6)$$

Выражению (5.6) соответствует схема замещения нулевой последовательности, приведенная на рис. 5.3.

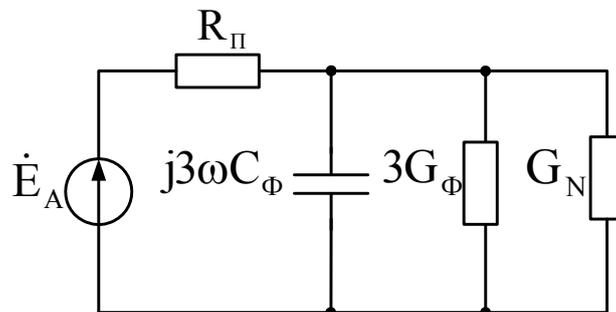


Рис. 5.3. Схема замещения нулевой последовательности

Приняв, как и ранее в качестве базисной суммарную емкостную проводимость фаз сети относительно земли ($3\omega C_\Phi$) преобразуем (5.6) следующим образом

$$\dot{I}_3 = I_C \frac{1}{R_{\Pi^*} + \frac{1}{d + G_{N^*} + j}}, \quad (5.7)$$

где $R_{\Pi^*} = R_\Pi 3\omega C_\Phi$, $d = \frac{3G_\Phi}{3\omega C_\Phi}$, $G_{N^*} = \frac{G_N}{3\omega C_\Phi}$,

$\dot{I}_C = \dot{E}_A 3j\omega C_\Phi$ – емкостная составляющая тока замыкания на землю.

Приняв в (5.7) $R_{\Pi^*} = 0$, получим

$$\dot{I}_3 = \dot{I}_a + \dot{I}_{aN} + \dot{I}_C, \quad (5.8)$$

где $\dot{I}_a = \dot{I}_C d$ – активная составляющая тока замыкания, обусловленная активной проводимостью фаз сети относительно земли,

$\dot{I}_{aN} = \dot{E}_\Phi G_N = \dot{I}_C G_{N^*}$ – активная составляющая тока замыкания, обусловленная заземлением нейтрали через резистор.

Очевидно, что относительная проводимость G_{N^*} равна также отношению дополнительного активного тока к емкостному току замыкания,

которое обозначим $I_{aN^*} = \frac{I_{aN}}{I_C}$.

Действуя также, как и при выводе соотношений (4.20) и (4.22), получим для абсолютных значений:

напряжение на нейтрали

$$U_N = \frac{E_\Phi}{\sqrt{(dR_{\Pi^*} + G_{N^*}R_{\Pi^*} + 1)^2 + R_{\Pi^*}^2}}; \quad (5.9)$$

напряжения на неповрежденных фазах

$$U_{C,B} = E_\Phi \sqrt{\left(0,5 + \frac{(dR_{\Pi^*} + G_{N^*}R_{\Pi^*} + 1)}{(dR_{\Pi^*} + G_{N^*}R_{\Pi^*} + 1)^2 + 1}\right)^2 + \left(\frac{\sqrt{3}}{2} \pm \frac{R_{\Pi^*}}{(dR_{\Pi^*} + G_{N^*}R_{\Pi^*} + 1)^2 + R_{\Pi^*}}\right)^2} \quad (5.10)$$

В (5.10) знак «+» относится к фазе опережающей по отношению к поврежденной, а «-» к отстающей.

На рис. 5.4 построены графики напряжений на нейтрали и неповрежденных фазах в зависимости от переходного сопротивления при различных значениях G_{N^*} .

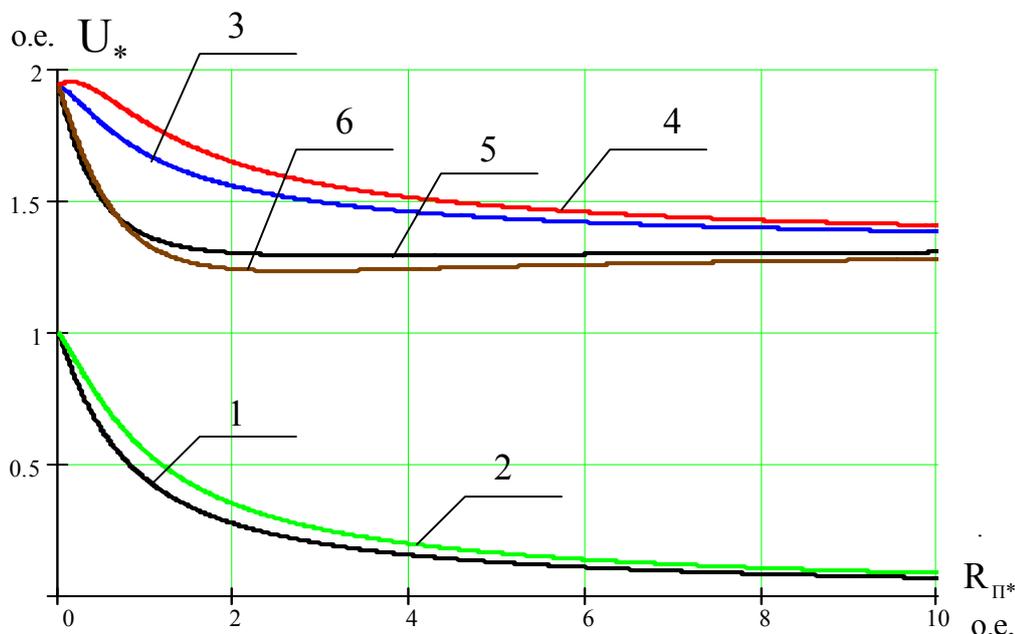


Рис. 5.4. Графики напряжений в зависимости от переходного сопротивления

- 1, 2 – напряжение на нейтрали;
- 3, 4 – напряжение на фазе С;
- 5, 6 – напряжение на фазе В;
- 1, 3, 5 – построены при $G_{N^*} = 1$;
- 2, 4, 6 – построены при $G_{N^*} = 0,5$

Как и следовало ожидать, при $R_{П*} = 0$ и при любом значении G_{N^*} напряжения на неповрежденных фазах равно линейному и, для принятых значений G_{N^*} , сопротивления прямой и обратной последовательностей значительно меньше сопротивления нулевой последовательности. Также вполне объяснимо и то, что при одних и тех же значениях переходного сопротивления напряжение нулевой последовательности меньше, чем в сети с изолированной нейтралью и в сети с компенсацией емкостного тока.

Напряжение смещения нейтрали, вызванное емкостной несимметрией, при отсутствии замыкания определяется также как и в сети с изолированной нейтралью (4.24) при $G_L = G_N$

$$U_{Ncm} = E_{\phi} \frac{\alpha_C}{\sqrt{(d + G_{N^*})^2 + 1}} \quad (5.11)$$

Из (5.11) следует, что при резистивном заземлении напряжение смещения нейтрали при прочих равных условиях (при определенной емкостной несимметрии) тем меньше, чем больше G_N .

5.2. Влияние резистивного заземления нейтрали на перенапряжения при повторных зажиганиях дуги

Переходные процессы в сети с резистивным заземлением нейтрали будем рассматривать по схеме замещения, приведенной на рис. 5.2.

Заземляющий резистор в принципе оказывает влияние на переходный процесс после погасания дуги. При рассмотрении переходных процессов, вызываемых пробоем изоляции одной из фаз, в сети с компенсацией емкостного тока было принято, что дугогасящий реактор не оказывает на эти процессы практически никакого влияния, так как его сопротивление при высоких частотах переходных процессов весьма велико. При заземлении нейтрали через резистор отсутствие такого влияния не очевидно.

Рассмотрим сначала влияние заземляющего резистора на переходные процессы изменения заряда емкостей неповрежденных фаз. При оценке этого влияния пренебрежем индуктивностью заземляющего трансформатора, что заведомо даст большее влияние, так как упомянутые процессы носят высокочастотный характер.

Полученные в главе 2 соотношения показывают, что переходный процесс в неповрежденных фазах одинаков и проходит синхронно. Поэтому схема замещения, отображающая этот процесс представлена на рис. 5.5, где $U_{пр}$ – напряжение, при котором зажигается дуга (напряжение пробоя).

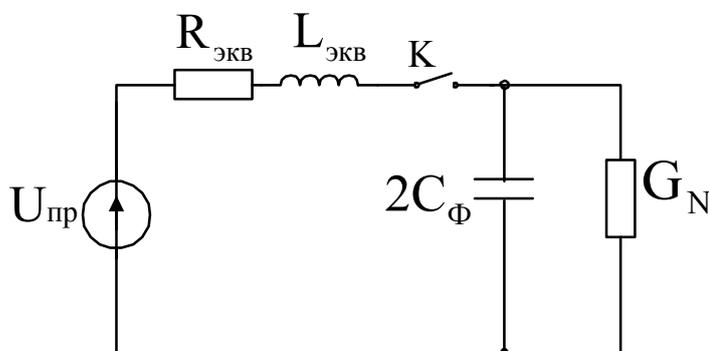


Рис. 5.5. Схема замещения контуров неповрежденных фаз для переходного процесса при зажигании дуги

Дифференциальное уравнение, описывающее свободную составляющую переходного процесса в схеме (рис. 5.5), относительно напряжения на емкости

$$\frac{d^2 u_C}{dt^2} + \left(\frac{G_N}{2C_\Phi} + \frac{R_{\text{ЭКВ}}}{L_{\text{ЭКВ}}} \right) \frac{du_C}{dt} + \left(\frac{1}{2L_{\text{ЭКВ}} C_\Phi} + \frac{G_N R_{\text{ЭКВ}}}{2L_{\text{ЭКВ}} C_\Phi} \right) u_C = 0. \quad (5.12)$$

Коэффициенты дифференциального уравнения (5.12)

$$D_1 = \left(\frac{G_N}{4C_\Phi} + \frac{R_{\text{ЭКВ}}}{2L_{\text{ЭКВ}}} \right), \quad \Psi_{p1}^2 = \left(\frac{1}{2L_{\text{ЭКВ}} C_\Phi} + \frac{G_N R_{\text{ЭКВ}}}{2L_{\text{ЭКВ}} C_\Phi} \right)$$

являются соответственно коэффициентом затухания и квадратом резонансной частоты эквивалентного контура переходного емкостного тока, которые с учетом того, что $G_N = G_{N*} 3\Psi C_\Phi$ представим в следующем виде

$$D_1 = D_1' + \frac{3}{4} \Psi G_{N*}, \quad (5.13)$$

$$\Psi_{p1}^2 = \Psi_{p1}'^2 + 3D_1' \Psi G_{N*}, \quad (5.14)$$

где $D_1' = \frac{R_{\text{ЭКВ}}}{2L_{\text{ЭКВ}}}$, $\Psi_{p1}'^2 = \frac{1}{2L_{\text{ЭКВ}} C_\Phi}$ – соответственно коэффициент затухания

и резонансная частота контура переходного емкостного тока без учета влияния заземляющего резистора (в сети с изолированной нейтралью).

Таким образом, в сети с резистивным заземлением нейтрали коэффициент затухания переходного емкостного тока замыкания определяется по (5.13), а частота свободных колебаний равна

$$\Psi_\zeta = \sqrt{\Psi_{p1}'^2 - D_1'^2}. \quad (5.15)$$

Как видно из (5.13), (5.14), степень влияния проводимости заземляющего резистора на значения D_1 , Ψ_{p1} зависит от их исходных значений при $G_{N*} = 0$. Для количественной оценки этого влияния примем конкретные значения $D_1' = 420$, $\Psi_{p1}' = 12566$ 1/с (2000 Гц) в соответствии с принимаемым при расчете перенапряжений значением $k_{д1} = 0,1$ (3.13).

Зависимости D_1 , Ψ_{p1} от G_{N*} приведены на рис. 5.6.

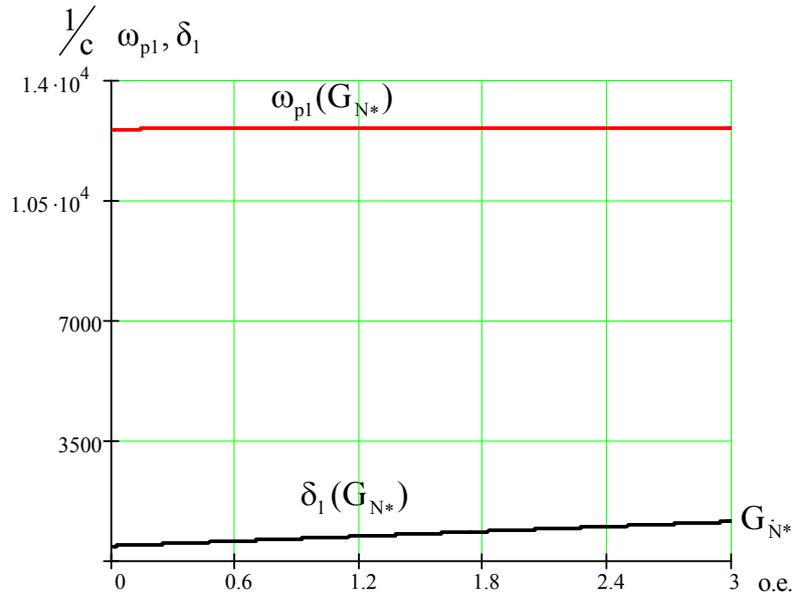


Рис. 5.6. Зависимости коэффициента затухания и резонансной частоты от проводимости заземляющего резистора

Как видно, даже при сравнительно больших значениях G_{N^*} переходный процесс, вызванный зажиганием дуги, остается колебательным слабозатухающим. Поэтому и в сети с резистивным заземлением нейтрали погасание дуги может происходить при прохождении через нуль суммарного тока замыкания, то есть практически через целое число полупериодов составляющей с частотой ω_1 или при прохождении через нуль принужденной составляющей тока.

Так как остаточное напряжение на нейтрали, обусловленное этими зарядами, является одной из основных причин возникновения больших перенапряжений, то определим значение G_{N^*} , при котором выполняется условие практически полного стекания избыточных зарядов за половину периода промышленной частоты после погасания дуги. Схема замещения нулевой последовательности для этой стадии процесса представлена на рис. 5.7.

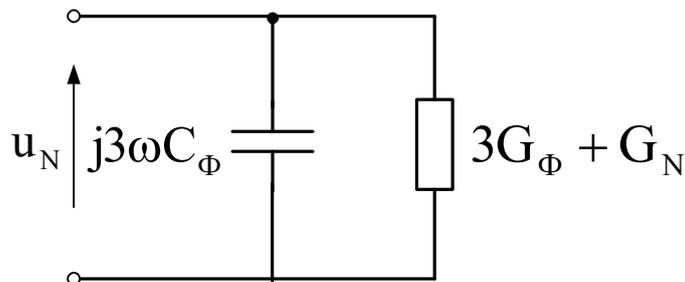


Рис. 5.7. Схема замещения сети с резистивным заземлением нейтрали после погасания дуги

Напряжение на нейтрали после погасания дуги изменяется по закону

$$u_N = u_{N0} e^{-t/\tau_N}, \quad (5.16)$$

где u_{N0} – напряжение на нейтрали в момент погасания дуги,

$\tau_N = \frac{3C_\Phi}{3G_\Phi + G_N}$ – постоянная времени процесса стекания избыточных зарядов.

Умножив и разделив выражение для τ_N на промышленную частоту ω , приведем его к виду

$$\tau_N \omega = \frac{1}{(d + G_{N*})\omega C_\Phi}. \quad (5.17)$$

Так как переходный процесс по (5.16) практически заканчивается за время, равное $3\tau_N$, искомое значение G_{N*} найдем из условия

$$3\tau_N \omega = \frac{T}{2}, \quad (5.18)$$

где $T = \frac{2\pi}{\omega}$ – период напряжения промышленной частоты.

Подставив в (5.17) выражение (5.18) получим

$$G_{N*} = \frac{3}{\pi} - d.$$

Так как $d \ll \frac{3}{\pi}$, то $G_{N*} \approx \frac{3}{\pi} = 0,955$.

Таким образом, положительное влияние резистивного заземления, проявляющееся в устранении эффекта накопления избыточных зарядов при повторных зажиганиях дуги, практически полностью реализуется, если дополнительная активная составляющая тока замыкания примерно равна емкостной составляющей.

Так как стоимость заземляющего резистора при прочих равных условиях уменьшается при уменьшении тока, на который он рассчитывается, то целесообразно рассмотреть насколько сохраняется эффект снижения перенапряжений, если принимать $G_{N*} < \frac{3}{\pi}$.

Так как в принимаемом диапазоне значений G_{N*} (примерно от 0 до 1) переходный ток в месте замыкания может оставаться колебательным со сравнительно слабым затуханием, то и в сети с резистивным заземлением нейтрали формирование перенапряжений может происходить по любой из известных теорий (пункт 3.3).

Проанализируем, как изменяются расчетные перенапряжения по теории Петерсена при изменении G_{N*} . Для этого, очевидно, следует в выражение для напряжения на нейтрали, формирующегося при очередном цикле зажигания и погасания дуги, ввести множитель, учитывающий его затухание за половину периода промышленной частоты. В результате получим

$$u_{Nn} = \frac{2}{3} u_{BM(n-1)} e^{-p(d+G_{N*})}. \quad (5.19)$$

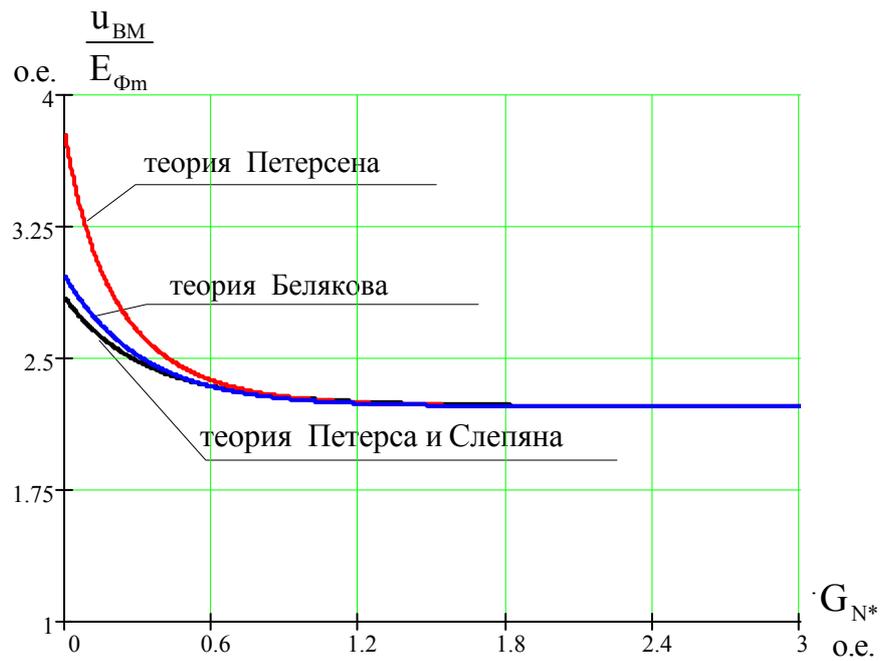
При этом максимальное расчетное перенапряжение будет равно

$$u_{BMn} = E_{\Phi m} \frac{1,5 + (1 - k_C)(1 - k_{\delta 1})}{1 - \frac{2}{3}(1 - k_C)(1 - k_{\delta 1})e^{-\pi(d+G_{N*})}}. \quad (5.20)$$

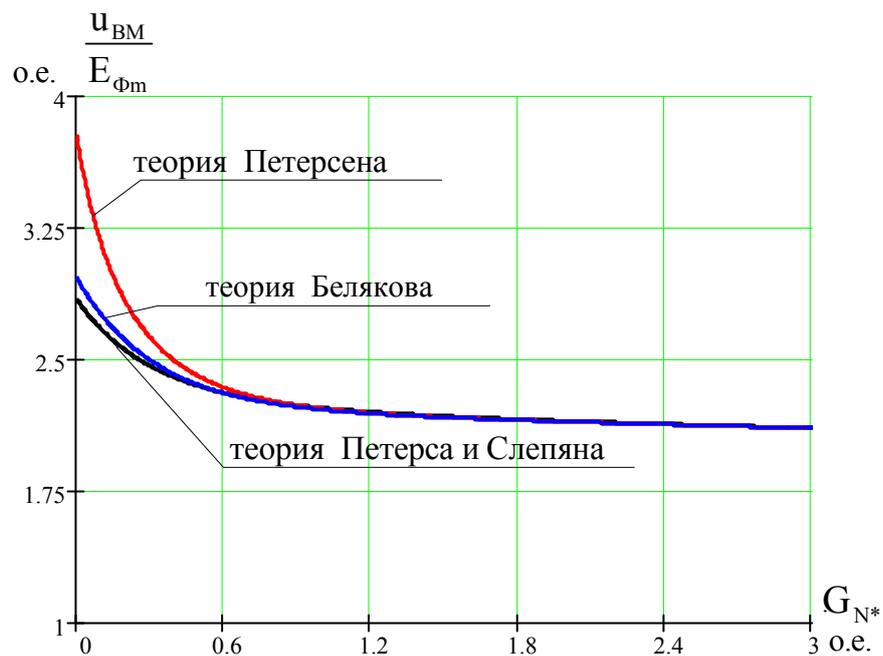
Зависимость перенапряжений от G_{N*} по (5.20) приведена на рис. 5.8. При расчете перенапряжений было учтено некоторое увеличение затухания напряжения с частотой ω_1 в соответствии с (5.13), поэтому принято конкретное значение $\delta_1 = 420$ (1/с).

Влияние заземления через резистор на формирование перенапряжений по теории Петерса и Слепяна обусловлено не только затуханием напряжения на нейтрали к моменту очередного зажигания дуги, но и тем, что момент перехода принужденного тока замыкания через нуль сдвигается относительно максимума напряжения на нейтрали. Поэтому в момент погасания дуги начальное значение остающегося напряжения на нейтрали меньше амплитуды фазного напряжения и, следовательно, время от момента погасания дуги до достижения ближайшего максимума напряжения на поврежденной фазе меньше половины периода (рис. 5.9).

При погасании дуги в момент t_2 , когда полностью затухает переходный процесс, вызванный предыдущим зажиганием дуги, напряжение на нейтрали (рис. 5.9) равно



а)



б)

Рис. 5.8. Зависимости перенапряжений от проводимости заземляющего резистора
 а – без учета влияния резистора на коэффициент затухания;
 б – с учетом влияния резистора на коэффициент затухания

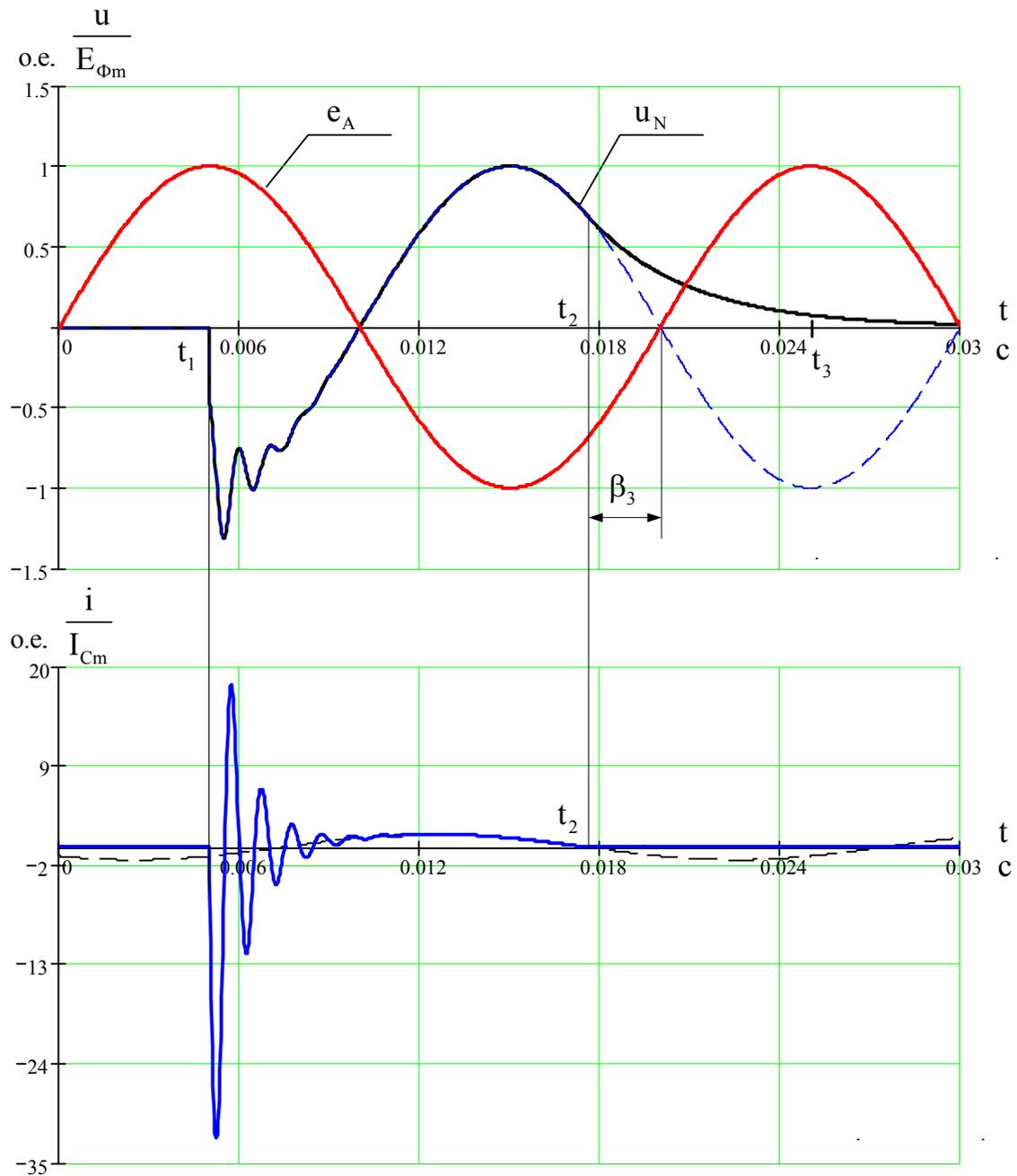


Рис. 5.9. Влияние заземления через резистор на перенапряжения по теории Петерса и Слепяна (показан процесс при $G_{N^*} = 1$)

$$u_N = -E_{\Phi m} \sin(2\pi - \beta_3) = E_{\Phi m} \sin(\beta_3). \quad (5.21)$$

Угол β_3 определяется соотношением между емкостной и активной составляющими тока замыкания, то есть

$$\beta_3 = \arctg \frac{1}{d + G_{N^*}}. \quad (5.22)$$

Отрезок времени от момента погасания дуги (момент t_2) до момента достижения максимума напряжения на поврежденной фазе (момент t_3) равен

$$t_3 - t_2 = \frac{\frac{\pi}{2} + \beta_3}{\omega}. \quad (5.23)$$

Напряжение на поврежденной фазе в момент повторного зажигания дуги (момент t_3)

$$u_A(t_3) = E_{\Phi m} + E_{\Phi m} \sin(\beta_3) e^{-\left(\frac{\pi}{2} + \beta_3\right)(d + G_{N^*})}. \quad (5.24)$$

В момент t_3 принужденное напряжение на неповрежденных фазах равно $1,5E_{\Phi m}$. Пренебрегая, как и ранее, его изменением за половину периода переходного емкостного тока получим

$$u_{BM} = u_{CM} = 1,5E_{\Phi m} + u_A(t_3)(1 - k_C)(1 - k_{\delta 1}). \quad (5.25)$$

Для определения влияния резистивного заземления нейтрали на формирование перенапряжений по теории Беякова в формуле (3.50) также учтем затухание напряжения на нейтрали за половину периода промышленной частоты, что дает

$$u_{BM} = 1,5E_{\Phi m} + (1,2E_{\Phi m} e^{-\pi(d + G_{N^*})} + E_{\Phi m})(1 - k_C)(1 - k_{\delta 1}). \quad (5.26)$$

Как следует из кривых, представленных на рис. 5.8, эффект снижения перенапряжений существенно проявляется и при значении $G_{N^*} < 1$, начиная примерно со значения $G_{N^*} = 0,5$. Это обстоятельство является очень важным, так как позволяет получить существенный эффект при меньшей мощности и, следовательно, при меньшей стоимости заземляющего резистора.

6. СЕТИ С КОМБИНИРОВАННЫМ ЗАЗЕМЛЕНИЕМ НЕЙТРАЛИ

В последние годы в ряде работ [16, 19] предложено использовать заземление нейтрали через параллельно соединенные дугогасящий реактор и резистор, сопротивление которого подбирается определенным

образом. Такой режим заземления нейтрали называют комбинированным.

Очевидно, что включение параллельно дугогасящему реактору дополнительного резистора приводит фактически только к увеличению коэффициента демпфирования d . Поэтому для анализа сети с комбинированным заземлением нейтрали пригодны все соотношения, полученные для сети с компенсацией емкостного тока.

Комбинированное заземление нейтрали прежде всего целесообразно применять в тех случаях, когда по каким-либо причинам невозможно реализовать режим компенсации емкостного тока с малой расстройкой, когда полностью проявляются положительные свойства компенсации емкостного тока в отношении всех факторов, влияющих на эффективность компенсации. Характерным примером случая, когда целесообразно применение комбинированного заземления нейтрали, является воздушная сеть со сравнительно большим емкостным током, расположенная в районах вечной мерзлоты или скальных грунтов, из-за чего сложно выполнить заземляющие устройства подстанционного оборудования и опоры с таким сопротивлением, при котором обеспечиваются допустимые напряжения прикосновения и шага при замыкании на землю.

Препятствием для применения обычной компенсации емкостного тока для снижения тока замыкания на землю и снижения, таким образом, напряжения прикосновения и шага является значительная емкостная несимметрия фаз сети, что, как правило, имеет место в воздушных сетях. Это может быть причиной появления недопустимого смещения нейтрали в нормальном режиме при малых расстройках компенсации.

Принципиально возможно поддержание, в том числе и автоматическое, такой расстройки компенсации, при которой напряжение смещения нейтрали не будет превышать допустимое значение $0,15U_{\phi \text{ ном}}$. При этом может потребоваться расстройка компенсации 20% и даже более.

При таких расстройках эффективность компенсации емкостного тока снижается. Совмещение противоречивых требований снижения тока замыкания на землю и ограничение напряжения смещения нейтрали в нормальном режиме может быть достигнута путем включения параллельно дугогасящему реактору резистора.

Как следует из (4.49) и рис. 4.14, такое подключение приводит к снижению перенапряжений в режимах, когда имеет место значительная расстройка компенсации.

Ряд специалистов [16, 19] считает целесообразным применение комбинированного заземления нейтрали во всех случаях, в том числе и в заведомо симметричных по фазам кабельных сетях, на том основании, что при этом достигается снижение дуговых перенапряжений без применения дорогостоящих технических средств в виде плавнорегулируе-

мых дугогасящих реакторов с устройством для их автоматического регулирования.

Таким образом, выбор сопротивления резистора, подключаемого параллельно дугогасящему реактору, в общем случае может выбираться из двух условий:

1. Ограничение дуговых перенапряжений при максимально возможных в эксплуатации расстройках компенсации.
2. Ограничение напряжения смещения нейтрали при максимально возможном в эксплуатации коэффициенте емкостной несимметрии сети и при точной настройке компенсации.

Далее определим суммарное значение коэффициента демпфирования, при котором исключается причина возникновения дуговых перенапряжений, определяемых по (4.49). Для этого необходимо, чтобы за время t_m по (4.45) напряжение на нейтрали после погасания дуги практически полностью затухало. Это будет иметь место, если постоянная времени затухания амплитуды свободных колебаний на нейтрали

$\tau_3 = \frac{2}{d\omega}$ будет удовлетворять условию

$$3\tau_3 = t_m. \quad (6.1)$$

При выполнении условия (6.1), как следует из (4.46), (4.47), напряжение на поврежденной фазе после очередного обрыва дуги практически не может превышать амплитуду фазного напряжения, так как по истечении времени t_m $e^{-3\tau_3} \approx 0,05$. Поэтому и перенапряжение не может превысить значения, которое имеет место при первом пробое изоляции в момент, когда напряжение на поврежденной фазе равно $E_{\phi m}$. При исходных условиях построения кривых расчетных перенапряжений, приведенных на рис. 4.14, оно равно $2,22 E_{\phi m}$.

Таким образом, требуемое суммарное значение d в зависимости от расстройки компенсации можно определить из системы уравнений, полученной из условий (4.44) и (6.1)

$$t_m \omega \left[1 - \sqrt{(1 - \nu) - \left(\frac{d}{2}\right)^2} \right] = \pm \pi, \quad (6.2)$$

$$\frac{6}{d\omega} = t_m.$$

Результаты расчетов по (6.2) приведены на рис. 6.1. Как видно, эффект снижения дуговых перенапряжений при повторных зажиганиях дуги практически полностью реализуется, если выполняется условие

$$d \approx |\nu|. \quad (6.3)$$

Также как и в сети с резистивным заземлением нейтрали можно ожидать, что достаточно сильно эффект снижения перенапряжения будет

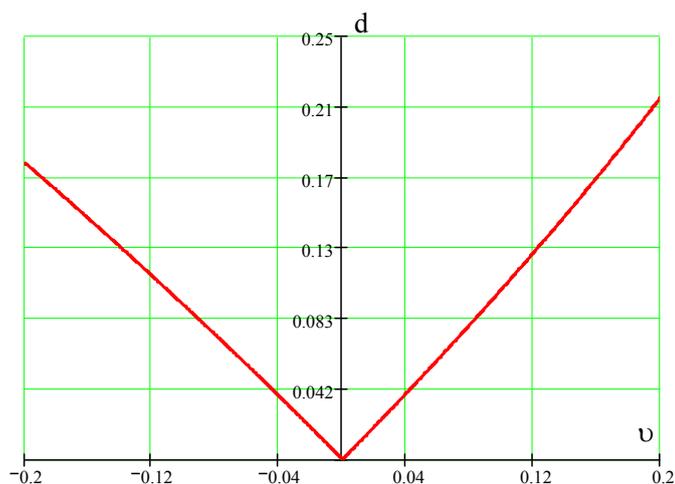


Рис. 6.1. Значения коэффициента демпфирования, при котором полностью проявляется эффект снижения перенапряжений при комбинированном заземлении

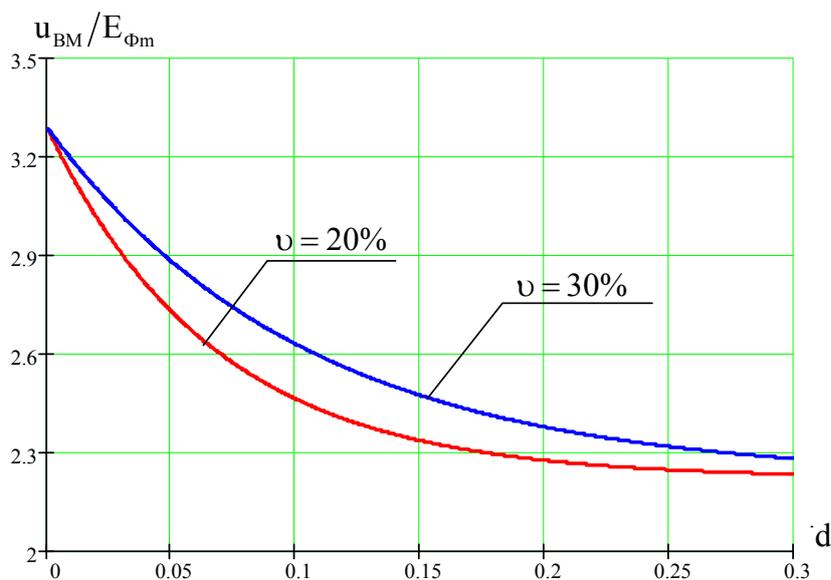


Рис. 6.2. Зависимость перенапряжений от коэффициента демпфирования в сети с комбинированным заземлением нейтрали

проявляться и при $d < |\upsilon|$. Данный факт подтверждается кривыми зависимостей расчетных перенапряжений (рис. 6.2), полученных при изменении d при нескольких значениях υ по (4.49).

7. ПОЛНАЯ КОМПЕНСАЦИЯ ТОКА ЗАМЫКАНИЯ НА ЗЕМЛЮ

Полная компенсация однофазного тока замыкания заключается в том, что компенсируется не только емкостная составляющая тока замыкания, но и активная составляющая. Компенсация активной составляющей предложена довольно давно и для ее осуществления было разработано несколько различных схем [1]. При компенсации активной составляющей тока замыкания кроме собственно снижения данной составляющей, в электрической сети появляется еще ряд специфических эффектов.

В нашей стране идея полной компенсации емкостного тока развивается и реализуется в виде конкретных технических разработок [20,21]. Компенсация активной составляющей тока замыкания по сравнению с компенсацией емкостной составляющей имеет то существенное отличие, что для этого обязательно необходимо использовать специально организованную подпитку контура нулевой последовательности от какого-либо источника с частотой, равной рабочей частоте сети.

При полной компенсации активной составляющей тока замыкания активная мощность, потребляемая от этого источника, равна потерям активной мощности в контуре нулевой последовательности. В зависимости от способа подключения вспомогательного источника он может быть источником напряжения или источником тока.

Рассмотрим основные особенности компенсации активной составляющей на примере использования источника тока. Для этого будем использовать схему замещения нулевой последовательности сети при замыкании на землю (рис. 4.2). Эта схема с добавлением источника вспомогательного тока представлена на рис. 7.1, где

\dot{I}'_3 – ток в месте замыкания, который имел бы место без источника дополнительного тока;

$\dot{I}_{\text{доп}}$ – ток дополнительного источника;

\dot{I}_3 – результирующий ток в месте замыкания.

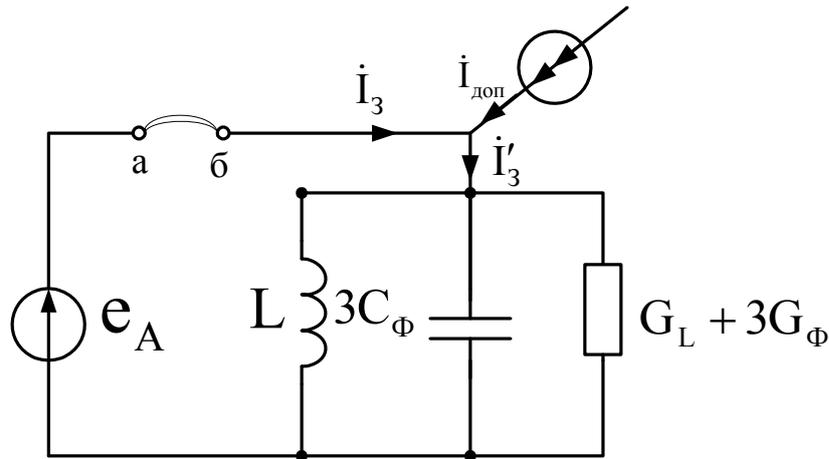


Рис. 7.1. Схема замещения нулевой последовательности сети с источником для полной компенсации тока замыкания

Место замыкания показано точками «а» и «б». Замыкание может быть как устойчивым, так и дуговым. Определим далее модуль и фазу тока добавочного источника, при которых ток в месте замыкания при устойчивом замыкании будет равен нулю при любых произвольных значениях ν и d , поскольку в общем случае компенсация емкостной составляющей за счет дугогасящего реактора может быть неполной.

По первому закону Кирхгофа (рис. 7.1)

$$\dot{I}_3 = \dot{I}'_3 - \dot{I}_{\text{доп}}.$$

Принимая условие $\dot{I}_3 = 0$ и выражая ток \dot{I}'_3 через параметры схемы замещения по соотношениям (4.13), (4.17) и (4.18), получаем выражение для определения требуемого тока $\dot{I}_{\text{доп}}$

$$\dot{I}_{\text{доп}} = E_{\Phi} 3\omega C_{\Phi} (d + j\nu). \quad (7.1)$$

Естественно, что с помощью дополнительного источника можно скомпенсировать остаточный ток в месте замыкания, обусловленный как неточной настройкой дугогасящего реактора, так и активной проводимостью. Причем активная составляющая тока замыкания компенсируется соответственно активной составляющей дополнительного тока

$$\dot{I}_{\text{доп а}} = E_{\Phi} 3\omega C_{\Phi} d,$$

а реактивная – мнимой составляющей

$$\dot{I}_{\text{доп р}} = E_{\Phi} 3\omega C_{\Phi} \nu.$$

Составляющие $\dot{I}_{\text{доп а}}$, $\dot{I}_{\text{доп р}}$, при практической реализации полной компенсации тока замыкания, могут быть выделены аппаратными средствами и регулироваться независимо друг от друга.

При прочих равных условиях предпочтительно так выполнить систему полной компенсации тока замыкания, чтобы емкостная составляющая полностью компенсировалась дугогасящим реактором. Тогда $\nu = 0$, $I_{\text{доп р}} = 0$ и поэтому необходимая полная мощность источника дополнительного тока будет минимальной.

Далее покажем, что при наличии источника, создающего ток по условию (7.1), кроме эффекта полной компенсации первой гармоники тока замыкания, электрическая сеть приобретает важное свойство, которое заключается в том, что после обрыва дуги напряжение на поврежденной фазе относительно земли остается практически равным нулю до тех пор пока подается ток $\dot{I}_{\text{доп}}$.

После обрыва дуги напряжение на нейтрали сети определяется падением напряжения на эквивалентном сопротивлении контура нулевой последовательности от тока $\dot{I}_{\text{доп}}$. Используя соотношения, полученные в главе 4, и схему замещения по рис. 7.1, нетрудно показать, что это напряжение равно

$$\dot{U}_N = \frac{\dot{I}_{\text{доп}}}{3\omega C_\Phi (d + j\nu)}.$$

При выполнении условия (7.1) $\dot{U}_N = \dot{E}_\Phi$.

Как видно из схемы замещения (рис. 7.1) напряжение на дуговом промежутке, а следовательно и на поврежденной фазе, в исходной трехфазной схеме полностью компенсируется искусственно созданным напряжением на нейтрали. Таким образом создается эффект идеальной компенсированной сети, когда $d = 0$ и $\nu = 0$. При этом частота свободных колебаний напряжения на нейтрали точно равна частоте источника питания сети, амплитуда данных колебаний не затухает. В этом случае, теоретически, напряжение на поврежденной фазе будет равным нулю в течение неограниченного времени.

При полной компенсации с использованием дополнительного источника спустя некоторое время после замыкания делается пробное снятие дополнительного тока. Если к этому моменту электрическая прочность дугового промежутка восстановилась, то происходит затухание напряжения на нейтрали в соответствии с естественными значениями ν и d . Напряжение на поврежденной фазе восстанавливается, как при обычной компенсации емкостного тока замыкания.

Рассмотрим одну из конкретных схем для реализации полной компенсации тока замыкания, которая предложена Петерсоном и приведена в [1]. Эта схема (рис. 7.2) является также основой практически реализованной в настоящее время системы полной компенсации тока замыкания [18].

Дополнительная подпитка тока замыкания обеспечивается за счет создания искусственной и управляемой несимметрии проводимостей фаз сети.

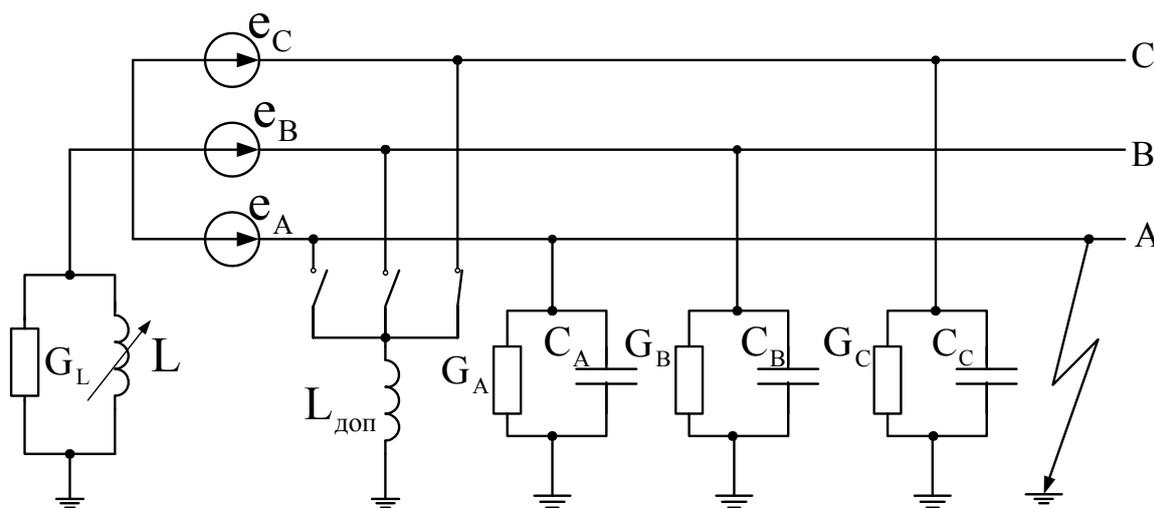


Рис. 7.2. Схема замещения сети с полной компенсацией тока замыкания путем создания управляемой несимметрии проводимостей фаз сети

Искусственная несимметрия создается подключением к одной фазе реактора с индуктивностью $L_{\text{доп}}$. Фаза, к которой подключается этот реактор, определяется автоматически в зависимости от того, какая фаза замыкается на землю. В [1] показано, что поставленная задача полной компенсации тока замыкания может быть решена, если вектор напряжения неповрежденной фазы, к которой подключается дополнительный реактор, опережает вектор напряжения поврежденной фазы. Например, при замыкании на землю фазы А дополнительный реактор должен быть подключен к фазе С.

В предыдущих разделах данного учебного пособия режим замыкания на землю и рабочий режим сети с учетом несимметрии проводимостей фаз рассматривались отдельно на том основании, что естественная несимметрия мала и не оказывает существенного влияния на электрические величины при замыкании на землю.

При целенаправленном использовании несимметрии фаз сети необходимо, прежде всего, определить ток в месте замыкания с учетом несимметрии. Все необходимые соотношения можно получить, используя

выражение (4.4) для тока в месте замыкания для первой гармоники ($v = 1$). Для упрощения примем, что параметры сети таковы, что емкости и активные проводимости фаз сети одинаковы, то есть естественная несимметрия отсутствует.

Заменив в (4.4) проводимость в месте замыкания через соответствующее сопротивление $G_{\Pi} = \frac{1}{R_{\Pi}}$, получим

$$\dot{I}_3 = \frac{\dot{E}_A (\underline{Y}_A + \underline{Y}_B + \underline{Y}_C + B_L + G_L) \frac{1}{R_{\Pi}}}{\underline{Y}_A + \underline{Y}_B + \underline{Y}_C + G_L + B_L + \frac{1}{R_{\Pi}}} - \frac{\dot{E}_A (\underline{Y}_A + a^2 \underline{Y}_B + a \underline{Y}_C) \frac{1}{R_{\Pi}}}{\underline{Y}_A + \underline{Y}_B + \underline{Y}_C + G_L + B_L + \frac{1}{R_{\Pi}}}.$$

Далее, также для упрощения, будем рассматривать режим при металлическом замыкании при $R_{\Pi} = 0$. При этом

$$\dot{I}_3 = \dot{I}_{30} + \dot{I}_{3Н} = \dot{E}_A (\underline{Y}_A + \underline{Y}_B + \underline{Y}_C + B_L + G_L) - \dot{E}_A (\underline{Y}_A + a^2 \underline{Y}_B + a \underline{Y}_C). \quad (7.2)$$

Как видно, ток в месте замыкания состоит из двух составляющих, одна из которых (\dot{I}_{30}) определяется суммарной проводимостью сети относительно земли, а вторая ($\dot{I}_{3Н}$) – несимметрией проводимостей фаз.

Выражение (7.2) получено при замыкании на землю фазы «А», поэтому дополнительный реактор, как указано выше, подключаем к опережающей фазе – «С».

В соответствие с этим примем

$$\begin{aligned} \underline{Y}_A = \underline{Y}_B &= G_{\Phi} + j\omega C_{\Phi}, \\ \underline{Y}_C &= G_{\Phi} + j\omega C_{\Phi} - j \frac{1}{\omega L_{\text{доп}}}. \end{aligned} \quad (7.3)$$

Подстановка (7.3) в (7.2) и некоторые преобразования дают

$$\dot{I}_{30} = \dot{E}_A 3\omega C_{\Phi} \left[\frac{3G_{\Phi} + G_L}{3\omega C_{\Phi}} + j \left(1 - \frac{1}{3\omega^2 C_{\Phi} L} - \frac{1}{3\omega^2 C_{\Phi} L_{\text{доп}}} \right) \right],$$

$$\dot{I}_{3Н} = -\dot{E}_A j \omega C_\Phi \left[1 + a^2 + a \left(1 - \frac{1}{\omega^2 C_\Phi L_{\text{доп}}} \right) \right].$$

Принимая во внимание, что

$$d = \frac{3G_\Phi + G_L}{3\omega C_\Phi}, \quad \nu = 1 - \frac{1}{\omega^2 3C_\Phi L}, \quad a = -\frac{1}{2} + j\frac{\sqrt{3}}{2}, \quad a^2 = -\frac{1}{2} - j\frac{\sqrt{3}}{2},$$

получим

$$\dot{I}_{30} = \dot{E}_A 3\omega C_\Phi [d + j(x - \Delta x_{\text{доп}})], \quad (7.4)$$

$$\dot{I}_{3Н} = -\dot{E}_A \omega C_\Phi \frac{\Delta x_{\text{доп}}}{2} (\sqrt{3} + j), \quad (7.5)$$

где $\Delta \nu_{\text{доп}} = \frac{1}{3\omega^2 C_\Phi L_{\text{доп}}}$ – отношение проводимости дополнительного реактора к суммарной емкостной проводимости фаз сети относительно земли.

Величина $\Delta \nu_{\text{доп}}$ равна изменению расстройки компенсации, вызванного подключением дополнительного реактора и, как видно из (7.5), этой же величине пропорциональна составляющая тока, обусловленная искусственной несимметрией.

Условия полной компенсации найдем, приравнявая к нулю вещественную и мнимую составляющие суммарного тока замыкания.

$$\begin{aligned} d - \frac{\sqrt{3}}{2} \Delta x_{\text{доп}} &= 0, \\ \nu - \Delta x_{\text{доп}} - \frac{1}{2} \Delta x_{\text{доп}} &= 0. \end{aligned} \quad (7.6)$$

Из системы уравнений (7.6) следует, что полная компенсация тока замыкания будет иметь место, если

$$\begin{aligned} \Delta x_{\text{доп}} &= \frac{2}{\sqrt{3}} d, \\ \nu &= \sqrt{3} d. \end{aligned} \quad (7.7)$$

Условия (7.7) являются практически реализуемыми при любом d , так как v и $Dx_{\text{доп}}$ могут регулироваться независимо друг от друга, а именно: v – изменением индуктивности L основного дугогасящего реактора, $Dx_{\text{доп}}$ – изменением индуктивности $L_{\text{доп}}$ дополнительного реактора.

После обрыва дуги напряжение смещения нейтрали за счет искусственной несимметрии будет равно

$$\dot{U}_N = -E_A \frac{Dx_{\text{доп}}(\sqrt{3}+j)}{d+j(x-Dx_{\text{доп}})},$$

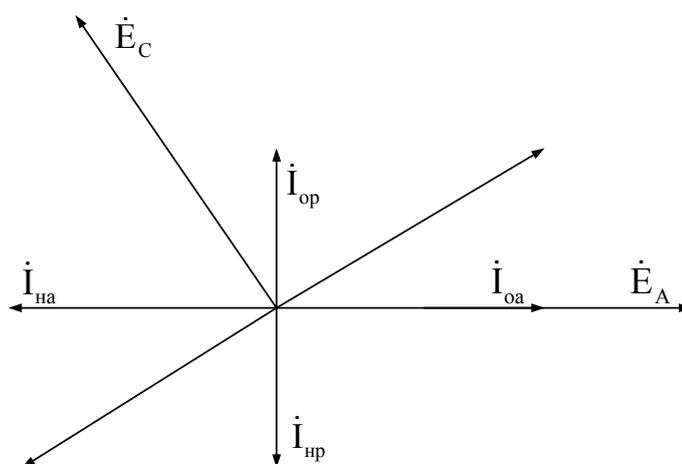


Рис. 7.3. Векторная диаграмма при полной компенсации тока замыкания путем создания искусственной несимметрии

При выполнении условий (7.7) $\dot{U}_N = -E_A$, а это означает, что напряжение на поврежденной фазе после обрыва дуги будет равно нулю до снятия искусственной несимметрии.

На рис. 7.3 приведена векторная диаграмма, поясняющая изложенный выше способ реализации полной компенсации тока замыкания.

Как видно, активная составляющая тока замыкания

$$I_{\text{оа}} = E_A 3\omega C_{\Phi} d$$

компенсируется активной составляющей тока несимметрии

$$I_{\text{на}} = E_A 3\omega C_{\Phi} \frac{\sqrt{3}}{2} Dx_{\text{доп}}.$$

Так как вектор полного тока несимметрии повернут по отношению к активному току замыкания не на 180° , а на 150° , то появляется также и реактивная составляющая тока несимметрии

$$I_{\text{нр}} = E_A 3\omega C_{\Phi} \frac{Dx_{\text{доп}}}{2},$$

которая компенсируется установкой такого значения ν , при котором реактивная составляющая тока замыкания

$$I_{\text{ор}} = E_A 3\omega C_{\Phi} (\nu - Dx_{\text{доп}})$$

будет равна и противоположна по направлению току $I_{\text{нр}}$.

Список обозначений

Глава 1

x_C – емкостное сопротивление фазы относительно земли;

x_{Φ} – продольное индуктивное сопротивление фазы в эквивалентной схеме сети;

x_N – индуктивное сопротивление между фазой и землей;

$\dot{E}_A, \dot{E}_B, \dot{E}_C$ – вектора фазных ЭДС эквивалентного источника питания;

$\underline{Y}_A, \underline{Y}_B, \underline{Y}_C$ – полные комплексные проводимости фаз сети относительно земли;

\dot{U}_N – вектор напряжения на нейтрали сети;

\dot{I}_3 – вектор тока в месте замыкания;

Глава 2

$\dot{I}_{A1}, \dot{I}_{A2}, \dot{I}_{A0}$ – векторы токов прямой, обратной и нулевой последовательностей для фазы А;

$\dot{U}_{A1}, \dot{U}_{A2}, \dot{U}_{A0}$ – векторы напряжений прямой, обратной и нулевой последовательностей для фазы А;

$\underline{Z}_1, \underline{Z}_2, \underline{Z}_0$ – полные сопротивления прямой, обратной и нулевой последовательностей относительно места однофазного короткого замыкания;

$I_{\text{к}}^{(1)}$ – ток однофазного короткого замыкания;

r_1, x_1 – активное и реактивное сопротивление прямой последовательности относительно места однофазного короткого замыкания;

r_0, x_0 – активное и реактивное сопротивление нулевой последовательности относительно места однофазного короткого замыкания;

$$\alpha = \frac{x_0}{x_1};$$

$$K_3 = \frac{U_{\text{неп.Ф}}}{U_{\text{ном}}} - \text{коэффициент заземления};$$

$U_{\text{неп.Ф}}$ – напряжение на неповрежденных фазах;

$U_{\text{ном}}$ – номинальное напряжение сети;

$U_{\text{раб}}$ – рабочее напряжение сети;

Глава 3

\dot{E}_{Φ} – действующее значение фазной ЭДС источника питания;

C_A, C_B, C_C – емкости фаз сети относительно земли;

G_A, G_B, G_C – активные проводимости фаз сети относительно земли;

C_{Σ} – суммарная емкость фаз сети относительно земли;

G_{Σ} – суммарная активная проводимость фаз сети относительно земли;

ω – круговая частота промышленного тока;

b_C – коэффициент емкостной несимметрии сети;

b_G – коэффициент несимметрии активных проводимостей фаз сети;

d – относительная суммарная активная проводимость фаз сети относительно земли;

$U_{\text{Нсм}}$ – напряжение смещения нейтрали сети;

R_{Π} – переходное активное сопротивление цепи замыкания на землю;

G_{Π} – переходная активная проводимость цепи замыкания на землю;

\underline{Y}_{Φ} – полная комплексная проводимость фаз сети относительно земли, когда она одинакова в трех фазах;

G_{Φ} – суммарная активная проводимость фаз сети относительно земли, когда она одинакова в трех фазах;

$\dot{I}_A, \dot{I}_B, \dot{I}_C$ – токи, протекающие через суммарные проводимости фаз сети относительно земли;

$\dot{I}_{zR=0}$ – ток в месте замыкания при переходном сопротивлении, равном нулю;

C_{AB}, C_{BC}, C_{AC} – суммарные междуфазные емкости фаз сети;

$C_{\text{мф}}$ – суммарная междуфазная емкость, когда она одинакова между парами всех фаз;

u_A, u_B, u_C – мгновенные значения напряжений фаз сети;

e_A, e_B, e_C – мгновенные значения ЭДС источника питания;

$u_{\text{нач}}, u_{\text{пр}}$ – мгновенные значения начального и принужденного напряжений при переходном процессе;

u_M – мгновенное максимальное значение напряжения при переходном процессе;

δ_1 – коэффициент затухания переходного процесса накопления избыточных зарядов на емкостях неповрежденных фаз при зажигании дуги;

ω_1 – частота свободных колебаний переходного процесса накопления избыточных зарядов на емкостях неповрежденных фаз при зажигании дуги;

T_1 – период свободных колебаний переходного процесса накопления избыточных зарядов на емкостях неповрежденных фаз при зажигании дуги;

$k_{\delta 1}$ – коэффициент снижения амплитуды свободных колебаний за половину периода переходного процесса накопления избыточных зарядов на емкостях неповрежденных фаз при зажигании дуги;

k_C – коэффициент, определяющий влияние междуфазных емкостей на начальные напряжения на неповрежденных фазах при зажигании дуги;

$R_{\text{экв}}, L_{\text{экв}}$ – соответственно эквивалентные активное сопротивление и индуктивность на пути переходного тока при зажигании дуги;

$\delta_2, \omega_2, k_{\delta 2}$ – соответственно коэффициент затухания, частота свободных колебаний и коэффициент снижения амплитуды свободных колебаний за половину периода переходного процесса восстановления напряжения на поврежденной фазе после гашения дуги;

$E_{\text{Фм}}$ – амплитуда ЭДС источника питания сети;

$u_{\text{ВМ}}, u_{\text{СМ}}$ – мгновенные максимальные значения напряжений на неповрежденных фазах сети;

$u_{\text{п.г.}}$ – мгновенное максимальное значение напряжения на поврежденной фазе после гашения дуги (пик гашения);

$t_{\text{п.г.}}$ – момент времени, когда имеет место пик гашения;

Δt_D – время горения дуги (от момента зажигания до момента погасания);

n – номер текущего цикла «зажигания – погасания дуги» ($n = 1, 2, 3, \dots$);

φ_3 – фазовый угол в момент зажигания дуги, при котором имеет место максимальное перенапряжение по теории Белякова;

Глава 4

$E_{\text{Фmv}}$ – амплитуда v -й гармоники ЭДС источника питания сети;

$\dot{E}_{\text{Av}}, \dot{E}_{\text{Bv}}, \dot{E}_{\text{Cv}}$ – векторы v -й гармоники ЭДС источника питания;

L – индуктивность дугогасящего реактора;

B_L – индуктивная проводимость дугогасящего реактора;

G_L – активная проводимость, учитывающая потери в дугогасящем реакторе;

$\dot{I}_{3\nu}$ – вектор ν -й гармоники тока в месте замыкания;

ν – коэффициент расстройки компенсации емкостного тока;

ω_0 – резонансная частота колебательного контура, образованного индуктивностью дугогасящего реактора и суммарной емкостью сети;

L_Φ – эквивалентная продольная индуктивность фазы сети;

ω_3 – частота свободных колебаний напряжения на нейтрали в компенсированной сети после погасания дуги;

$u_{ог}$ – мгновенное значение огибающей восстанавливающегося напряжения на поврежденной фазе после погасания дуги.

Глава 5

G_N – проводимость заземляющего резистора;

G_{N*} – относительная проводимость заземляющего резистора, приведенная к суммарному емкостному сопротивлению сети;

$R_{П*}$ – относительное переходное активное сопротивление цепи замыкания на землю, приведенной к суммарному емкостному сопротивлению сети;

\dot{I}_C – емкостная составляющая тока замыкания на землю;

\dot{I}_a – активная составляющая тока замыкания, обусловленная активной проводимостью фаз сети относительно земли;

\dot{I}_{aN} – активная составляющая тока замыкания, обусловленная заземлением нейтрали через резистор;

I_{aN*} – отношение дополнительного активного тока к емкостному току замыкания;

ω_{p1}^2 – квадрат резонансной частоты эквивалентного контура переходного емкостного тока;

d_1' , ω_{p1}^2 – соответственно коэффициент затухания и резонансная частота контура переходного емкостного тока без учета влияния заземляющего резистора;

u_{N0} – напряжение на нейтрали в момент погасания дуги;

τ_N – постоянная времени процесса стекания избыточных зарядов;

β_3 – угол, определяемый моментами времени между моментом погасания дуги и моментом перехода через нуль $e_A(t)$.

Глава 6

τ_3 – постоянная времени затухания амплитуды свободных колебаний на нейтрали.

Глава 7

\dot{I}'_3 – ток в месте замыкания, который имел бы место без источника дополнительного тока;

$\dot{I}_{\text{доп}}$ – ток дополнительного источника;

$\dot{I}_{\text{доп а}}$, $\dot{I}_{\text{доп р}}$ – активная и реактивная составляющие дополнительного тока;

$L_{\text{доп}}$ – индуктивность дополнительного реактора, подключаемого к одной фазе сети;

\dot{I}_{30} – составляющая тока замыкания, определяемая суммарной проводимостью сети относительно земли;

$\dot{I}_{3\text{н}}$ – составляющая тока замыкания, определяемая несимметрией проводимостей фаз;

$\Delta v_{\text{доп}}$ – отношение проводимости дополнительного реактора к суммарной емкостной проводимости фаз сети относительно земли;

$I_{\text{оа}}$ – активная составляющая тока замыкания;

$I_{\text{ор}}$ – реактивная составляющая тока замыкания;

$I_{\text{на}}$ – активная составляющая тока несимметрии;

$I_{\text{нр}}$ – реактивная составляющая тока несимметрии.

БИБЛИОГРАФИЧЕСКИЙ СПИСОК

1. Вильгейм Р., Уотерс М. Заземление нейтрали в высоковольтных системах. – М.: Госэнергоиздат, 1959. – 415 с.
2. Черногубовский З.П. Заземление нейтрали электрических систем высокого напряжения. – Ленинград, 1934. – 201 с.
3. Сирота И.М., Кисленко С.Н., Михайлов А.М. Режимы нейтрали электрических систем. – Киев: Изд-во АН СССР, 1985. – 264 с.
4. Лихачев Ф.А. Замыкания на землю в сетях с изолированной нейтралью и с компенсацией емкостных токов. – М.: Энергия, 1971. – 152 с.
5. Труды Всероссийской научно-тех. конференции «Ограничение перенапряжений и режимы заземления нейтралей сетей 6–35 кВ». – Новосибирск: Изд-во НГТУ, 2000. – 198 с.
6. Труды Всероссийской научно-тех. конференции «Ограничение перенапряжений и режимы заземления нейтралей сетей 6–35 кВ». – Новосибирск: Изд-во НГТУ, 2002. – 200 с.
7. Труды Всероссийской научно-тех. конференции «Ограничение перенапряжений и режимы заземления нейтралей сетей 6–35 кВ». – Новосибирск: Изд-во НГТУ, 2004. – 185 с.
8. Ульянов С.А. Электромагнитные переходные процессы в энергетических системах. – М.: Наука, 1970. – 510 с.
9. Техника высоких напряжений / Под ред. Д.В. Разевига. – М.: Энергия, 1976. – 488 с.
10. Неклепаев Б.Н. Электрическая часть электростанций и подстанций. – М.: Энергоатомиздат, 1986. – 640 с.
11. Васильев А.А., Крючков И.П., Наяшкова Е.Ф., Околович М.Н. Электрическая часть станций и подстанций. – М.: Энергоатомиздат, 1990. – 575 с.
12. Буткевич Т.В. Дуговые процессы при коммутациях электрических цепей. – М.: Высшая школа, 1967. – 212 с.
13. Базуткин В.В., Ларионов В.П., Пинталь Ю.С. Техника высоких напряжений. – М.: Энергоатомиздат, 1986. – 463 с.
14. Кадомская К.П., Лавров Ю.А., Рейхердт А.А. Перенапряжения в электрических сетях различного напряжения и защита от них: Учебник. – Новосибирск: Изд-во НГТУ, 2004. – 368 с.
15. Лихачев Ф.А. Инструкция по выбору, установке и эксплуатации дугогасящих катушек. – М.: Энергия, 1971. – 104 с.
16. Евдокунин Г.А. Анализ внутренних перенапряжений в сетях 6–10 кВ и обоснование необходимости перевода сетей в

- режим с резистивным заземлением нейтрали. Труды Всероссийской научно-тех. конференции «Ограничение перенапряжений и режимы заземления нейтралей сетей 6–35 кВ». – Новосибирск: Изд-во НГТУ, 2002. – С. 9 – 13.
17. Кадомская К.П., Виштибеев А.В. О резистивном заземлении нейтрали в сетях 6–35 кВ различного назначения. Труды Всероссийской научно-тех. конференции «Ограничение перенапряжений и режимы заземления нейтралей сетей 6–35 кВ». – Новосибирск: Изд-во НГТУ, 2000. – С. 41 – 48.
 18. Целебровский Ю.В. Опыт эксплуатации электрических сетей с резистивным заземлением нейтрали. Труды Всероссийской научно-тех. конференции «Ограничение перенапряжений и режимы заземления нейтралей сетей 6–35 кВ». – Новосибирск: Изд-во НГТУ, 2004. – С. 56 – 62.
 19. Ильиных М.В., Сарин Л.И., Челазнов А.А. Применение высокоомных резисторов в сети с компенсированной нейтралью. Труды Всероссийской научно-тех. конференции «Ограничение перенапряжений и режимы заземления нейтралей сетей 6–35 кВ». – Новосибирск: Изд-во НГТУ, 2002. – С. 49–52.
 20. Майборода В.Н., Обабков В.К. Внедрение полного подавления дуговых замыканий на землю в сети СН 6 кВ Тюменской ТЭЦ-1 на основе резонансного заземления нейтрали. Труды Всероссийской научно-тех. конференции «Ограничение перенапряжений и режимы заземления нейтралей сетей 6–35 кВ». – Новосибирск: Изд-во НГТУ, 2000. – С. 65 – 72.
 21. Обабков В.К., Целуевский Ю.Н. Идеология полного подавления дуговых замыканий как универсальное средство борьбы с однофазными замыканиями на землю в сетях 6–35 кВ различного назначения. Труды Всероссийской научно-тех. конференции «Ограничение перенапряжений и режимы заземления нейтралей сетей 6–35 кВ». – Новосибирск: Изд-во НГТУ, 2004. – С. 67 – 75.

СОДЕРЖАНИЕ

ВВЕДЕНИЕ	3
1. КЛАССИФИКАЦИЯ СЕТЕЙ ПО ЗНАЧЕНИЮ ЭЛЕКТРИЧЕСКИХ ВЕЛИЧИН ПРИ ОДНОФАЗНОМ ЗАМЫКАНИИ НА ЗЕМЛЮ	5
2. СЕТИ С ЭФФЕКТИВНЫМ ЗАЗЕМЛЕНИЕМ НЕЙТРАЛИ	11
3. СЕТИ С ИЗОЛИРОВАННОЙ НЕЙТРАЛЬЮ	19
3.1. Сети с изолированной нейтралью в нормальном режиме	19
3.2. Режим устойчивого замыкания на землю	22
3.3. Режим дугового замыкания на землю	27
3.3.1. Общие сведения о дуге переменного тока	27
3.3.2. Переходные процессы при пробое фазы на землю и обрыве дуги	30
3.3.3. Теории формирования перенапряжений при дуговых замыканиях на землю	44
4. СЕТИ С КОМПЕНСАЦИЕЙ ЕМКОСТНОГО ТОКА	50
4.1. Компенсированная сеть при устойчивом замыкании на землю	51
4.2. Компенсированная сеть в нормальном режиме	62
4.3. Переходные процессы при замыкании на землю в сети с компенсацией емкостного тока	64
4.4. Перенапряжения при дуговых замыканиях в сети с компенсацией емкостных токов	76
4.5. Влияние точности настройки компенсации емкостных токов на процессы, определяющие эффективность компенсации	81
5. СЕТИ С РЕЗИСТИВНЫМ ЗАЗЕМЛЕНИЕМ НЕЙТРАЛИ.....	85
5.1. Сети с резистивным заземлением нейтрали при устойчивом замыкании на землю и нормальном режиме работы сети	87
5.2. Влияние резистивного заземления нейтрали на перенапряжения при повторных зажиганиях дуги	92
6. СЕТИ С КОМБИНИРОВАННЫМ ЗАЗЕМЛЕНИЕМ НЕЙТРАЛИ	99
7. ПОЛНАЯ КОМПЕНСАЦИЯ ТОКА ЗАМЫКАНИЯ НА ЗЕМЛЮ.....	103
Список обозначений	111
БИБЛИОГРАФИЧЕСКИЙ СПИСОК	115
СОДЕРЖАНИЕ	117

Роберт Александрович Вайнштейн
Наталья Васильевна Коломиец
Вера Васильевна Шестакова

**РЕЖИМЫ РАБОТЫ НЕЙТРАЛИ
В ЭЛЕКТРИЧЕСКИХ СИСТЕМАХ**
Учебное пособие

Научный редактор,
доктор технических наук,
профессор

Б.В. Лукутин

Редактор

Е.О.Фукалова