Министерство образования Российской Федерации
Государственное образовательное учреждение высшего профессионального образования
СЕВЕРО-ЗАПАДНЫЙ ГОСУДАРСТВЕННЫЙ ЗАОЧНЫЙ
ТЕХНИЧЕСКИЙ УНИВЕРСИТЕТ

Г.Н. Цицикян

ИЗОЛЯЦИЯ И ПЕРЕНАПРЯЖЕНИЯ

ИЗБРАННЫЕ ГЛАВЫ ПИСЬМЕННЫХ ЛЕКЦИЙ

Санкт-Петербург
2004

Утверждено редакционно-издательским советом университета

УДК621.3.048:621.316.92

Цицикян Г.Н. Изоляция и перенапряжения. Избранные главы письменных лекций. – СПб.: СЗТУ, 2004. - с.

Настоящие лекции разработаны в соответствии с требованиями государственных образовательных стандартов высшего профессионального образования по направлению подготовки дипломированного специалиста 650900-«Электроэнергетика» (специальность 100400 – «Электроснабжение») и направлению подготовки бакалавров 551700-«Электроэнергетика».

Рецензенты: кафедра электроснабжения СЗТУ (заведующий кафедрой Г.З. Зайцев, канд. техн. наук, проф.); Б.Г.Анискин, канд. техн. наук, доцент кафедры электротехники и электромеханики Санкт-Петербургского государственного горного института (Технического университета).

Введение

«Изоляция и перенапряжения» является одной из базовых дисциплин для электроэнергетических специальностей, к которым относится и электроснабжение.

Выбор глав продиктован следующими соображениями. Как следует из названия дисциплины, «Изоляция и перенапряжения» являются относительно самостоятельными подразделами общего курса «Техника высоких напряжений». То обстоятельство, что в данных лекциях уделено основное внимание перенапряжениям связано, во-первых, со спецификой процессов, их сопровождающих, еще не полностью изученных, и, во-вторых, с трудностями в их описании и прогнозировании.

Перенапряжения являются характеристиками качества электроэнергии, и недопустимое их превышение может приводить к выходу из строя электрооборудования и нарушению нормального функционирования систем электроснабжения. Две первые главы относятся к внутренним перенапряжениям, которые, в свою очередь, подразделяются на установившиеся и коммутационные. К внешним относятся в основном грозовые перенапряжения, которым посвящена последняя глава.

Следует иметь в виду, что задание на контрольную работу в [1] сопровождается подробными методическими указаниями и выводами. В, частности, дан вывод общего выражения для напряжения на емкости в контуре *R, L, C* при ненулевых начальных условиях, являющегося ключевым при анализе перенапряжений в процессе коммутации ряда схем, сводящихся, в том числе, к двум резонансным контурам.

Кроме того, в [1] рассмотрены условия возникновения короны в трехфазной воздушной линии передачи и примеры на проверку исключения короны в хорошую погоду. Поэтому эти разделы в лекциях не рассматриваются.

Излагаемый материал рассчитан на подготовленного читателя, владеющего методами теоретических основ электротехники и прикладной математики.

Глава 1. Установившиеся перенапряжения в сетях и в линиях передач

1.1 Однофазные замыкания на землю и перенапряжения в сетях с изолированной и компенсированной нейтралью

Большая часть замыканий на землю возникает на воздушных линиях электропередачи в результате перекрытия изоляции при грозовых разрядах с последующим переходом импульсного перекрытия в дуговое замыкание.

Гашение дуги может быть достигнуто путем компенсации тока однофазного замыкания, носящего емкостной характер, включением реактора между нейтралью источника и землей.

В сетях небольшой протяженности при изолированной нейтрали ток однофазного замыкания составляет всего несколько ампер. При таких токах дуга, возникающая в месте замыкания, оказывается неустойчивой и через некоторое время гаснет.

С ростом рабочего напряжения и с увеличением протяженности линии емкостной ток замыкания на землю может возрасти до десятков и даже сотен ампер. Дуга при таких условиях может гореть длительно, и может перебрасываться на соседние фазы.

В соответствии с РД 153-34.3-35.125-99 «Руководство по защите электрических сетей 6-1150 кВ от грозовых и внутренних перенапряжений», (Санкт-Петербург, 1999 г.), дугогасящие аппараты для компенсации емкостного тока замыкания на землю должны устанавливаться в сетях 6-35 кВ, если величина этого тока превышает следующие значения:

Номинальное Напряжение сети, кВ	6	10	15-20	35
Емкостной ток Замыкания на землю, А	30	20	15	10

В сетях 6-35 кВ с ВЛ на железобетонных или металлических опорах дугогасящие аппараты должны устанавливаться при емкостном токе замыкания на землю более 10 А. В сетях 6-35 кВ с повышенными требованиями к электробезопасности (например, шахтные сети) компенсация требуется при емкостном токе 5 А и более.

Анализируя схему, показанную на рис.1.1, где $\dot{U}_N$ - комплекс напряжения на сопротивлении нейтрали Z_N, $Z_З$ – сопротивление ветви с током замыкания (показано пунктиром), а остальные обозначения ясны из рис. 1.1, имеем:

$$\left.\begin{aligned}\dot U_A &= \dot U'_A + \dot U_N = \dot I_A Z_A + \dot U_N\\ \dot U_B &= \dot U'_B + \dot U_N = \dot I_B Z_B + \dot U_N\\ \dot U_C &= \dot U'_C + \dot U_N = \dot I_C Z_C + \dot U_N\end{aligned}\right\} \qquad (1.1.1)$$

Решая систему (1.1.1) относительно токов $\dot I_A$, $\dot I_B$, $\dot I_C$, для их суммы получим:

$$\dot I_A + \dot I_B + \dot I_C = Y_A \dot U_A + Y_B \dot U_B + Y_C \dot U_C - (Y_A + Y_B + Y_C)\dot U_N, \qquad (1.1.2)$$

где $Y_{A,B,C} = \dfrac{1}{Z_{A,B,C}}$

При $\dot I_A + \dot I_B + \dot I_C = \dot I_N$, т.е. при включенном сопротивлении Z_N в нейтрали и отсутствии замыкания,

$$\dot U_N = Z_N \dot I_N = Z_N(\dot I_A + \dot I_B + \dot I_C), \qquad (1.1.3)$$

И тогда введя проводимость

$Y_N = Z_N^{-1}$,

найдем, что $\dot U_N$ определяется выражением:

$$\dot U_N = \frac{Y_A \dot U_A + Y_B \dot U_B + Y_C \dot U_C}{Y_A + Y_B + Y_C + Y_N} \qquad (1.1.4)$$

Обозначая через Z величину
$(Y_A + Y_B + Y_C)^{-1}$,
выражение напряжения на нейтрали (см.(1.1.4)), может быть записано в виде

$$\dot U_N = \dot U_{Nиз} \frac{Z_N}{Z + Z_N}, \qquad (1.1.5)$$

где

$$\dot U_{Nиз} = \frac{Y_A \dot U_A + Y_B \dot U_B + Y_C \dot U_C}{Y_A + Y_B + Y_C}, \qquad (1.1.6)$$

Ясно, что (1.1.6), определяется из выражения (1.1.4), но при Y_N=0.

Предположим, что в фазе «А» возникло замыкание на землю с сопротивлением току замыкания $Z_з$. Для определения тока $\dot I_з$ воспользуемся методом эквивалентного генератора напряжения. С этой целью найдем напряжение при разрыве ветви с $Z_з$, т.е. напряжение холостого хода для этой ветви. Это напряжение есть напряжение $\dot U'_A$, бывшее на фазе «А» до замыкания.

Метод эквивалентного генератора напряжения предполагает определение внешнего эквивалентного сопротивления относительно зажимов ветви с $Z_з$ при всех закороченных, действующих во внешней цепи источниках ЭДС (рис.1.2). (См. также рис.1.1 при $\dot E_A = \dot E_B = \dot E_C = 0$ и разомкнутых зажимах с $Z_з$).

Входное сопротивление относительно зажимов ветви с током замыкания равно

$$Z_{Bx} = \frac{1}{Y_A + Y_B + Y_C + Y_N} \qquad (1.1.7)$$

Отметим, что формулу (1.1.4) с учетом (1.1.7) можно переписать в виде:

$$\dot{U}_N = (Y_A \dot{U}_A + Y_B \dot{U}_B + Y_C \dot{U}_C) Z_{Bx} \qquad (1.1.4а)$$

Согласно методу эквивалентного генератора напряжения будем иметь

$$\dot{I}_з = \frac{U_{xx}}{Z_3 + Z_{Bx}}, \qquad (1.1.8)$$

где, в данном случае, $\dot{U}_{xx} = \dot{U}'_A$

Для обоснования выражения (1.1.8) поступим следующим образом. Всю внешнюю схему по отношению к зажимам выделенного элемента представим в виде активного двухполюсника (рис.1.3). Через выделенный элемент протекает ток I_3, который создает на его зажимах напряжение $\dot{U}_3 = \dot{I}_3 Z_3$. Замена элемента Z_3 с током $\dot{I}_3$ источником тока $J = \dot{I}_3$ (рис.1.4а) не повлияет на состояние двухполюсника А, а источник тока $\dot{J} = I_3$ на рис. 1.4б на отсоединенном элементе Z_3 создает то же напряжение $\dot{U}_3$. При этом напряжение на зажимах двухполюсника (рис.1.4а) можно получить методом суперпозиции как сумму напряжений, создаваемых расположенными внутри двухполюсника источниками при отсутствии тока I_3 (режим хх) и источником тока $J = I_3$, действующим между выделенными зажимами при отсутствии всех внешних по отношению к данным зажимам источниках ЭДС (закороченных источниках ЭДС). Поэтому

$$\dot{U}_3 = \dot{U}_{xx} - \dot{I}_3 Z_{Bx},$$

где Z_{Bx} - входное сопротивление двухполюсника, которое можно найти из первоначальной схемы, например схемы рис.1.1, путем закорачивания всех источников ЭДС. Знак минус здесь взят потому, что напряжение, обусловленное источником тока I_3 направлено навстречу напряжению U_{xx}, которое равно U'_A для схемы рис.1.1.

Из двух записанных последних выражений приходим к формуле (1.1.8).

Допуская, что величиной Z_3 можно пренебречь, и что

$$Y_A \pm Y_B \pm Y_C \cong j\omega C_{cp}, \; Y_N = \frac{1}{j\omega L_p},$$

где L_p – индуктивность реактора, а C_{cp} – средняя емкость фазы, из (1.1.7) и (1.1.8), находим:

$$\dot{I}_3 \cong \dot{U}'_A (3j\omega C_{cp} - j\frac{1}{\omega L_p}) = j\dot{U}'_A (3\omega C_{cp} - \frac{1}{\omega L_p}).$$

Отсюда $\dot{I}_3 \approx 0$, когда

$$X_p = \omega L_p = \frac{1}{3\omega C_{cp}}, \qquad (1.1.9)$$

что и обеспечивает гашение дуги и ликвидацию дугового замыкания.

Для реального реактора смещение нейтрали $\dot{U}_N$ определяется по формуле (1.1.5):

$$\dot{U}_N = \dot{U}_{N_{из}} \frac{R + j\omega L_P}{-j\dfrac{1}{3\omega C_{ср}} + R + j\omega L_P}, \qquad (1.1.10)$$

где R – активное сопротивление реактора, которое много меньше ωL_P, но все же отлично от нуля. С учетом формулы(1.1.9) (идеальная настройка реактора), имеем:

$$\left|\dot{U}_N\right| \cong \left|\dot{U}_{Nиз}\right| \frac{\omega L_P}{R} \qquad (1.1.11)$$

Таким образом, при идеальной настройке реактора смещение нейтрали $\left|\dot{U}_N\right|$ будет во столько раз больше смещения $\left|\dot{U}_{Nиз}\right|$, во сколько раз ωL_P больше *R*, которое может составлять десятки единиц. Последствия могут оказаться такими, что смещение нейтрали превысит фазное напряжение. Во избежание перенапряжения на нейтрали следует уменьшать $\left|\dot{U}_{Nиз}\right|$ и прибегать к некоторой расстройке реактора. $U_{Nиз}$ достаточно обычно уменьшить до 0,01 $U_ф$. При расстройке реактора рекомендуется прибегать к перекомпенсации.

В соответствии с ПУЭ степень несимметрии емкостей по фазам относительно земли, вызывающая, в основном, смещение $U_{Nиз}$, не должна превышать 0,75%. В противном случае, должно быть осуществлено выравнивание емкостей фаз относительно земли, например, транспонирование линий на шинах подстанций.

Обратимся вновь к рис.1.3. Отсоединим от активного двухполюсника ветвь с Z_3 (рис.1.5), приложив к зажимам напряжение, которое имело место до отсоединения путем включения источника ЭДС. При этом мы не изменяем состояние активного двухполюсника А.

Ток $\dot{I}_3$ (рис.1.5б) равен

$\dot{I}_3 = \dot{U}_3 Y_3$, где $Y_3 = \dfrac{1}{Z_3}$

С другой стороны, этот ток может быть, руководствуясь принципом наложения, определен как сумма токов, один из которых обусловлен всеми генераторами, находящимися внутри А при короткозамкнутом источнике $\dot{U}_3$, а другой, вызванный источником U_3 при отсутствии (закорачивании) всех внешних по отношению к зажимам источников (т.е. находящихся «внутри» А).

Отсюда (рис.1.5а) $\dot{I}_3 = \dot{I}_{КЗ} - \dot{U}_3 Y_{ВХ}$, где $Y_{ВХ}$ - входная проводимость двухполюсника А относительно выделенных зажимов. Из приведенных выражений получаем:

$$\dot{U}_З = \frac{\dot{I}_{КЗ}}{Y_З + Y_{ВХ}} \qquad (1.1.12)$$

Формула (1.1.12) и отражает существо метода эквивалентного генератора тока. Для нахождения напряжения $\dot{U}_З$ надо найти ток $\dot{I}_{КЗ}$ при закороченных зажимах и входную проводимость $Y_{ВХ}$.

Обратим внимание на следующее обстоятельство. Объединяя схемы рис.1.5а и рис.1.5б до слияния по линиям вертикальных перемычек, можно сами перемычки исключить, поскольку токи в них были бы равны $\dot{I}_З$, но направленными навстречу друг другу. Тогда имеем схему (рис.1.6), в которой не конкретизирована величина ЭДС источников, одинаковых по величине, но встречно-направленных. Ясно, что включение этих ЭДС не меняет состояния всей системы. Закоротим источник ЭДС 2 и подберем источник ЭДС 1 так, чтобы ток через $Z_З$ был равен нулю. Для двухполюсника А эта ситуация отвечает режиму холостого хода. Отсюда следует, что величина источников ЭДС должна быть равна $\dot{U}_{XX} = \dot{U}'_A$

Для нахождения искомого тока $\dot{I}_З$ имеем, следовательно, следующую схему (рис.1.7), в которой активный двухполюсник заменен пассивным, получаемым из А путем исключения всех источников, и оставлен источник под номером 2, поскольку действие источника ЭДС 1 было учтено при приведении к режиму холостого хода. Теперь, ясно, что выражение для $\dot{I}_З$ равно:

$$\dot{I}_З = \frac{\dot{U}'_A}{Z_{ВХ} + Z_З},$$

совпадающее с формулой (1.1.8).

Аналогично поступая, можно объединить рис.1.4а с рис.1.4б, не конкретизируя величину источников тока, включенных встречно, и ничего не меняющих в состоянии системы.

Разорвем источник тока 2 и подберем источник тока 1 таким образом, чтобы напряжение на $Z_З$ было равно нулю (рис.1.8,а). Для двухполюсника А это означает короткое замыкание на его зажимах. Отсюда ясно, что эквивалентная схема для определения напряжения $\dot{U}_З$ должна отвечать рис.1.8б, и, следовательно, формуле

$$\dot{U}_З = \frac{\dot{I}_{КЗ}}{Y_З + Y_{ВХ}},$$

совпадающей с выражением (1.1.12).

1.2 Перенаряжения при неполнофазных режимах

Рассмотрим короткую трехфазную линию в системе с заземленной нейтралью, обладающей фазными и междуфазными емкостями. На конце линии в каждой фазе включены реакторы. Предполагается, что эти реакторы обеспечивают высокую степень компенсации емкостного тока (не путать с реактором в нейтрали). Будем считать, что достигнута известная перекомпенсация, т.е.

$\frac{1}{\omega L_{р\phi}} \succ \omega C_{\phi}$ или $1 \succ \omega^2 C_{\phi} L_{р\phi}$.

Сначала рассмотрим случай, когда отказала при включении одна фаза выключателя, например, фаза «А» (рис.1.9). На рис.1.9 $\dot{E}_{A,B,C}$ - система ЭДС источника, $\dot{U}_A$ - напряжение фазы «А», которую надо определить. Остальные обозначения ясны из рисунка. При этом фаза «А» осталась неподключенной к трехфазному источнику ЭДС, т.е. имеет место неполнофазный режим. Напряжение на фазе «А» - это напряжение на соответствующей фазной емкости и параллельной этой емкости индуктивности реактора $L_{р\phi}$.

Напряжение на этой фазе найдем , используя метод эквивалентного генератора тока. Нами было выяснено при рассмотрении метода эквивалентного генератора тока, что напряжение на выделенном элементе может быть определено если известны ток при закорачивании выводов выделенного элемента и входная проводимость внешнего пассивного двухполюсника относительно выводов этого элемента. Напряжение на невключенной фазе «А» равно:

$$\dot{U}_A = \frac{\dot{I}_{к.з.}}{Y_A + Y_{BX}} \tag{1.2.1}$$

Проводимость фазы «А»:

$$Y_A = j\omega C_{\phi} + \frac{1}{j\omega L_{р\phi}} \tag{1.2.2}$$

Входная проводимость внешней схемы определяется на основании следующих соображений. При закорачивании ЭДС источников в фазах «В» и «С» (т.е. включившихся фаз) междуфазная емкость и фазные емкости с индуктивностями реакторов оказываются закороченными (рис.1.9). Параллельно же емкости и индуктивности реактора фазы «А» оказываются подключенными две междуфазные емкости (между «В» и «А», «С» и «А»).

Эквивалентная схема имеет вид соответствующий рис.1.10, поэтому

$$Y_{BX} = 2j\omega C_{м\phi}. \tag{1.2.3}$$

Ток КЗ при закорачивании фазы «А» - это сумма токов текущих через междуфазные емкости, включенные между «В» и «А», и «С» и «А». Поэтому:

$$\dot{I}_{к.з.} = j\omega C_{м\phi}\dot{E}_B + j\omega C_{м\phi}\dot{E}_C = -j\omega C_{м\phi}\dot{E}_A \tag{1.2.4}$$

Отсюда:

$$\dot{U}_A = \frac{-j\omega C_{м\phi}\dot{E}_A}{2j\omega C_{м\phi} + j\omega C_{\phi} + \frac{1}{j\omega L_{р\phi}}} = \frac{\omega^2 C_{м\phi} L_{р\phi}\dot{E}_A}{1-\omega^2 L_{р\phi}(2C_{м\phi}+C_{\Phi})} = 0{,}5\dot{E}_A \frac{2\omega^2 C_{м\phi} L_{р\phi}}{1-\omega^2 L_{р\phi}(2C_{м\phi}+C_{\Phi})} \tag{1.2.5}$$

Опасность перенапряжений заключена в близости знаменателя к нулю. Нуль получается тогда, когда

$$1 = \omega^2 L_{р\phi}(2C_{м\phi} + C_{\Phi})$$

Эквивалентная схема, соответствующая формуле (1.2.5) имеет вид как на рис.1.11.

При невключившихся двух фазах,например «А» и «В», эквивалентная схема для этих фаз имеет вид как на рис.1.12.

Сравнивая с предыдущей эквивалентной схемой (рис.1.11), находим условие резонанса в виде

$$1 - \omega^2 L_{р\phi}(C_{м\phi} + C_{\Phi}) = 0 \qquad (1.2.6)$$

Обратим внимание на то, что фазные емкости и фазные индуктивности включившихся фаз не влияют на определение напряжений на невключившейся фазе.

1.3 Установившиеся перенапряжения в электропередачах. Емкостной эффект.

Рассмотрение установившихся перенапряжений в линиях электропередач целесообразно начать с краткого вывода выражений для напряжения и тока вдоль однородной линии, характеризуемой активным сопротивлением $R^{/}$, активной проводимостью $G^{/}$, индуктивностью $L^{/}$ и емкостью $C^{/}$ на единицу длины.

На рис.1.13 показана эквивалентная схема участка линии длиной Δx на расстоянии x от начала линии с напряжениями $\dot{U}(x)$ и $\dot{U}(x+\Delta x)$ и токами $\dot{I}(x)$ и $\dot{I}(x+\Delta x)$ в начале и в конце участка.

Из схемы (рис.1.13) вытекают следующие уравнения:

$$\dot{U}(x+\Delta x) - \dot{U}(x) = -\dot{I}(x)(R^{/} + j\omega L^{/})\Delta x\ ,$$

$$\dot{I}(x+\Delta x) - \dot{I}(x) = -\dot{U}(x+\Delta x)(G^{/} + j\omega C^{/})\Delta x\ .$$

Разделив левые и правые части записанных уравнений на Δx и устремив Δx к нулю получим:

$$\frac{d\dot{U}(x)}{dx} = -\dot{I}(x)(\ R^{/} + j\omega L^{/}), \qquad (1.3.1)$$

$$\frac{d\dot{I}(x)}{dx} = -\dot{U}(x)(\ G^{/} + j\omega C^{/}), \qquad (1.3.2)$$

замечая, что $\dot{U}(x+\Delta x)\Big|_{\Delta x \to 0} = \dot{U}(x)$.

Дифференцируя (1.3.1) по x и подставляя (1.3.2), находим:

$$\frac{d^2\dot{U}(x)}{dx^2} = (\ R^{/} + j\omega L^{/})(\quad G^{/} + j\omega C^{/})\dot{U}(x) = \gamma^2\dot{U}(x)\ , \qquad (1.3.3)$$

где $\gamma^2 = (R^{/} + j\omega L^{/})(G^{/} + j\omega C^{/}) = R^{/}G^{/} + j\omega(R^{/}C^{/} + L^{/}G^{/}) - \omega^2 L^{/}C^{/}$ (1.3.4)

Дифференцируя (1.3.2) по x и подставляя в него (1.3.1), получим такое же уравнение, но относительно $\dot{I}(x)$:

$$\frac{d^2 \dot{I}(x)}{dx^2} = \gamma^2 \dot{I}(x) \qquad (1.3.5)$$

Решение уравнения (1.3.3), переписанное в виде

$$\frac{d^2 \dot{U}(x)}{dx^2} - \gamma^2 \dot{U}(x) = 0,$$

будем искать в соответствии с выражением

$$\dot{U}(x) = \dot{A}e^{\gamma x} + \dot{B}e^{-\gamma x}, \qquad (1.3.6)$$

где $\dot{A}$ и $\dot{B}$ - неизвестные комплексы, не зависящие от *x*.

Подставив (1.3.6) в (1.3.1) и учитывая (1.3.4), для $\dot{I}(x)$ получим:

$$\dot{I}(x) = (-1)(R' + j\omega L')^{-1}\gamma(\dot{A}e^{\gamma x} - \dot{B}e^{-\gamma x}) = -Z_B^{-1}(\dot{A}e^{\gamma x} - \dot{B}e^{-\gamma x}), \qquad (1.3.7)$$

где $Z_B = \left(\dfrac{R' + j\omega L'}{G' + j\omega C'}\right)^{1/2}$ (1.3.8)

Для линии без потерь $R' = G' = 0$ и $Z_B = \sqrt{\dfrac{L'}{C'}}$ (1.3.9)

Теперь перейдем к рассмотрению линии длиной *l,* присоединенной к источнику ЭДС $\dot{E}$ с внутренним сопротивлением Z_u и замкнутой на конце на сопротивление Z (рис.1.14)

Тогда на конце линии при *x=l*

$$\dot{U}(l) - Z\,\dot{I}(l) = 0,$$

а в начале линии

$$\dot{E} = Z_u \dot{I}(0) + \dot{U}(0)$$

С учетом выражений (1.3.6) и (1.3.7) при *x=0* записанное уравнение для начала линии приводится к виду:

$$-\frac{Z_u}{Z_B}(\dot{A} - \dot{B}) + \dot{A} + \dot{B} = \dot{E}$$

или

$$(Z_B - Z_u)\dot{A} + (Z_B + Z_u)\dot{B} = \dot{E}Z_B \qquad (1.3.10)$$

Из уравнения для конца линии имеем с учетом (1.3.6) и (1.3.7) при *x=l*:

$$\dot{A}e^{\gamma l} + \dot{B}e^{-\gamma l} + \frac{Z}{Z_B}(\dot{A}e^{\gamma l} - \dot{B}e^{-\gamma l}) = 0$$

или

$$(Z + Z_B)e^{\gamma l}\dot{A} + (Z_B - Z)e^{-\gamma l}\dot{B} = 0 \qquad (1.3.11)$$

Решая систему уравнений (1.3.10) и (1.3.11) относительно $\dot{A}$ и $\dot{B}$, найдем:

$$\dot{A} = \frac{\dot{E}Z_B(Z_B - Z)e^{-\gamma l}}{(Z_B - Z_u)(Z_B - Z)e^{-\gamma l} - (Z_B + Z_u)(Z + Z_B)e^{\gamma l}} = \frac{Z_B\dot{E}}{Z_B + Z_u}\frac{q_2 e^{-2\gamma l}}{1 - q_1 q_2 e^{-2\gamma l}},$$

и аналогичное выражение для $\dot{B}$:

$$\dot{B} = \frac{-\dot{E}Z_B(Z_B - Z)e^{-\gamma l}}{(Z_B - Z_u)(Z_B - Z)e^{-\gamma l} - (Z_B + Z_u)(Z + Z_B)e^{\gamma l}} = \frac{Z_B\dot{E}}{(Z_B + Z_u)}\frac{1}{1 - q_1 q_2 e^{-2\gamma l}},$$

где q_1 и q_2 равны:

$$q_1 = \frac{Z_u - Z_B}{Z_u + Z_B} \text{ и } q_2 = \frac{Z - Z_B}{Z + Z_B} \tag{1.3.12}$$

Подставляя полученные для $\dot{A}$ и $\dot{B}$ выражения в уравнения (1.3.6) и (1.3.7), получим для напряжения $\dot{U}(x)$ и тока $\dot{I}(x)$ для схемы (рис.1.14), где x отсчитывается от начала к концу линии, следующие окончательные выражения:

$$\dot{U}(x) = \frac{Z_B \dot{E}}{(Z_B + Z_u)} \frac{q_2 e^{\gamma x} e^{-2\gamma l} + e^{-\gamma x}}{1 - q_1 q_2 e^{-2\gamma l}}, \tag{1.3.13}$$

$$\dot{I}(x) = -\frac{\dot{E}}{(Z_B + Z_u)} \frac{q_2 e^{\gamma x} e^{-2\gamma l} - e^{-\gamma x}}{1 - q_1 q_2 e^{-2\gamma l}}, \tag{1.3.14}$$

причем в согласии с (1.3.12) q_1 и q_2 являются коэффициентами отражения от начала и конца линии.

При $Z_u = Z_B - q_1 = 0$, при $Z = Z_B - q_2 = 0$. При $Z \to \infty$, что отвечает в пределе разомкнутой на конце линии, $q_2 \to 1$, а при $Z = 0$, т.е. для короткозамкнутой линии $q_2 = -1$. При $Z_u = 0 - q_1 = -1$.

Коэффициент γ, называемый коэффициентом распространения и определяемый по (1.3.4), может быть представлен в виде

$$\gamma = \alpha + j\beta, \tag{1.3.15}$$

где α - коэффициент затухания,

β - коэффициент фазы.

При $R' = G' = 0$ из (1.3.4) находим, что $\alpha = 0$, а $\beta = \omega\sqrt{L'C'}$.

Если $G' = 0$, а $R' \neq 0$, то

$$\gamma\big|_{G'=0} = (\alpha + j\beta)\big|_{G'=0} = \sqrt{j\omega R'C' + j^2\omega^2 L'C'} = j\omega\sqrt{L'C'}\sqrt{1 - j\frac{R'}{\omega L'}} \cong j\omega\sqrt{L'C'}(1 - j\frac{R'}{2\omega L'}) =$$
$$= \frac{1}{2}\frac{R'}{\sqrt{\frac{L'}{C'}}} + j\omega\sqrt{L'C'} \tag{1.3.16}$$

при условии, что $\frac{R'}{\omega L'} \prec\prec 1$.

В этом случае

$$\alpha = \frac{1}{2}\frac{R'}{\sqrt{L'/C'}} \text{ и } \beta = \omega\sqrt{L'C'} \tag{1.3.17}$$

При $R' = G' = 0$ для Z_B имеем формулу (1.3.9). Выражение для Z_B при $G' = 0$, но $R' \neq 0$, можно представить в следующем виде:

$$Z_B = \sqrt{\frac{R' + j\omega L'}{j\omega C'}} = \sqrt{-j\frac{R'}{C'} + \frac{L'}{C'}} = \sqrt{\frac{L'}{C'}}\sqrt{1 - j\frac{R'}{\omega L'}} \cong \sqrt{\frac{L'}{C'}}(1 - j\frac{R'}{2\omega L'}) = \sqrt{\frac{L'}{C'}}(1 - j\frac{\alpha}{\beta}), \tag{1.3.18}$$

где α и β определяются на основании (1.3.17).

Для разомкнутой на конце линии $q_2 = 1$, и из (1.3.13) находим:

$$\dot{U}(l) = \frac{Z_B \dot{E}}{Z_u + Z_B} \frac{2e^{-\gamma l}}{1 - q_1 e^{-2\gamma l}}, \tag{1.3.19}$$

$$\dot{U}(0) = \frac{Z_B \dot{E}}{Z_u + Z_B} \frac{1 + e^{-2\gamma l}}{1 - q_1 e^{-2\gamma l}} \tag{1.3.20}$$

Отметим, что при $Z_и = 0$ и, следовательно, $q_1 = -1$, из (1.3.20) имеем $\dot{U}(0) = \dot{E}$

В общем случае $\dot{U}(0)$ является функцией длины l.

Из уравнений (1.3.19) и (1.3.20) легко установить связь между $\dot{U}(0)$ и $\dot{U}(l)$ для разомкнутой на конце линии:

$$\dot{U}(0) = \dot{U}(l) ch\gamma l = \dot{U}(l) ch[(\alpha + j\beta)l] \tag{1.3.21}$$

Для $\dot{I}(0)$ из выражения (1.3.14) при разомкнутой на конце линии ($\dot{I}(l) = 0$) с учетом (1.3.19) найдем:

$$\dot{I}(0) = \frac{\dot{E}}{(Z_B + Z_и)} \frac{1 - e^{-2\gamma l}}{1 - q_1 e^{-2\gamma l}} = \frac{\dot{U}(l)}{Z_B} sh[(\alpha + j\beta)l] \tag{1.3.22}$$

Введем в рассмотрение коэффициент передачи К, как отношение напряжений на конце $\dot{U}(l)$ и в начале линии $\dot{U}(0)$. Для разомкнутой линии имеем:

$$K = \frac{\dot{U}(l)}{\dot{U}(0)} = \{ch[(\alpha + j\beta)]\}^{-1} \cong \left\{\frac{1}{2}\left[(1 + \alpha l)e^{j\beta l} + (1 - \alpha l)e^{-j\beta l}\right]\right\}^{-1} =$$

$$= \left[\cos\beta l + j\frac{\alpha}{\beta}\beta l \sin\beta l\right]^{-1} \tag{1.3.23}$$

По (1.3.23) можно построить зависимость $|K|$ от длины l для конкретной линии.

Выражение (1.3.23) выявляет резонансные свойства линии. Резонанс для линии без потерь $(\alpha = 0)$ наступает при $\beta l = \pi/2$ или при $\omega\sqrt{L'C'}l = \pi/2$. При f=50 Гц для воздушной линии, когда $V = \frac{1}{\sqrt{L'C'}} \cong 3 \cdot 10^8 м/с$, резонанс наступает при длине $1{,}5 \cdot 10^3 км$.

Коэффициент передачи в действительности всегда ограничен. Из (1.3.23) при $\beta l = \pi/2$ и при учете (1.3.17) вытекает

$$|K| = \frac{1}{\frac{\alpha}{\beta}\pi/2} = \frac{4}{\pi}\frac{\omega L'}{R'} = \frac{4}{\pi}Q, \tag{1.3.24}$$

где $Q = \frac{\omega L'}{R'}$ - добротность линии.

Если положить Q=12.5, то $|K| \approx 16$

Таким образом, перенапряжения на промышленной частоте в установившемся режиме на конце линии длиной l=1500 км при добротности Q=12.5 могут достигать кратности, равной модулю коэффициента передачи, т.е. в данном случае 16. В этом и состоит явление, называемое емкостным эффектом.

К числу важных параметров линии относится ее входное сопротивление, которое может быть получено из выражений (1.3.21) и (1.3.22).

Имеем для разомкнутой линии без потерь:

$$Z_{BX} = \frac{\dot{U}(0)}{\dot{I}(0)} = Z_B\Big|_{\alpha=0} \frac{ch[(\alpha + j\beta)l]}{sh[(\alpha + j\beta)l]}\Big|_{\alpha=0} = -j\sqrt{\frac{L'}{C'}} ctg\beta l \tag{1.3.25}$$

Для небольших длин, характерных для линий с номинальным напряжением до 220 кВ, например l=100 км, βl составит

$$\beta l = \omega\sqrt{L'C'}l = \frac{\pi}{30}.$$

Тогда $ctg\beta l \cong (\beta l)^{-1}$ и

$$Z_{BX} = -j\sqrt{\frac{L'}{C'}}\frac{1}{\omega\sqrt{L'C'}l} = -j\frac{1}{\omega C'l},$$

т.е. такую линию можно заменить сосредоточенной емкостью.

При длинах l=200-300 км, приближенно:

$$\cos\beta l \cong 1 - \frac{(\beta l)^2}{2}$$

$\sin\beta l \cong \beta l$ и

$$Z_{BX} = -j\sqrt{\frac{L'}{C'}}\frac{1-{(\beta l)^2}/{2}}{\beta l} = -j\sqrt{\frac{L'}{C'}}\frac{2-\omega^2 L'C'l^2}{2\omega\sqrt{L'C'}l} = j(\frac{\omega L'l}{2} - \frac{l}{\omega C'l}).$$

Последнее соотношение соответствует схеме замещения, принятой для линии в методических указаниях к задаче №1 [1].

Полезно получить выражение для Z_{BX} в общем случае. Пологая Z_u=0, $q_1 = -1$ и $x = 0$ в выражениях (1.3.13) и (1.3.14), с учетом (1.3.12) найдем:

$$Z_{BX} = -Z_B\frac{q_2 e^{-2\gamma l}+1}{q_2 e^{-2\gamma l}-1} = Z_B\frac{Zch\gamma l + Z_B sh\gamma l}{Zsh\gamma l + Z_B ch\gamma l} \qquad (1.3.26)$$

Для короткозамкнутой линии (Z=0):

$$Z_{BX} = Z_B th\gamma l \qquad (1.3.27)$$

Выражение (1.3.19) при подстановке (1.3.12) для q_1 можно переписать в виде

$$\dot{U}(l) = \dot{E}\frac{1}{ch\gamma l + \frac{Z_u}{Z_B}sh\gamma l} \qquad (1.3.28)$$

Для линии без потерь и $Z_u = j\omega L_u$ из выражения (1.3.28) находим:

$$\dot{U}(l) = \dot{E}\frac{1}{ch\beta l - \frac{\omega L_u}{\sqrt{{L'}/{C'}}}\sin\beta l} \qquad (1.3.29)$$

Введем обозначения

$$\sqrt{L'C'}l = \frac{l}{V} = \tau,\ T = \frac{L_u}{\sqrt{{L'}/{C'}}}.$$

Тогда (1.3.29) может быть переписано в виде

$$\dot{U}(l) = \dot{E}\frac{1}{\cos\omega\tau - \omega T\sin\omega\tau} \qquad (1.3.30)$$

Рассматривая ω в полученном выражении как варьируемую величину, можно найти корни уравнения

$ctg\omega\tau = \omega T$,

которые при заданных τ и T и будут определять резонансные частоты.

Заметим, что из (1.3.19), (1.3.20) и (1.3.23) вытекает независимость коэффициента передачи от Z_u.

Реактор в начале линии. Пусть к началу линии без потерь подключен реактор поперечной компенсации с сопротивлением X_p (рис.1.14). Это означает, по существу, что ко входному сопротивлению Z_{BX} разомкнутой на конце линии по формуле (1.3.25) параллельно подключено индуктивное сопротивление jX_p. Тогда Z_{BX-p} будет определяться выражением:

$$Z_{BX-p} = \frac{-jZ_B ctg\beta l}{1 - q ctg\beta l}, \tag{1.3.31}$$

где $q = \frac{Z_B}{X_p} = \frac{\sqrt{L'/C'}}{X_p}$

Если $q = tg\beta l$,

то сопротивление Z_{BX-p} в соответствии с (1.3.31) оказывается бесконечно большим. Но при этом и X_p оказывается весьма большой величиной. Поэтому полную компенсацию на практике не осуществляют.

Отметим, что коэффициент передачи не зависит от включения реактора поперечной компенсации в начале линии.

Уменьшение емкостного тока (выражение (1.3.31)) благодаря включению реактора поперечной компенсации в начале линии благоприятно сказывается на работе генераторов, так как работа генераторов в режиме потребления реактивной мощности (генерирования емкостного тока), становится менее устойчивой.

Реактор в конце линии. Установка реактора в конце линии изменяет коэффициент передачи. Воспользуемся общим выражением (1.3.13), в котором для простоты положим $Z_u = 0$ и, соответственно $q_1 = -1$.

Тогда, полагая x=0, затем x=l, для коэффициента передачи с учетом (1.3.12) при $Z = jX_p$, найдем:

$$K = \frac{\dot{U}(l)}{\dot{U}(0)} = \frac{e^{-\gamma l} + q_2 e^{-\gamma l}}{1 + q_2 e^{-2\gamma l}} = \frac{1 + q_2}{e^{\gamma l} + q_2 e^{-\gamma l}} = \frac{jX_p}{jX_p ch\gamma l + Z_B sh\gamma l} \tag{1.3.32}$$

Для линии без потерь из (1.3.32) находим:

$$K = \frac{1}{\cos\beta l + q\sin\beta l}, \tag{1.3.33}$$

где также, как и в (1.3.31), $q = \frac{Z_B}{X_p}$.

Из сопоставления (1.3.23) при $\alpha = 0$ (линия без потерь) и (1.3.33) следует, что реактор в конце линии уменьшает коэффициент передачи. Коэффициент передачи равен единице в (1.3.33), если

$$q = \frac{Z_B}{X_p} = \frac{1 - \cos\beta l}{\sin\beta l} = tg\frac{\beta l}{2}$$

Однако требуемая для этого величина X_p оказывается слишком большой. Кроме того, максимальное напряжение на линии смещается к началу линии.

Реакторы могут быть установлены и в середине линии, и равномерно вдоль линии, улучшая характер распределения напряжения вдоль линии.

Вопросы для самопроверки

1. Объясните, что такое «смещение нейтрали».
2. Повторите, в чем состоит существо метода эквивалентного генератора тока.
3. Расскажите, что вы понимаете под коэффициентом передачи, добротностью линии и емкостным эффектом.

Глава 2. Перенапряжения переходного процесса при коммутациях

2.1 Переходное восстанавливающееся напряжение (ПВН) в сети с изолированной нейтралью при отключении трехфазного короткого замыкания за трансформатором

После отключения трехфазного короткого замыкания за трансформатором в сети должна восстановиться система фазных и междуфазных напряжений, обусловленная трехфазным источником $\dot{E}_A, \dot{E}_B, \dot{E}_C$ (рис.2.1). Считается, что система фазных и междуфазных напряжений до момента срабатывания выключателя симметрична, а токи отстают от напряжения на угол $\pi/2$, что и должно иметь место при чисто индуктивном характере нагрузки. Эквивалентная индуктивность трансформатора на схеме рис.2.1 обозначена через L_T. Поскольку обрыв дуги на контактах выключателя происходит первоначально в одной из фаз, то между нейтралью источника *O* и точкой КЗ O' (рис.2.1) из-за возникающей несимметрии появляется напряжение $\dot{U}_N$, и напряжения на индуктивностях будут отличаться от фазных напряжений (система напряжений $\dot{U}_{AH}, \dot{U}_{BH}, \dot{U}_{CH}$ на рис.2.1), если не принимать во внимание переходной составляющей и рассcматривать процесс до возникновения обрыва дуг в других фазах. Переходные процессы проистекают из-за перезаряда емкостей, условно показанных на рис.2.1 штриховыми линиями. Общая картина изменения напряжений и токов за все время ПВН показаны на рис.2.2.

На рис.2.2 кривая u_B сдвинута относительно кривой u_A на угол $2\pi/3$ в сторону увеличения отсчета времени, а кривая u_C соответственно на угол $4\pi/3$ (рис.2.2). В момент t_1 началось движение контактов, а дуга продолжает гореть. В момент прохождения тока i_B через нуль нет еще отключения фазы «B» (выключатель не успевает погасить дугу), но в момент t_3, когда ток i_A проходит через нуль, отключение фазы «A» уже возможно. В момент обрыва дуги в фазе «A» появляется напряжение на нейтрали трансформатора относительно точки КЗ. При этом в согласии с 1.1.6 при $Y_B = Y_C$

$$\dot{U}_N = \dot{U}_{N\text{из}} = -\frac{\dot{U}_A}{2}, \qquad (2.1.1)$$

и напряжение на контактном промежутке в момент $t = t_3$ с учетом отставания тока на $\pi/2$ оказывается равным (рис.2.3).

$$u_{SA}\big|_{t=t_3} = u_A\big|_{t=t_3} - u_N\big|_{t=t_3} = U_{\text{фm}} + \frac{1}{2}U_{\text{фm}} = \frac{3}{2}U_{\text{фm}} \qquad (2.1.2)$$

До разрыва напряжение на контактах выключателя фазы «A» было равно 0, после разрыва должно установиться $1{,}5U_{\text{фm}}$. Напряжение на емкости между разорванными участками фазы «A» не может сразу изменится от 0 до $1{,}5U_{\text{фm}}$.

Поэтому возникает переходный процесс (см.ф.28 [1] при $\psi_E = \pi/2$, $U_{CO} = 0$ и $U_{сут} = 1{,}5U_{фm}$), который будет происходить в соответствии с законом изменения

$$u_{SA} = 1{,}5U_{фm}\cos\omega t - e^{-\delta t}1{,}5U_{фm}\cos\omega_1 t, \qquad (2.1.3)$$

если время t отсчитывать от t_3. Здесь ω_1 - собственная частота колебаний контура с емкостью и всей остальной индуктивностью системы. Она значительно больше промышленной частоты, что с учетом затухания отражено на кривой рис.2.2.

Ток в фазе «А» после размыкания контакта остается равным нулю, а токи в двух других фазах будут изменяться по закону.

$$i_{BH} = -i_{CH} = -\frac{\sqrt{3}U_{фm}}{2\omega L_T}\cos\omega t, \qquad (2.1.4)$$

где t отсчит. от t_3.

Действительно, установившийся режим после разрыва фазы «А» можно проиллюстрировать и векторной диаграммой (рис.2.4)

Из рис.2.1 и рис.2.4 следует, что

$$\left.\begin{aligned} \dot U_{AH} &= \dot U_A - \dot U_N \\ \dot U_{BH} &= \dot U_B - \dot U_N \\ \dot U_{CH} &= \dot U_C - \dot U_N \end{aligned}\right\} \qquad (2.1.5)$$

Отсюда ясно, что

$$\dot U_{AH} = \dot U_A + \frac{\dot U_A}{2} = \frac{3}{2}\dot U_A;$$

$$\dot U_{BH} = \dot U_B - \frac{\dot U_B + \dot U_C}{2} = \frac{\dot U_{BC}}{2};$$

$$\dot U_{CH} = \dot U_C - \frac{\dot U_B + \dot U_C}{2} = -\frac{\dot U_{BC}}{2}.$$

Токи $\dot I_{CH}$ и $\dot I_{BH}$ отстают от своих напряжений на угол $\pi/2$. Их векторы показаны на диаграмме (рис.2.4), что и приводит к выражению (2.1.4).

Заметим, что до размыкания фазы «А» ток в фазе «В» изменялся по закону

$$i_B = \frac{U_{фm}}{\omega L_T}\cos(\omega t - \frac{2\pi}{3} - \frac{\pi}{2}) = \frac{U_{фm}}{\omega L_T}\cos(\omega t - \pi - \frac{\pi}{6}) = -\frac{U_{фm}}{\omega L_T}\cos(\omega t - \frac{\pi}{6}), \qquad (2.1.6)$$

и в момент $t = t_3$, принимаемый за точку отсчета, был бы равен

$$i_B = -\frac{\sqrt{3}U_{фm}}{2\omega L_T}, \qquad (2.1.7)$$

а ток в фазе «С» изменялся по закону

$$i_C = \frac{U_{фm}}{\omega L_T}\cos(\omega t - \frac{4\pi}{3} - \frac{\pi}{2}) = \frac{U_{фm}}{\omega L_T}\cos(\omega t + \frac{2\pi}{3} - \frac{\pi}{2}) = \frac{U_{фm}}{\omega L_T}\cos(\omega t + \frac{\pi}{6}), \qquad (2.1.8)$$

и в момент $t = t_3$, был бы равен

$$i_C = \frac{\sqrt{3}U_{фm}}{2\omega L_T} \qquad (2.1.9)$$

Таким образом, в момент размыкания фазы «А», значения токов в фазах «В» и «С» остаются без изменения, но претерпевают фазовый скачок. Ток i_B на угол +

$\frac{\pi}{6}$, а ток i_C - на угол - $\frac{\pi}{6}$, что отражено сплошными линиями на рис.2.2 для кривых токов i_B и i_C. Это значит, в свою очередь, что токи пройдут одновременно через нуль в момент t_4 (на рис.2.2 $\omega(t_4 - t_3) = \frac{\pi}{2}$).

Такой же вывод можно сделать и на основании выражения (2.1.4), в котором начало отсчета ведется от момента t_3. Выключатель разорвет контактные промежутки фаз «В» и «С» в момент t_4. До размыкания напряжение на контактах этих фаз было равно нулю, после размыкания на контактах выключателя должна восстановиться система напряжений источника, т.е. U_A, U_B и U_C. Но в момент t_4 на емкостях между разорванными участками фаз «В» и «С» имели место нулевые напряжения, в то время как напряжение источника фазы «А» равно нулю, а напряжение фаз «В» и «С» соответственно равны:

$$u_B = U_{фm}\cos(\frac{\pi}{2} - \frac{2\pi}{3}) = \frac{\sqrt{3}}{2}U_{фm}$$

$$u_C = U_{фm}\cos(\frac{\pi}{2} - \frac{4\pi}{3}) = -\frac{\sqrt{3}}{2}U_{фm},$$

а междуфазное напряжение в этот момент (рис.2.4)

$$u_B - u_C = u_{BC} = \sqrt{3}U_{фm}$$

Так как напряжение u_{SA} в момент t_4 проходит через ноль (рис.2.2), то в фазе «А» переходного процесса не будет, а в фазах «В» и «С» процесс установления напряжения $u_{SB,SC}$ от момента t_4, принимаемый за нулевую точку отсчета, описывался бы следующими выражениями:

для фазы «В»:

$$u_{SB} \approx U_{фm}\sin(\omega t + \frac{\pi}{3}) - e^{-\delta_B t}U_{фm}\sin\frac{\pi}{3}\cos\omega_{1B}t, \qquad (\psi_E = \frac{\pi}{3});$$

для фазы «С» :

$$u_{SC} \approx U_{фm}\sin(\omega t - \frac{\pi}{3}) + e^{-\delta_C t}U_{фm}\sin\frac{\pi}{3}\cos\omega_{1C}t, \qquad (\psi_E = -\frac{\pi}{3}).$$

Как видно, процессы сдвинуты на $\frac{2\pi}{3}$. Величины $\delta_{B,C}$ и $\omega_{1B,1C}$ в данных выражениях не конкретизируем. Однако можно считать, что $\omega_{1B} = \omega_{1C}$ и $\delta_B = \delta_C$.

Со временем, на контактах выключателя установятся значения напряжения, совпадающие с $u_A, u_в$ и u_c. Из сказанного вытекает, что наибольшие перенапряжения возникают в процессе ПВН на контактах первой отключившейся фазы.

2.2 Перенапряжения при отключении малых индуктивных токов

Перенапряжения при отключении малых индуктивных токов рассмотрим на примере отключения ненагруженного трансформатора выключателем от шин высокого напряжения (рис.2.5)

На характер перенапряжений важную роль оказывает явление «среза» тока в выключателе, когда ток обрывается не при нуле тока, а при некотором его значении I_0, отличном от нуля.

При больших амплитудах проходящего через выключатель тока явление «среза» отсутствует из-за образования сильно ионизированного дугового канала.

Упрощенная схема замещения имеет вид показанный на рис.2.6.
Здесь L_T - индуктивность трансформатора при холостом ходе, которая может достигать больших значений (до десятков Генри), u_S - напряжение на контактном промежутке, а емкость C в схеме замещения включает входную емкость трансформатора и емкость шин до точки подключения к выключателю.

Пусть в момент среза тока t_0 напряжение на емкости равно U_{CO}, а ток, в момент непосредственно предшествующий срезу, равен i_{LO}. Момент «среза» и есть момент отключения трансформатора, и тогда возникает колебательный процесс в контуре с емкостью и индуктивностью без источника ЭДС, но при ненулевых начальных условиях ($U_{CO} \neq 0$, $i_{LO} \neq 0$).

Напряжение на емкости после «среза» тока описывается выражениями вида [1] (формулы 25 и 26 рабочей программы). И тогда

$$u_L = u_C \cong -\frac{i_{LO}}{\omega_0 C}\sin\omega_0 t + U_{CO}\cos\omega_0 t\,. \tag{2.2.1}$$

Здесь принято $\delta = 0$, $\omega_1 = \omega_0$ и $\omega_0 = \dfrac{1}{\sqrt{L_T C}}$, а время отсчитывается от момента среза тока.

Знак минус в (2.2.1) обусловлен тем (рис.2.6) что в отличии от рис.4 рабочей программы здесь напряжение на емкости и ток при обходе контура направлены в разные стороны.

Напряжение на контактах выключателя u_S (рис.2.6) после среза равно:

$$u_S = u_L - e \tag{2.2.2}$$

Если срез тока имеет место при его отрицательных значениях, то $i_{LO} = -I_0$ и (2.2.1) можно переписать в виде

$$u_L = u_C \cong U_{CO}\cos\omega_0 t + I_0\sqrt{\frac{L_T}{C}}\sin\omega_0 t\,, \tag{2.2.3}$$

причем $I_0\sqrt{\dfrac{L_T}{C}}$ может существенно превосходить U_{CO}.

Вводя в рассмотрение

$$\cos\varphi_1 = \frac{U_{CO}}{\sqrt{U_{CO}^2 + I_0^2\dfrac{L_T}{C}}}$$

и

$$\sin\varphi_1 = \frac{U_{CO}}{\sqrt{U_{CO}^2 + I_0^2\dfrac{L_T}{C}}}\,,$$

мы можем (2.2.3) записать в виде $u_L = u_C \cong \sqrt{U_{CO}^2 + I_0^2\dfrac{L_T}{C}}\cos(\omega_0 t - \varphi_1)$ (2.2.4)

По формуле (2.2.4) легко устанавливается максимальное значение напряжения за выключателем, равное

$$U_m = \sqrt{U_{CO}^2 + I_0^2 \frac{L_T}{C}} \approx I_0 \sqrt{\frac{L_T}{C}} \qquad (2.2.5)$$

Реальные напряжения за выключателем не достигают этих значений из-за повторного зажигания дуги в выключателе.

На рис.2.7 момент $t_н$ соответствует началу расхождения контактов выключателя. Здесь же показаны кривые напряжения и тока от момента $t_н$, причем ток отстает от напряжения практически на угол $\frac{\pi}{2}$.

Момент t_0 – это момент среза тока, т.е. момент фактического отключения (рис.2.7). Если бы дуга погасла в момент $t_н$, то восстанавливающаяся прочность выключателя нарастала бы в соответствии с кривой $u_{пр}$. При срезе тока из-за быстрого гашения дуги прочность межконтактного промежутка практически сразу же возрастает до значений, определенных кривой $u_{пр}$. Напряжение на емкости $u_C=u_L$, изменяющееся по закону (2.2.3) или, что то же (2.2.4), где t – отсчитывается от момента среза тока t_0, может превзойти величину $U_{пр} + e$, что приведет к пробою межконтактного промежутка. Точка 1 на рис.2.7 соответствует первой точке пробоя межконтактного промежутка. И тогда процесс изменения напряжения на емкости будет описываться выражением вида:

$$u_C(t) = u_{Cуст}(t) + \left[U_{CO1} - u_{Cуст}(0)\right] e^{-\frac{t}{rc}}$$

В последнем выражении $u_{Cуст}(t) \cong e(t)$, u_{CO1} - напряжение на емкости в момент непосредственно предшествующий пробою, r – сопротивление источника, время t отсчитывается от момента пробоя. Индуктивность L_T не принимается в расчет, так как она достаточно велика.

По достижении $u_C(t) \cong e(t)$ напряжение на индуктивности будет повторять за собой кривую изменения напряжения источника, а ток – кривую изменения тока i_S. Можно сказать, что индуктивность практически не реагирует на предшествующий скачок напряжения. При некотором новом значении тока возможен повторный срез тока, но уже при меньшем значении I_0. Максимальное напряжение на контактах выключателя оказывается меньше, чем при первом срезе тока. Тем не менее оно может оказаться достаточным для нового зажигания дуги. Процесс будет повторяться до тех пор, пока максимальное напряжение на контактах выключателя не станет меньше значений, соответствующих кривой $u_{пр} + e$. Поскольку кривая $u_{пр} + e$ растет, то растут и перенапряжения. Предельные значения перенапряжений могут достигать $4U_ф$ и более.

Эффективным средством защиты от таких перенапряжений в сетях с номинальным напряжением 220 кВ и выше могут служить грозозащитные вентильные разрядники, включаемые на трансформаторном присоединении между выключателем и трансформатором.

2.3 Перенапряжения при автоматическом повторном включении

Было уже отмечено, что большинство замыканий носит дуговой характер. Поэтому, кратковременное отключение участка линии, питаемой с двух сторон, может привести к погасанию дуги, а последующее включение через время $t_{АПВ}$, где АПВ – аббревиатура автоматического повторного включения, способно восстановить нормальное функционирование линии. На рис.2.8 показана линия, питаемая с двух сторон с выключателями Q_1 и Q_2, генераторами 1 и 2 с индуктивностями L_1 и L_2.

Цикл АПВ можно подразделить на следующие этапы:

1) отключение линии выключателем Q_2, наиболее близким к точке КЗ, приводящее к режиму одностороннего питания;
2) полное отключение линии выключателем Q_1, которое произойдет к моменту прохождения тока через нуль, что соответствует максимуму (по абсолютному значению) напряжения на неповрежденной фазе;
3) повторное включение разомкнутых линий выключателем Q_1;
4) замыкание выключателя Q_2 и восстановление нормальной схемы электроснабжения.

Заряд на неповрежденных фазах линии при $t_{АПВ} = 0{,}4$ с в среднем для сухой погоды составляет 60-70 % от первоначального. Заряд поврежденной фазы быстро стекает в землю через место замыкания.

В момент обрыва емкостного тока в нуле тока имеем левую картинку (рис.2.9) От момента $t = t_{АПВ}$ повторного включения выключателя Q_1 с начальной фазой ψ_E (правая картинка рис.2.9) с учетом превалирующего емкостного характера тока, когда $\varphi \cong -\frac{\pi}{2}$, переходный процесс будет описываться выражением (28) [1] ($\delta \prec 1$)

$$U_C^* \cong \sin(\omega t + \psi_E) - e^{-\delta t}\left[(\sin\psi_E - U_{CO}^*)\cos\omega_1 t + \frac{\omega}{\omega_1}\cos\psi_E \sin\omega_1 t\right] \qquad (2.3.1)$$

Рассмотрим случай при $\psi_E \approx \frac{\pi}{2}$ и $\frac{\omega}{\omega_1} = \frac{1}{2}$.

При этих условиях выражение (2.3.1) преобразуется к виду:

$$U_C^*(t) \cong \cos\omega t - e^{-\delta t}(1 - U_{CO}^*)\cos 2\omega t \qquad (2.3.2)$$

Изменение напряжения в соответствии с последним выражением ($\delta \approx 0$) показано на рис.2.9 (правая картинка).

При ωt=0 имеем U_{CO}^* (рис.2.9). При $\omega t = \frac{\pi}{3}$, $\frac{\pi}{2}$, $\frac{2\pi}{3}$, π, $\pi + \frac{\pi}{3}$ и $3\frac{\pi}{2}$ имеем для $U_C^*(t)$ соответственно $1 + \frac{|U_{CO}^*|}{2}$, $1 + |U_{CO}^*|$, $\frac{|U_{CO}^*|}{2}$, $-(2 + |U_{CO}^*|)$, $\frac{|U_{CO}^*|}{2}$ и $1 + \frac{|U_{CO}^*|}{2}$.

Таким образом, для максимального коэффициента перенапряжений при АПВ имеем оценку $2 + |U_{CO}^*|$, как и в методических указаниях к задаче 1 [1].

Если на линии включены реакторы поперечной компенсации, то после отключения выключателем Q_1 емкость линии начинает разряжаться на индуктивность реакторов с частотой, меньшей чем частота источника ($\omega L_P \succ \frac{1}{\omega C}$). Вследствие высокой добротности реакторов ($\omega L_P / R_P \succ 100$) колебательный процесс затухает очень медленно и за время $t_{АПВ}$ не успевает закончиться. Напряжение на линии изменяется по ф.26 методических указаний [1].

Можно показать при этом, что напряжение на разомкнутых контактах выключателя имеет форму биения колебаний. Действительно, имеем следующую эквивалентную схему (рис.2.10): здесь u_S – напряжение на контактах выключателя, время t отсчитывается от момента первого срабатывания выключателя Q_1 в нуле тока (рис.2.9). Будем считать, что $U_{CO} \approx -E_m$. Процесс изменения напряжения на неповрежденной фазе с реактором поперечной компенсации определяется формулой (26) [1] при допущении, что $\delta = 0$. При этом

$$\omega_1 = \frac{1}{\sqrt{L_P C}} = \omega_0 .$$

Имеем:

$$-E_m \cos \omega t = -u_S + U_{CO} \cos \omega_1 t$$

Из последнего выражения найдем:

$$u_S = E_m \cos \omega t + U_{CO} \cos \omega_1 t = E_m (\cos \omega t - \cos \omega_1 t) . \qquad (2.3.3)$$

Исходя из того, что

$$\cos \omega t = \cos\left[(\frac{\omega}{2} - \frac{\omega_1}{2} + \frac{\omega}{2} + \frac{\omega}{2}) t \right] = \cos(\frac{\omega - \omega_1}{2} t) \cos(\frac{\omega + \omega_1}{2} t) - \sin(\frac{\omega - \omega_1}{2} t) \sin(\frac{\omega + \omega_1}{2} t) ,$$

$$\cos \omega_1 t = \cos\left[(\frac{\omega_1}{2} - \frac{\omega}{2} + \frac{\omega_1}{2} + \frac{\omega}{2}) t \right] = \cos(\frac{\omega_1 - \omega}{2} t) \cos(\frac{\omega_1 + \omega}{2} t) - \sin(\frac{\omega_1 - \omega}{2} t) \sin(\frac{\omega_1 + \omega}{2} t)$$

путем вычитания для выражения (2.3.3) получим:

$$u_S = 2E_m \sin(\frac{\omega_1 - \omega}{2} t) \sin(\frac{\omega_1 + \omega}{2} t) \qquad (2.3.4)$$

При ω_1 близком к ω, выражение (2.3.4) описывает процесс, называемый биением колебаний. Как видно, перенапряжения не могут превысить двухкратного значения.

2.4 Переходное восстанавливающееся напряжение на контактах выключателя

Выполняя защитную функцию выключатель должен отключить ту часть электрической цепи, в которой произошло короткое замыкание, например линию (рис.2.11). После сигнала от устройства защиты контакты выключателя размыкаются и возникает электрическая дуга. При прохождении тока через ноль дуга может погаснуть и происходит отключение. Но при этом в сети возникает переходный процесс и, как следствие, на выключателе (на контактном промежутке) будет иметь место переходное восстанавливающееся напряжение (ПВН).

Согласно [2], ПВН для выключателя это напряжение на контактах полюса выключателя в переходном процессе отключения.

Переходное восстанавливающееся напряжение рассмотрим при следующих ограничениях. Будем предполагать, что разрыв цепи происходит строго в моменты прохождения тока через нулевое значение, а сопротивление между контактами выключателя изменяется скачком от нуля до бесконечности, т.е. работу выключателя будем рассматривать в виде идеального ключа.

В настоящее время различают два типа отказов выключателя: отказ в результате теплового пробоя и отказ в результате электрического пробоя контактного промежутка.

В первом случае распадающийся дуговой канал формируется заново за счет нагрева током после прохождения тока через нуль при условии, что скорость роста ПВН больше, чем некоторое критическое значение. Поэтому скорость нарастания ПВН в первые моменты после нуля тока в диапазоне нескольких микро-секунд имеет важное значение.

Во втором случае после успешного прохождения стадии, при которой возможен тепловой пробой, ПВН может достичь такого значения, что оказывается возможным электрический пробой. Здесь важна амплитуда ПВН.

Рассмотрим идеализированное ПВН для простейших схем.

В первой из них КЗ имеет место в непосредственной близости от выключателя и ее схема представлена на рис.2.12.

При отключении короткого замыкания (КЗ) выключателем в момент нуля тока, напряжение на емкости остается равной нулю (напряжение на емкости скачком измениться не может). Но отключение КЗ равносильно включение цепи к последовательно соединенными R, L, C под синусоидальное напряжение при нулевых начальных условиях. Положим, что в рассматриваемой задаче $\omega_0^2 \succ\succ \delta^2$ или $\frac{1}{LC} \succ\succ \frac{R^2}{2L^2}$ (см. методические указания к задаче 1 раб. программы). Таким образом, $R \prec\prec 2\sqrt{\frac{L}{C}}$.

С учетом превалирования емкостного тока ($\varphi = -\frac{\pi}{2}$) при $\phi_i = 0$ или π и начальной фазой Ψ_E, равной

$$\phi_E = \phi_i + \varphi = \mp\frac{\pi}{2},$$

получим из выражений (27) и (28) программы [1] с точностью до знака перед круглой скобкой следующую приближенную формулу:

$$U_C(t) \cong \sqrt{2}U_\Phi(\cos\omega t - e^{-\delta t}\cos\omega_1 t) \qquad (2.4.1)$$

причем $\omega_1 \cong \omega_0$

Напряжение на емкости в принятых приближениях есть одновременно ПВН на контактах выключателя. Кривая изменения ПВН в соответствии с приведенной формулой показана на рис.2.13.

Рассмотрим более сложный случай, именуемый в литературе как случай неудаленного КЗ. Переходное восстанавливающееся напряжение в схеме для КЗ, имеющем место на некотором (относительно небольшом) расстоянии от

выключателя на присоединенной к нему линии, при котором нельзя уже пренебрегать падением напряжения в начале линии (рис.2.14),
определяется двумя составляющими: напряжением со стороны источника $u_И$ и напряжением со стороны линии $u_Л$.

Отключение тока в линии при прохождении нуля тока дает начало процессу включения цепи с последовательным соединением *R, L, C* (рис.2.14) под синусоидальное напряжение источника при $\phi_i = 0$ или π, но с одним различием: начальное напряжение на емкости уже не равно нулю и дается формулой:

$$U_{CO} = U_O = \pm\sqrt{2}U_Ф \frac{L_1}{L+L_1}, \qquad (2.4.2)$$

при которой входное сопротивление короткозамкнутой линии определяется индуктивностью L_1 (см. 1.3.27 при $|\gamma l| \cong |j\beta l| << 1$)

В дальнейшем сохраним в (2.4.2) лишь один знак, например плюс.

Отсюда ясно, что напряжение со стороны источника имеет вид:

$$U_И(t) \approx U_C(t) \cong \sqrt{2}U_Ф\left[\cos\omega t - e^{-\delta t}(1-\frac{L_1}{L+L_1})\cos\omega_1 t\right] = \sqrt{2}U_Ф(\cos\omega t - e^{-\delta t}\frac{L}{L+L_1}\cos\omega_1 t) \qquad (2.4.3)$$

Из (2.4.3) видно, что амплитуда ПВН в рассматриваемом случае уменьшается по сравнению с предыдущим, по крайней мере, со стороны источника.

Рассмотрим теперь изменение $u_л(t)$ для отключаемой линии в момент нуля тока с КЗ на конце и с напряжением в начале линии, в соответствии с (2.4.2).

В момент нуля тока и отключения линии остающийся на линии заряд распределен на емкостях ее элементарных участков длиной Δx. Поэтому переходной процесс в линии будет происходить в соответствии с эквивалентной схемой элементарного участка линии (рис.2.15), где $U_P(x)$, $I_P(x)$ - операторные изображения напряжения и тока в начале участка. $U_P(x+\Delta x)$, $I_P(x+\Delta x)$ - то же, но в конце участка, $U_{CO}(x)$- зависящее от x начальное значение напряжения на емкости $R^/, L^/, C^/$ - параметры линии на единицу длины.

Уравнение для токов с учетом операторного изображения тока через емкость $C^/\Delta x$ (в соответствии с формулой (3) методических указаний к зад. 1 [1]), имеет вид:

$$I_P(x+\Delta x) - I_P(x) = -pC^/\Delta x U_P(x) + C^/\Delta x U_{CO}(x).$$

Уравнение для напряжений:

$$U_P(x+\Delta x) - U_P(x) = -(pL^/ + R^/)\Delta x I_P(x+\Delta x)$$

Отсюда имеем при $\Delta x \to 0$

$$\frac{dI_P(x)}{dx} = U_{CO}(x)C^/ - pC^/U_P(x), \qquad (2.4.4)$$

$$\frac{dU_P(x)}{dx} = -(pL^/ + R^/)I_P(x). \qquad (2.4.5)$$

Здесь использованы обозначения для полных производных (p – рассматривается как параметр).

Закон изменения напряжения $U_{CO}(x)$ можно записать в виде:

$$U_{CO}(x) = \frac{U_0}{l}(l-x), \qquad (2.4.6)$$

где $U_0 = \sqrt{2} U_\phi \dfrac{L_1}{L + L_1}$.

Дифференцируя уравнение (2.4.4) по x с учетом (2.4.5) и (2.4.6), имеем:

$$\frac{d^2 I_P(x)}{dx^2} = -C^{/} \frac{U_0}{l} + pC^{/}(pL^{/} + R^{/}) I_P(x)$$

или

$$\frac{d^2 I_P(x)}{dx^2} - \gamma^2 I_P(x) = -C^{/} \frac{U_0}{l}, \tag{2.4.7}$$

где $\gamma^2 = p^2 L^{/} C^{/} + pR^{/} C^{/}$ (2.4.8)

Дифференцируя уравнение (2.4.5) с учетом (2.4.4) и (2.4.8), найдем:

$$\frac{d^2 U_P(x)}{dx^2} - \gamma^2 U_P(x) = -\frac{U_0}{l}(l - x)(pL^{/} C^{/} + R^{/} C^{/}) = -\gamma^2 \frac{U_0}{pl}(l - x) \tag{2.4.9}$$

Для записанного уравнения решение может быть представлено как

$$U_P(x) = A_P e^{\gamma x} + B_P e^{-\gamma x} + U_{1P}(x), \tag{2.4.10}$$

где первых два члена являются решением для уравнения с нулевой правой частью, а $U_{1P}(x)$ - является частным решением.

Частное решение ищем методом вариации произвольных постоянных A_P и B_P, т.е.

$$U_{1P}(x) = A_P(x) e^{\gamma x} + B_P(x) e^{-\gamma x} \tag{2.4.11}$$

Берем первую производную по x от уравнения (2.4.11):

$$\frac{dU_{1P}(x)}{dx} = \frac{dA_P(x)}{dx} e^{\gamma x} + \frac{dB_P(x)}{dx} e^{-\gamma x} + \gamma e^{\gamma x} A_P(x) - \gamma e^{-\gamma x} B_P(x) \tag{2.4.12}$$

В (2.4.12) положим, что

$$\frac{dA_P(x)}{dx} e^{\gamma x} + \frac{dB_P(x)}{dx} e^{-\gamma x} = 0 \tag{2.4.14}$$

Взяв вторую производную от (2.4.12) с учетом (2.4.13), найдем:

$$\frac{d^2 U_{1P}(x)}{dx^2} = \gamma^2 [A_P(x) e^{\gamma x} + B_P(x) e^{-\gamma x}] + \gamma [\frac{dA_P(x)}{dx} e^{\gamma x} - \frac{dB_P(x)}{dx} e^{-\gamma x}] \tag{2.4.14}$$

Подставляя (2.4.10) и (2.4.14) в (2.4.9), после сокращений получим:

$$\frac{dA_P(x)}{dx} e^{\gamma x} - \frac{dB_P(x)}{dx} e^{-\gamma x} = -\gamma \frac{U_o}{pl}(l - x) \tag{2.4.15}$$

Таким образом, для определения $\dfrac{d}{dx} A_P(x)$ и $\dfrac{d}{dx} B_P(x)$ имеем систему уравнений (2.4.15) и (2.4.13).

Решая эту систему, главный определитель которой равен 2, имеем:

$$\frac{d}{dx} A_P(x) = -\frac{\gamma U_0}{pl}(l - x) \frac{e^{-\gamma x}}{2}$$

$$\frac{d}{dx} B_P(x) = \frac{\gamma U_0}{pl}(l - x) \frac{e^{\gamma x}}{2}$$

Отсюда $A_P(x)$ и $B_P(x)$ находятся в результате интегрирования:

$$A_P(x) = -\frac{\gamma U_0}{2pl}\int_0^x (l-x)e^{-\gamma x}dx$$

$$B_P(x) = \frac{\gamma U_0}{2pl}\int_0^x (l-x)e^{\gamma x}dx$$

После взятия интегралов получаем:

$$A_P(x) = -\frac{U_0}{2pl}\left[l - \frac{1}{\gamma} + e^{-\gamma x}(\frac{1}{\gamma} - l + x)\right] = -\frac{U_0}{2p\gamma l}\left[\gamma l - 1 + e^{-\gamma x}(1 - \gamma l + \gamma x)\right] \quad (2.4.16)$$

$$B_P(x) = \frac{U_0}{2\gamma pl}\left[-\gamma l - 1 + e^{\gamma x}(1 + \gamma l - \gamma x)\right] \quad (2.4.17)$$

Таким образом, выражение (2.4.10) имеет вид:

$$U_P(x) = A_P e^{\gamma x} + B_P e^{-\gamma x} - \frac{U_0}{2p\gamma l}\left\{e^{\gamma x}\left[\gamma l - 1 + e^{-\gamma x}(1 - \gamma l + \gamma x)\right] - e^{-\gamma x}\left[-\gamma l - 1 + e^{\gamma x}(1 + \gamma l - \gamma x)\right]\right\} = A_P e^{\gamma x} +$$

$$+ B_P e^{-\gamma x} - \frac{U_0}{2p\gamma l}\left[e^{\gamma x}(\gamma l - 1) + e^{-\gamma x}(\gamma l + 1) - 2\gamma(l - x)\right] \quad (2.4.18)$$

При $x=l$ $U_P(l) = 0$, т.е.

$$A_P e^{\gamma l} + B_P e^{-\gamma l} - \frac{U_0}{2p\gamma l}\left[(\gamma l - 1)e^{\gamma l} + (\gamma l + 1)e^{-\gamma l}\right] = 0 \quad (2.4.19)$$

В начале линии (отключенной) $I_P(0) = 0$.

Используя (2.4.5) и (2.4.18), для тока $I_P(x)$ найдем:

$$I_P(x) = -\frac{1}{pL' + R'}\left\{\left[\gamma(A_P e^{\gamma x} - B_P e^{-\gamma x})\right] - \frac{U_0}{2p\gamma l}\left[\gamma(\gamma l - 1)e^{\gamma x} - \gamma(\gamma l + 1)e^{-\gamma x} + 2\gamma\right]\right\} \quad (2.4.20)$$

При $x=0$ вторая квадратная скобка в (2.4.20) обращается в нуль, и тогда $I_P(0) = 0 = A_P - B_P$

Отсюда $A_P = B_P$

Уравнение (2.4.19), решенное относительно A_P, дает:

$$A_P = \frac{U_0}{2p\gamma l}\frac{\gamma l ch\gamma l - sh\gamma l}{ch\gamma l} = \frac{U_0}{2p}(1 - \frac{th\gamma l}{\gamma l}). \quad (2.4.21)$$

При $x=0$

$$U_P(0) = 2A_P = \frac{U_0}{p}\left(1 - \frac{th\gamma l}{\gamma l}\right). \quad (2.4.22)$$

Решение для $U_p(0)$ во временной области, т.е. $U_\Lambda(t,0)$ имеет вид:

$$U_\Lambda(t,0) = U_0\left\{1 - L^{-1}\left(\frac{th\gamma l}{p\gamma l}\right)\right\}, \quad (2.4.23)$$

где L^{-1} - символ обратного преобразования Лапласа.

Простейший вариант решения для (2.4.23) отвечает случаю $R' = 0$. При этом согласно (2.4.8) $\gamma = p\sqrt{L'C'}$.

Представляя $th\gamma l$ в виде ряда:

$$th\gamma l = \frac{e^{\gamma l} - e^{-\gamma l}}{e^{\gamma l} + e^{-\gamma l}} = (1 - e^{-2\gamma l})(1 - e^{-2\gamma l} + e^{-4\gamma l} - e^{-6\gamma l} + ...) = 1 - 2e^{-2\gamma l} + 2e^{-4\gamma l} - 2e^{-6\gamma l} + ...,$$

формулу (2.4.23) переписываем в виде:

$$U_{\Lambda}(t,0) = U_0 \left\{ 1 - \tau^{-1} L^{-1} \left[\frac{1}{p^2} - \frac{2e^{-2\tau p}}{p^2} + \frac{2e^{-4\tau p}}{p^2} - \frac{2e^{-6\tau p}}{p^2} + ... \right] \right\} \qquad (2.4.24)$$

где $\tau = \sqrt{L^{/} C^{/}}\, l = \dfrac{l}{V}$, (2.4.25)

V – скорость распространения электромагнитной волны в линии без потерь. Поэтому, τ - время, необходимое для того, чтобы волна напряжения в начале линии длиной l достигла бы ее конца. Отсюда конечный результат для (2.4.24) с использованием теоремы запаздывания можно записать в виде:

$$U_{\Lambda}(t,0) = U_0 \{ 1 - \tau^{-1} [t - 2(t-2\tau)u(t-2\tau) + 2(t-4\tau)u(t-4\tau) - 2(t-6\tau)u(t-6\tau) + ...] \}, \qquad (2.4.26)$$

где *u(t)* – функция Хевисайда. Учитывая, что

$$U_0 = U_{m\phi} \frac{L_1}{L + L_1} = I_m \omega L_1, (L_1 = lL^{/})$$

для выражения (2.4.26) найдем:

$$U_{\Lambda}(t,0) = U_0 - I_m \omega Z_B [t - 2(t-2\tau)u(t-2\tau) + 2(t-4\tau)u(t-4\tau) - 2(t-6\tau)u(t-6\tau) + ...], \qquad (2.4.27)$$

где $Z_B = \sqrt{\dfrac{L^{/}}{C^{/}}}$ - волновое сопротивление линии.

Последнее выражение может служить обоснованием для так называемого метода наложенного тока или метода противотока, с условием, что противоток изменяется в соответствии с законом $I_m \omega t$.

Кривая, отвечающая (2.4.26) имеет вид пилообразных колебаний, которые начинаются с U_0.

ПВН на выключателе есть разность напряжения со стороны источника и со стороны линии.

Напряжение со стороны источника описывается выражением (2.4.3), напряжение со стороны линии, выражением (2.4.27) и рис.2.16.

Так как, согласно рис.2.14 $u_S = u_И - u_{\text{А}}$, то нетрудно построить график результирующего напряжения на контактах выключателя.

Введем некоторые уточнения. Выражение для γ (2.4.8) запишем в виде

$$\gamma = \frac{1}{V}\sqrt{p^2 + p\frac{R^{/}}{L^{/}}} = \frac{1}{V}\sqrt{\left((p + \frac{R^{/}}{2L^{/}})\right)^2 - \left(\frac{R^{/}}{2L^{/}}\right)^2} \cong \frac{1}{V}(p + \frac{R^{/}}{2L^{/}}),$$

где $V = \dfrac{1}{\sqrt{L^{/} C^{/}}}$, и, соответственно γl в виде

$$\tau(p + \frac{R^{/}}{2L^{/}}) = \tau(p + \delta), \qquad (2.4.28)$$

где $\delta = \dfrac{R^{/}}{2L^{/}}$.

Учитывая, что $p^{-1}(p+\delta)^{-1} = \delta^{-1}\left[p^{-1} - (p+\delta)^{-1}\right]$, в соответствии с (2.4.23) и (2.4.28) имеем:

$$U_{л}(t,0) = U_0 \{ 1 - \tau^{-1}\delta^{-1} \; [(1 - e^{-\delta t}) - 2e^{-2\tau\delta}(1 - e^{-\delta(t-2\tau)})u(t-2\tau) + 2e^{-4\tau\delta}(1 - e^{-\delta(t-4\tau)})u(t-4\tau) -$$

$$-2e^{-6\tau\delta}(1-e^{-\delta(t-6\tau)})u(t-6\tau)+...\Big\}, \qquad (2.4.29)$$

которое переходит в выражение (2.4.26) при $\delta \to 0$.

Из выражения (2.4.29) видно, что с увеличением номера члена ряда затухание растет, и пилообразные колебания быстро гаснут. Поэтому они не оказывают практически никакого влияния на максимум ПВН.

Вопросы для самопроверки

1. Приведите пример, иллюстрирующий понятие «переходного восстанавливающегося напряжения».
2. Что означает явления «среза тока»?
3. На какие этапы можно подразделять цикл АПВ?
4. Расскажите про особенности ПВН на выключателе при «неудаленном КЗ».

Глава 3. Молния и молниезащита
3.1. Основные характеристики молниевого разряда и молниезащиты

Молния – это гигантский искровой разряд в электрическом поле атмосферы. Наибольшую опасность для наземных сооружений представляют разряды молнии между облаком и землей.

Верхняя часть большинства грозовых облаков несет избыточный положительный заряд, а нижняя – отрицательный. По современным представлениям заряд облака локализован на отдельных многочисленных гидрометеорах (градины, капли, снежинки и т.п.). Рисунок 3.1 дает представление о распределении зарядов внутри грозового облака.

Наиболее интенсивные процессы заряжения гидрометеоров протекают при переходах в различные агрегатные состояния, а также связаны с захватом ионов, коронированием, их соударениями, дроблениями и слияниями.

В результате в различных частях облака скапливаются заряды противоположных знаков и между этими зарядами возникает электрическое поле, которое может усилить процесс заряжения облака.

Полярность молнии принято определять по знаку заряда, переносимого от облака на землю по ее каналу. Большинство молний ($\approx 90\%$) переносят отрицательный заряд.

Молнии, развивающиеся по направлению к земле, называемые нисходящими, имеют три основные стадии: лидерную, главную и финальную. Во время лидерной стадии происходит пробой промежутка облако-земля (носящий зачастую ступенчатый характер) за счет прорастания проводящего высокотемпературного канала лидера, а также возбуждения встречного лидера. Когда канал нисходящего лидера замыкается на землю или соединяется с каналом встречного лидера, возникает переходный процесс, разряжающий лидер как заряженную распределенную систему. Этот процесс получил название главной стадии.

В момент контакта напряжение конца лидера снижается на 1-2 порядка, а ток быстро нарастает. От земли вверх к облаку развивается главный разряд молнии. Яркое свечение канала главного разряда воспринимается как вспышка молнии, а быстрое расширение воздуха при нагреве током разряда и его последующее охлаждение и сжатие вызывает звуковую волну-гром. Импульс тока, протекающий по каналу молнии может иметь амплитуду до нескольких десятков и даже сотен килоампер с длительностью до сотен микросекунд. Именно с главной стадией (главным разрядом) связаны наиболее опасные воздействия молнии.

В финальной стадии продолжается перенос зарядов по каналу молнии, но процесс идет менее интенсивно, ток порядка 10^1-10^3А.

Возникновение канала лидера связано с термоионизацией воздуха и возможно лишь при достаточно большой плотности выделения энергии. Необходимая плотность энергии обеспечивается стримерными процессами, которые всегда предшествуют лидеру и требуют для своего возбуждения напряженности поля порядка $2 \cdot 10^4$ В/см на длине несколько сантиметров.

Для молниезащиты большое значение имеют процессы, связанные с возникновением встречного лидера от заземленных сооружений. Защитное действие молниеотводов основано на том, что при приближении нисходящего лидера напряженность электрического поля молниеотвода возрастает сильнее, чем у защищаемого объекта. С молниеотвода первым начинает развиваться встречный лидер. Стекающиеся в канал встречного лидера заряды усиливают еще больше напряженность поля между нисходящим лидером и молниеотводом, ослабляя ее между лидером и объектом. Благодаря этому около молниеотвода образуется зона защиты, вероятность попадания в которую оказывается достаточно малой. Радиус защиты зависит от высоты молниеотвода и его расположения относительно защищаемого объекта.

Вероятность прорыва $P_{пр}$ определяется как отношение разрядов молнии в объект к полному числу разрядов в систему обьект-земля-молниеотвод.

Молниеотводы бывают стержневые и тросовые. Стержневые молниеотводы представляют собой вертикальные стержни (мачты), установленные на заземленных конструкциях объекта (сооружения) или рядом с ним и соединенные с заземлителем. Тросовые молниеотводы имеют молниеприемник в виде горизонтально подвешенных тросов, соединенные с заземлителем через токоотводы, проложенные по поддерживающим трос опорам. Грозозащитный трос есть тросовый молниеотвод для защиты протяженных объектов, главным образом воздушных линий передач.

Воздушные линии 6-35 кВ выполняются обычно без грозозащитных тросов. Поэтому разряд молнии может поразить непосредственно фазный провод. Напряжение на линии в месте удара молнии в кВ можно представить в виде

$$U = I_M \frac{Z_B}{2}, \qquad (3.1.1)$$

где I_M - пиковое (амплитудное) значение тока молнии (ток молнии), кА, Z_B - волновое сопротивление линии, Ом. В этом случае возможно перекрытие изоляции пораженной фазы и ток молнии будет растекаться по опорам в землю.

Сопротивление заземления железобетонных опор, не имеющих специального контура заземления, лежит в диапазоне 20-75 Ом (по данным измерений для ВЛ 6-35 кВ) в зависимости от удельного сопротивления грунта.

Возникающие перенапряжения при прямых ударах молнии пропорциональны амплитуде и крутизне тока молнии, индуктивности конструкции и сопротивлению заземлителей, по которым ток молнии отводится в землю. Даже при выполнении молниезащиты прямые удары молнии с большими токами и крутизной могут привести к перенапряжениям в несколько мегавольт.

При отсутствии молниезащиты пути растекания тока молнии неконтролируемы и ее удар может создать опасность поражения током, опасные напряжения шага и прикосновения, перекрытия на другие объекты.

Для защиты подстанций от прямых ударов молний применяют стержневые молниеотводы – отдельно стоящие или установленные на опорах, поддерживающих провода в ячейках ОРУ.

Высота и расположение молниеотводов выбираются таким образом, чтобы все оборудование было в пределах зоны защиты с вероятностью прорыва $\mathrm{P}_{пр} \approx 0{,}005$.

В качестве естественных молниеотводов можно использовать возвышающиеся сооружения (трубы, прожекторные мачты и т.д.). Для этого на их вершинах устанавливают невысокий молниеотвод и его заземляют, прокладывая токоотводящий спуск к контуру заземления.

Рассмотрим подробнее ситуацию, когда удар молнии пришелся в грозозащитный трос вблизи опоры. На опоре возникает кратковременное перенапряжение

$$U_М = I_М R_И + I_М^{/} L, \qquad (3.1.2)$$

где $R_И$ - импульсное сопротивление заземления, $I_М^{/}$ - крутизна тока молнии, L – индуктивность опоры с учетом индуктивности близлежащего участка троса. Косоугольный передний фронт тока молнии описывается выражением

$$i_М = I_М \frac{t}{T},$$

из которого видно, что

$$I_М^{/} = \frac{I_М}{T}.$$

Допустим, что один из фазных проводов в момент возникновения падения напряжения от пикового значения тока молнии на опоре имеет напряжение $U_{фт}$ по отношению к земле. Тогда может возникнуть положение, когда напряжение $U_М + U_{фт}$ (рис. 3.2) превзойдет импульсную прочность изоляции между опорой и фазным проводом.

Поэтому напряжение, приложенное к гирлянде изоляторов, должно быть меньше или, в крайнем случае равно 50% - ному импульсному разрядному напряжению, т.е.

$$U_М + U_{фт} = R_И I_М + L I_М^{/} + \frac{\sqrt{2} U_{ном}}{\sqrt{3}} \le U_{0,5} \qquad (3.1.3)$$

где $U_{0,5}$ - 50% - разрядное напряжение.

Обозначая через T_1 длительность переднего косоугольного фронта тока молнии или его части, из выражения (3.1.3) найдем, что ток не должен превосходить величины

$$I_М \le \frac{U_{0,5} - \sqrt{\frac{2}{3}} U_{раб}}{R_И + L/T_1}, \qquad (3.1.4)$$

где $U_{ном}$ заменено на $U_{раб}$.

Полагая $U_{0,5} \approx 800$ кВ, $R_И = 5$ Ом, $T_1 = 2 \cdot 10^{-6}$ с, $L = 5 \cdot 10^{-6}$ Гн, получим для $U_{раб}$ =126 кВ

$I_М \le 93$ кА.

Наибольший ток, который не приводит к обратному перекрытию при ударе молнии в молниеотвод называется уровнем грузоупорности.

Вероятность того, что ток молнии I_M превысит указанную величину может быть оценена по формуле

$$P = \frac{1}{1+(\frac{I_M}{31})^{2,6}}, \qquad (3.1.5)$$

и для тока I_M =93 кА составит $5{,}44 \cdot 10^{-2}$.

В этом выражении, как нетрудно убедиться, медианное значение тока равно 31 кА.

В соответствии с руководством РД 153-34.3-35.125-99 [3] для определения 50% - ных разрядных напряжений воздушных промежутков на опоре могут быть использованы следующие усредненные градиенты напряжения:

для импульса положительной полярности – 580 кВ/м;

для импульса отрицательной полярности – 625 кВ/м.

Для комбинированной изоляции на линиях с деревянными опорами

$$U_{50} = U_{50}^{/} + l_Д E_Д,$$

где $U_{50}^{/}$ - 50% разрядное напряжение одной или двух гирлянд изоляторов, кВ; $l_Д$ - длина по дереву, м; $E_Д$ - градиент разрядного напряжения по дереву, равный 70 кВ/м. Указанные рекомендации распространяются на линейную изоляцию ВЛ до 750 кВ. Под линейной изоляцией подразумевается либо поддерживающая гирлянда, либо воздушный промежуток на опоре, если он имеет меньшую импульсную прочность, чем гирлянда, либо комбинированная изоляция на деревянных опорах с учетом длины разрядного пути по дереву.

3.2 Наведенные напряжения на линии при близких ударах молнии

Наиболее простой анализ вопроса основан на модели молниевого разряда, предложенной Брюсом и Голдом еще в 1941 году, в которой нисходящий вертикальный лидер аккумулирует в себе заряд облака, а обратный или главный разряд полностью нейтрализует заряд лидера. При этом импульс тока распространяется от плоскости земли по каналу лидера со скоростью V без задержки и искажения формы импульса и амплитуды. Распределение первоначального заряда вдоль канала лидера считается равномерным, а земля идеально-проводящей.

Основные этапы нахождения электродинамических векторных и скалярных потенциалов при обратном разряде молнии с прямоугольным фронтом импульса тока с теми или иными вариациями можно найти в работах [4, 5, 6]. Результаты работы [2] позднее обсуждались другими авторами, например в [6], а модель Брюса-Голда подвергалась критическому обсуждению, например в [7].

Однако основанные на этой модели результаты сохраняют свое прикладное значение по настоящее время, и здесь приводятся основные соотношения, следуя краткому изложению вопроса, данному в [6].

Ток в канале молнии, совмещенный с осью z (рис.3.3), можно записать в виде

$$i(t) = I_M u(t) u(Vt - z^{/}), \qquad (3.2.1)$$

где время $t \geq 0$, отсчитывается от начала обратного разряда, V - скорость распространения фронта, $z^{/}$ - текущая точка вдоль канала молнии, $u(t)$ и $u(Vt - z^{/})$ - единичные функции Хевисайда.

Выражение $I_M u(t)$ описывает импульс тока прямоугольной формы в точке $z^{/} = 0$.

Учитывая, что возмущение до точки наблюдения P(x, y, z) происходит с запаздыванием по времени на величину $\frac{r}{c}$, где r – величина радиус-вектора между точками канала молнии и точкой наблюдения, c – скорость распространения электромагнитного возмущения в окружающей среде (с $\approx$скорость света в воздухе), то векторный и скалярный потенциалы должны быть определены по формулам

$$\varphi = \frac{1}{4\pi\varepsilon_0}\int_{-\infty}^{+\infty}\frac{\sigma(z^{/}, t - r/c)}{r}dz^{/}, \qquad (3.2.2)$$

$$A_z = \frac{\mu_0}{4\pi}\int_{-\infty}^{+\infty}\frac{i(z^{/}, t - r/c)}{r}dz^{/}. \qquad (3.2.3)$$

Считается, что линейный ток и векторный потенциал имеют лишь одну компоненту z, σ - является линейной плотностью заряда, а интегрирование распространяется вдоль оси z от $-\infty$ до $+\infty$ с учетом зеркального отображения в плоскости земли: линейного тока с тем же знаком, а заряда – с противоположным знаком.

Ток для $z^{/} \leq 0$ описывается выражением

$$i(t) = I_M u(t) u(Vt + z^{/}). \qquad (3.2.4)$$

Следовательно, линейная плотность заряда, равная I_M/V с учетом предположения о полной нейтрализации распределена по каналу молнии и в его зеркальном отображении в соответствии с законами:

$$\sigma(t) = -\frac{I_M}{V}\left[1 - u(t)u(Vt - z^{/})\right], \qquad (3.2.5)$$

$$\sigma(t) = \frac{I_M}{V}\left[1 - u(t)u(Vt + z^{/})\right]. \qquad (3.2.6)$$

Если предположить, что канал молнии ограничен высотой H, то для векторного потенциала имеем

$$A_z = \frac{\mu_0 I_M}{4\pi}\left[\int_0^H \frac{u(t - \frac{r_1}{c})u(Vt - z^{/} - \frac{V}{c}r)}{r}dz^{/} + \int_{-H}^{0}\frac{u(t - \frac{r_1}{c})u(Vt + z^{/} - \frac{V}{c}r)}{r}dz^{'}\right], \qquad (3.2.7)$$

причем $r = \sqrt{r_0^2 + (z - z^{/})^2}$, $r_1 = \sqrt{r_0^2 + z^2}$ и $r_0 = \sqrt{x^2 + y^2}$.

Заменяя во втором интеграле выражения (3.2.7) $z^{/}$ на (-$z^{/}$), получим

□(3.2.8)

Обозначая первый интеграл через *f(z)*, можем записать:

$$A_z = \frac{\mu_0 I_M}{4\pi}u(t - \frac{r_1}{c})\left[f(z) + f(-z)\right]. \qquad (3.2.9)$$

Аналогично для скалярного потенциала

$$\varphi = \frac{I_M}{4\pi\varepsilon_0 V} u(t - \frac{r_1}{c}) \left[-\int_0^H \frac{1 - u(Vt - z^{/} + \frac{V}{c}\sqrt{r_0^2 + (z - z^{/})^2}}{\sqrt{r_0^2 + (z - z^{/})^2}} dz^{/} + \int_0^H \frac{1 - u(Vt - z^{/} - \frac{V}{c}\sqrt{r_0^2 + (z + z^{/})^2}}{\sqrt{r_0^2 + (z + z^{/})^2}} dz^{/} \right].$$

(3.2.10)

Обозначая первый интеграл через F(z), найдем, что

$$\varphi = \frac{I_M}{4\pi\varepsilon_0 V} u(t - \frac{r_1}{c}) [F(z) - F(-z)] \qquad (3.2.11)$$

При определении верхнего пределов *f(z)* и *F(z)* следует исходить из того, что к моменту времени t вклад элементов тока в величину векторного потенциала в точке наблюдения будет определяться не на длине *Vt*, а на длине, отстоящей от *Vt* на величину $Z_k^{/}$, для которой выполняется уравнение:

$$t - \frac{Z_k^{/}}{V} = \frac{r_k}{c} = \frac{1}{c}\sqrt{r_0^2 + (z - z_k^{/})^2} \,. \qquad (3.2.12)$$

Поэтому для f(z) будем иметь интеграл вида

$$\int_0^{Z_K^{/}} \frac{dz^{/}}{\sqrt{r_0^2 + (z - z^{/})^2}} , \qquad (3.2.13)$$

где $Z_k^{/}$ определяется как результат решения уравнения (3.2.12), а именно:

$$Z_k^{/} = \frac{Vt - \beta^2 z \pm \beta\sqrt{(V_0 t - z)^2 + r_0^2(1 - \beta^2)}}{1 - \beta^2} , \qquad (3.2.14)$$

где $\beta = \frac{V}{c}$ и выбор осуществляется в пользу нижнего знака.

После взятия интеграла (3.2.13) и некоторых преобразований окончательное выражение для *f(z)* запишется в виде

$$f(z) = \ln \frac{Vt - z + \sqrt{(Vt - z)^2 + r_0^2(1 - \beta^2)}}{(1 + \beta)(-z + \sqrt{r_0^2 + z^2})} \,. \qquad (3.2.15)$$

Отсюда для вихревой компоненты напряженности электрического поля при $t \succ \frac{r_1}{c}$ имеем следующий результат.

$$E_z = -\frac{\partial A_z}{\partial t} = -\frac{\mu_0 I_M}{4\pi} \beta c \left\{ \left[(\beta ct - z)^2 + (1 - \beta^2) r_0^2\right]^{-1/2} + \left[(\beta ct + z)^2 + (1 - \beta^2) r_0^2\right]^{-1/2} \right\}. \qquad (3.2.16)$$

При *z=0*

$$E_Z\big|_{Z=0} = -\frac{I_0}{2\pi}\sqrt{\frac{\mu_0}{\varepsilon_0}} \frac{\beta}{\left[(\beta ct)^2 + (1 - \beta^2) r_0^2\right]^{1/2}} \,. \qquad (3.2.17)$$

Выражение (3.2.17) полностью соответствует результату (45) в работе [8] и результату (46) в работе [4] с учетом принятых там обозначений.

В первом интеграле для φ в (3.2.10), обозначенного нами в (3.2.11) как *F(z)*, интегрирование выражения

$$-\int_0^H \left[r_0^2 + (z - z^{/})^2\right]^{-1/2} dz^{/}$$

производится без ограничений. Результат интегрирования получается в виде

$$\ln\left[z - L + \sqrt{r_0^2 + (z-H)^2}\right] - \ln(z + \sqrt{r_0^2 + z^2}) = \ln r_0^2 - \ln\left[H - z + \sqrt{(H-z)^2 + r_0^2}\right] - \ln(z + \sqrt{r_0^2 + z^2}).$$

Интегрирование же выражения с функцией Хевисайда не отличается от результата для $f(z)$.

Объединяя полученные выражения для $F(z)$, находим:

$$F(z) = \ln(Vt - z + \sqrt{(Vt-z)^2 + r_0^2(1-\beta^2)}) - \ln(1+\beta) - \ln\left[H - z + \sqrt{(H-z)^2 + r_0^2}\right]. \qquad (3.2.18)$$

Напряженность поля на поверхности земли от компоненты, обусловленной электродинамическим скалярным потенциалом при $t \succ \frac{r_1}{c}$ равна

$$E_z = -\left.\frac{\partial\varphi}{\partial z}\right|_{Z=0} = -\frac{I_M}{4\pi\varepsilon_0\beta c}\left\{-\frac{2}{\sqrt{(\beta ct)^2 + (1-\beta^2)r_0^2}} + \frac{2}{\sqrt{H^2 + r_0^2}}\right\} =$$

$$= \frac{I_M\sqrt{\frac{\mu_0}{\varepsilon_0}}}{2\pi\beta}\left\{\frac{1}{\sqrt{(\beta ct)^2 + (1-\beta^2)r_0^2}} - \frac{1}{\sqrt{H^2 + r_0^2}}\right\}. \qquad (3.2.19)$$

Следует отметить, что полученный результат отличается от формулы (38) [4] и будет совпадать с ней при условии H=0.

Умножая последний результат на *(-h)*, где *h* – высота провода линии передачи над землей, получим выражение (44) работы [8] для скалярного потенциала (с учетом разницы обозначений) на высоте *h.*

Основываясь на этих результатах, в работе [8] была получена оценка для наведенных напряжений на линии от непрямых ударов молнии.

Для максимального напряжения на линии высотой *h,* параллельной оси x, на участке, наиболее близком к каналу молнии, т.е. в окрестности точки *P(0,y,h)* (рис. 3.3) в [8] получено выражение

$$U_{\max} = \frac{Z_B I_M h}{4\pi y}\left(1 + \frac{\beta}{\sqrt{2-\beta^2}}\right), \qquad (3.2.20)$$

где $Z_B = \sqrt{\frac{\mu_0}{\varepsilon_0}}$; $\frac{Z_B}{4\pi} = 30$ Ом; $\beta = \frac{V}{c}$,

причем максимум соответствует моменту времени $t = \frac{y}{\beta c}$.

Из (3.2.20) вытекает, например, что при I_M= 30 кА*,* *h*=20 м*,* *y*=150 м и $\beta = 0{,}3$ наведенное направление будет равно 139 кВ. Значение $\beta = 0{,}3$ в предыдущем примере было, фактически, выбрано произвольно. Следует однако заметить, что скорость главного и последующих разрядов некоторым образом связаны с амплитудой тока. Не вдаваясь в историю вопроса, приведем лишь выражение, связывающее β и ток главного разряда в кА, записанное в [9]:

$$\beta = 0{,}004 I_M^{0,64} + 0{,}068. \qquad (3.2.21)$$

Тогда при токе *I*=30 кА для β имеем 0,103 и, в соответствии с формулой (3.2.20), максимальное напряжение равно уже 129 кВ.

3.3. Шунтирующее действие системы трос-опоры на импульс тока, прошедшего через опору при прямом ударе молнии

Рассмотрим случай, когда удар молнии пришелся в трос или непосредственно в опору. Задача состоит в том, чтобы описать импульс тока, прошедшего через опору, поскольку именно этот ток создает опасные перенапряжения на опоре, а затем, растекаясь в земле, может создавать опасные напряжения на длине шага (шаговый потенциал).

Импульс тока молнии главного разряда иногда представляют в виде импульса треугольной формы (рис. 3.4,а), где I_m - пиковое значение тока, T_1 - время нарастания тока от нуля до пикового значения (длительность переднего фронта импульса), T_2 - длительность спада тока от пикового значения до нуля.

С целью упрощения описания прибегнем к декомпозиции импульса, как это показано на рис. 3.4,б. Все изменения на рис. 3.4,б при этом описываются линейным законом. Однако начала сдвинуты во времени относительно начала изменения исходного импульса на время T_1 и T_1+T_2. Из сказанного следует, что исходный импульс треугольной формы может быть во времени записан в виде выражения

$$I_M(t) = \frac{I_m}{T_1}\left[t-(t\text{-}T_1)u(t-T_1)\right] - \frac{I_m}{T_2}\left[t-(t\text{-}T_1)u(t-T_1)-(t-T_1-T_2)u(t-T_1-T_2)\right], \qquad (3.3.1)$$

где *u(t)*, как и прежде, функция Хевисайда.

Операторное изображение (3.3.1) выглядит достаточно просто:

$$I_M(p) = \frac{I_m}{T_1}\frac{1-\exp(-pT_1)}{p^2} - \frac{I_m}{T_2}\frac{\exp(-pT_1)-\exp(T_1+T_2)}{p^2}. \qquad (3.3.2)$$

Действительно, закону изменения t $(t \geq 0)$ соответствует изображение p^{-2}, а закону изменения $(t\text{-}T_1)u(t-T_1)$ изображение $p^{-2}\exp(-pT_1)$.

Представим теперь, что молниевый разряд ударил непосредственно в опору и что при прочих равных условиях действие импульса тока в этом случае будет наибольшим. При наличии общей тросовой защиты часть тока будет ответвляться в соседние опоры. Учтем влияние двух соседних опор, ближайших к пораженной. Эквивалентная расчетная схема имеет вид (рис.3.5), где ток молнии генерируется источником тока, внутренним сопротивлением которого в большинстве случаев можно пренебречь, учитывается симметрия расположения ближайших опор и предполагается, что индуктивность $L_{оп}$ и сопротивление $\mathrm{R}_{оп}$ у всех опор одни и те же. В результате ток через опору определяется как (рис. 3.5)

$$I_{оп}(t) = I_M(t) - 2I_{тр}(\mathrm{t}), \qquad (3.3.3)$$

а напряжение на пораженной опоре с помощью уравнения

$$U_{оп}(\mathrm{t}) = I_{оп}(t)R_{оп} + L_{оп}\frac{dI_{оп}(t)}{dt} = I_{тр}(\mathrm{t})R_{оп} + (L_{оп}+L_{тр})\frac{dI_{тр}(t)}{dt}. \qquad (3.3.4)$$

Сопротивлением $\mathrm{R}_{тр}$ можно пренебречь.

В операторной форме запись уравнений (3.3.3) и (3.3.4) имеет вид

$$I_{оп}(p) = I_{\mathrm{М}}(p) - 2I_{тр}(p),$$

$I_{on}(R_{on} + pL_{on}) = I_{mp}(\text{p})\left[R_{on} + p(L_{on} + L_{mp})\right].$

Из этих двух уравнений, найдем:

$$I_{on}(p) = I_M(p)\frac{R_{on} + p(L_{on} + L_{mp})}{3R_{on} + p(3L_{on} + L_{mp})} \qquad (3.3.5)$$

С учетом (3.3.2) и (3.3.5) рассмотрим выражение

$$\frac{1}{p^2}\frac{\frac{1}{3}p_1 + pk}{p + p_1} = \frac{A_{11}}{p} + \frac{A_{12}}{p^2} + \frac{A_2}{p + p_1}, \qquad (3.3.6)$$

где $k = \frac{L_{on} + L_{mp}}{3L_{on} + L_{mp}}$, $p_1 = \frac{3R_{on}}{3L_{on} + L_{mp}}$.

Выражение (3.3.6) в правой части представлено в виде простейших дробей с неизвестными коэффициентами, которые подлежат определению. Нетрудно видеть, что

$$A_{12} = \frac{1}{3},\ \ A_{11} = \frac{3k - 1}{3p_1} = -A_2.$$

Следовательно, для $0 \le t \le T_1$, с учетом правил перехода к оригиналам:

$$I_{on}(t) = \frac{I_m}{3T_1}\left[t + \frac{3k - 1}{p_1}(1 - \exp(-p_1 t))\right]. \qquad (3.3.8)$$

Вводя обозначения

$$\tau = \frac{L_{mp}}{2\text{R}_{\text{оп}}} \text{ и } k_\lambda = \frac{L_{on}}{L_{mp}},$$

имеем

$$\frac{\text{3k - 1}}{\text{p}_1} = \frac{4}{3}\tau,\ \ p_1 = \frac{3}{2\tau(1 + 3\kappa\lambda)}.$$

На основании (3.3.8) и (3.3.2) при $0 \le t < \infty$ окончательно находим долевое значение тока в опоре в единицах пикового значения тока:

$$\frac{I_{on}(\text{t})}{\text{I}_\text{m}} = \frac{1}{3}\left\{\frac{t}{T_1} + \frac{4}{3}\frac{\tau}{T_1}\left[1 - \exp(-\frac{3t}{2\tau(1 + 3\kappa\lambda)}\right] - u(t - T_1)\left[\frac{t - T_1}{T_1} + \frac{t - T_1}{T_2} + \frac{4}{3}\tau(T_1^{-1} + T_2^{-1})\exp(-\frac{3(t - T_1)}{2\tau(1 + 3\kappa\lambda)})\right] +\right.$$

$$\left. + u(t - T_1 - T_2)\left[\frac{t - T_1 - T_2}{T_2} + \frac{4}{3}\frac{\tau}{T_2}(1 - \exp(-\frac{3(t - T_1 - T_2)}{2\tau(1 + 3\kappa\lambda)}))\right]\right\}. \qquad (3.3.9)$$

Расчетные значения по (3.3.9) доли тока, прошедшего через опору, в зависимости t/τ при $\text{k}_\lambda = 0$ и $\text{k}_\lambda = 0{,}02$, $\tau/T_2 = 1/2$, $T_2 = 51 \cdot 10^{-6}c$, $T_1/\tau = 0{,}05$ сведены в таблицу.

t/τ	0	0,025	0,05	0,075	0,1	0,4	0,8	1,2	1,6	2,0	2,4	3,2
$\text{k}_\lambda = 0$	0	0,494	0,976	0,94	0,905	0,564	0,267	0,074	-0,063	-0,168	-0.106	-0,032
$\text{k}_\lambda = 0{,}02$	0	0,476	0,94	0,907	0,876	0,558	0,273	0,082	-0,055	-0,161	-0,105	-0,034

Значение 0,02 для k_λ в примере взято, исходя из индуктивности $L_{mp} = 1{,}65 \cdot 10^{-3}$ Гн на длине пролета 300м и $L_{on} = 33 \cdot 10^{-6}$ Гн, близкой к индуктивности портальной железобетонной опоры ВЛ 750 кВ [3].

Вопросы для самопроверки

1. Объясните, почему медианное значение тока в формуле (3.1.5) равно 31 кА.
2. В чем состоит модель молниевого разряда, предложенная Брюсом и Голдом.
3. Постройте графики изменения долевого значения тока согласно приведенной таблицы и обьясните характер этих графиков.

Библиографический список

1. Изоляция и перенапряжения: Рабочая программа. Задание на контрольную работу. Методические указания к выполнению контрольной работы. Методические указания к выполнению лабораторных работ. – Спб.:СЗТУ, 2002.-54с.
2. В.В. Базуткин, К.П. Кадомская, М.В. Костенко, Ю.А. Михайлов.Перенапряжения в электрических системах и защита от них. Учебник для вузов. – СПб.: Энергоатомиздат, Санкт-Петербург. Отделение, 1995,-320с.
3. Руководство по защите электрических сетей 6 – 1150 кВ от грозовых и внутренних перенапряжений. Санкт-Петербург: ПЭИПК Монитопэнерго РФ, 1999. – 353 с.
4. Разевиг Д.В. Атмосферные перенапряжения на линиях электропередачи. ГЭИ, М-Л, 1959, с.216.
5. Rusck S. «Induced lightning over-voltages on power transmission lines with special reference to the overvoltage protection of low voltage networks». Trans R. Inst. Technol. (Sweden), 1958, 120 p.p. 1-118.
6. M.K. Haldar, A.C. Liew. Validation of Rusck's scalar and vector potential expressions due to a return stroke in a lightning channel. IEE Proc., vol. 134, Pt.C. №5, 1987, p. 366-367.
7. Lightning Return Stroke Current Models with Specified Channel-Base current: A Review and comparison.// C.A. Nucci at all. Journal of Geophysical Research. Vol. 95, No.12, pages 20, 395-20, 408, November 20, 1990.
8. Rusck S. Protection of Distribution Lines. (in Lightning. vol. 2. Lightning Protection, Edited by R.H. Golde, 1977) p.p. 747-770.
9. A. J. Eriksson, M.F. Stringfellow, D.V. Meal. Lightning-induced overvoltages on overhead distribution lines. IEEE Trans. on PAS, vol. PAS-101, No.4, 1982, p.p. 960-968.
10. В.В. Базуткин , В.П. Ларионов, Ю.С.Пинталь. Техника высоких напряжений. Изоляция и перенапряжения в электрических системах: Учебник для вузов. – М.: Энергоиздат, 1986 – с. 464.
11. Отключение токов в сетях высокого напряжения. Пер. с англ.-М.:Энергоиздат, 1981.-328с.
12. Schaltgerate. Grundlagen, Aufbau, Wirkungsweise, Springer-Verlag. Berlin Heidelberg New York London Paris Tokyo, 1987

Предметный указатель

Оглавление.

Цицикян
Георгий Николаевич

Изоляция и перенапряжения

Избранные главы письменных лекций

Редактор И.Н. Садчикова
Сводный темплан 2003 г.

Лицензия ЛР № 020308 от 14.02.97

Санитарно-эпидемиологическое заключение № 78.01.07.953.П.005641.11.03 от 21.11.2003г.

Подписано в печать 17.12.03 Формат 60*84 1/16

Б.Кн.-журн. П.л. Б.л. РТП РИО СЗТУ

Тирж Заказ

Северо-Западный государственный заочный технический университет

РИО СЗТУ, член Издательско-полиграфической ассоциации

Вузов Санкт-Петербурга

191186, Санкт-Петербург, ул. Миллионная, 5