

УДК 621.311

UDC 621.311

АНАЛИЗ ВЕЛИЧИНЫ ПЕРЕНАПРЯЖЕНИЙ ПРИ ОДНОФАЗНОМ ЗАМЫКАНИИ НА ЗЕМЛЮ В СЕТИ 35 кВ, РАБОТАЮЩЕЙ В РЕЖИМЕ ИЗОЛИРОВАННОЙ НЕЙТРАЛИ

OVERVOLTAGE VALUE ANALYSIS AT A SINGLE-PHASE GROUND FAULT AT THE 35 kV VOLTAGE, WHICH OPERATES IN THE INSULTED NEUTRAL MODE

Чазов Юрий Олегович
аспирант

Chazov Yuri Olegovich
postgraduate student

Перминов Игорь Александрович
аспирант

Perminov Igor Aleksandrovich
postgraduate student

Кочетков Николай Петрович
к.т.н., доцент, заведующий кафедрой
Ижевская Государственная Сельскохозяйственная Академия, г. Ижевск, Россия

Kochetkov Nikolay Petrovich
Cand.Tech.Sci., associate professor, head of the chair
Izhevsk State Agriculture Academy, Izhevsk, Russia

В статье приведены методика исследования и полученные зависимости величины перенапряжений в неповрежденных фазах от момента однократного однофазного замыкания на землю в сети 35 кВ с изолированной нейтралью

The article shows the test procedure and the value of the overvoltage in fault-free phases achieved dependencies on the moment of a one-time single-phase ground fault at the 35 kV voltage with an insulated neutral

Ключевые слова: ПЕРЕНАПРЯЖЕНИЕ, СЕТЬ 35 кВ, РЕЖИМ ИЗОЛИРОВАННОЙ НЕЙТРАЛИ, ОДНОФАЗНОЕ ЗАМЫКАНИЕ НА ЗЕМЛЮ

Keywords: OVERVOLTAGE, 35 kV VOLTAGE, INSULTED NEUTRAL MODE, SINGLE-PHASE GROUND FAULT

В условиях значительного износа и постоянно ухудшающегося технического состояния электрооборудования сельских питающих сетей 35 кВ особую роль приобретает проблема поддержания на необходимом уровне надежности питания потребителей электрической энергии. В настоящее время большинство сетей 35 кВ работают в режиме изолированной нейтрали. Считается, что одним из основных направлений повышения надёжности работы таких электрических сетей является снижение вероятности возникновения однофазных замыканий на землю, которые составляют не менее 75 % от общего числа повреждений [1].

Однофазные замыкания на землю в сетях с изолированной нейтралью могут быть как однократными, так и многократными и перемежающимися. Процесс многократного и перемежающегося замыкания на землю всегда сопровождается высокочастотным переходным процессом, вызывающим перенапряжения на элементах электрической

сети [1,3]. При однократном однофазном замыкании на землю также есть вероятность возникновения перенапряжений.

Целью данного исследования является теоретическое описание переходного процесса однократного однофазного замыкания на землю в одноцепной тупиковой сети 35 кВ. Анализ переходного процесса проведен классическим методом при следующих допущениях: междуфазные емкости линии равны нулю, режимные и конструктивные параметры электрической сети по фазам симметричны, параметры переходного процесса определяются индуктивными сопротивлениями обмоток силового трансформатора, проводов линии и емкостными проводимостями фаз линии относительно земли.

Схема замещения одноцепной тупиковой ВЛ 35 кВ представляет собой Т-образную схему, рисунок 1.

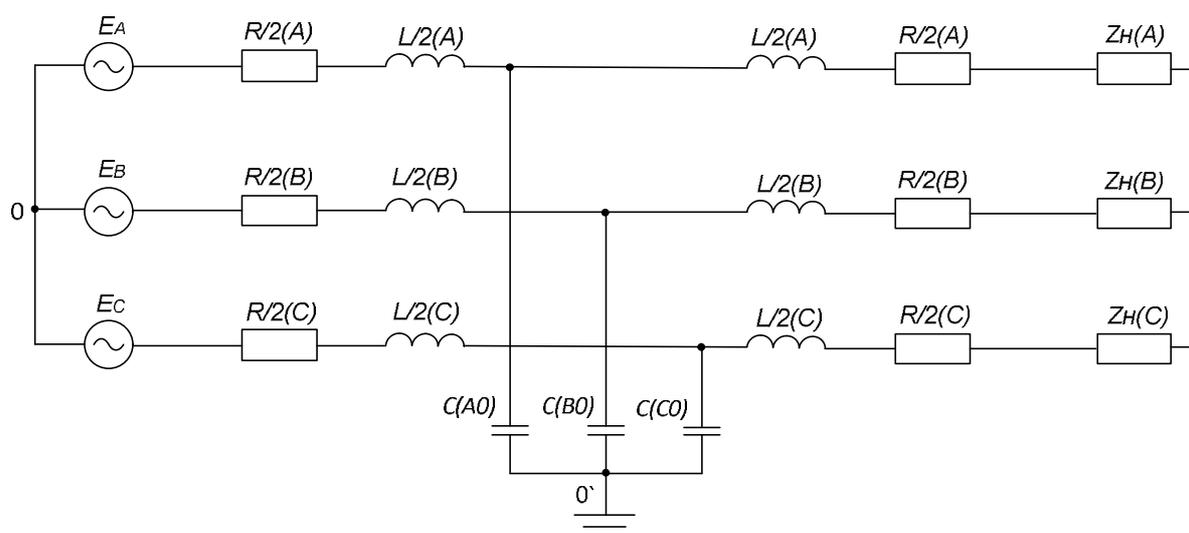


Рисунок 1 - Т-образная схема замещения одноцепной тупиковой ВЛ 35 кВ с изолированной нейтралью

На рисунке 1 приведены следующие обозначения: E – ЭДС фазы, R – активное сопротивление провода фазы, L – индуктивность провода фазы, Z_H – нагрузка фазы, C – емкость фазы линии относительно земли.

Для анализа перенапряжений при однофазном замыкании на землю составлена эквивалентная схема замещения, учитывающая параметры переходного процесса при однофазном замыкании на землю, рисунок 2.

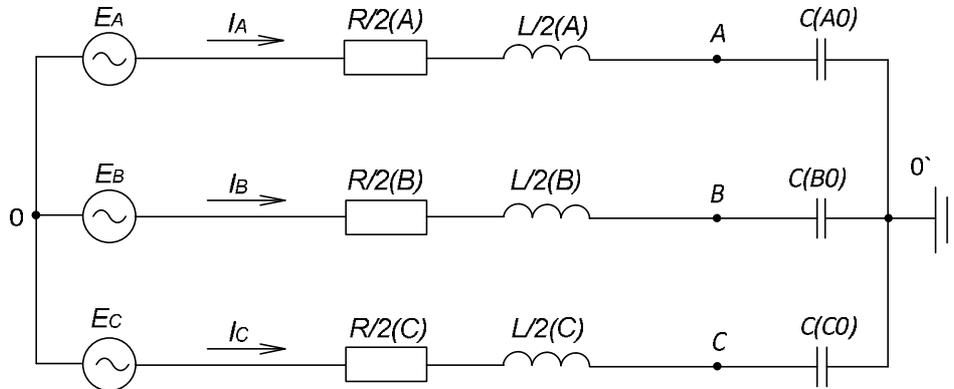


Рисунок 2 – Эквивалентная схема замещения проводимостей на землю

Перед расчетом переходного процесса при однофазном замыкании на землю, необходимо определить начальные условия в цепи до коммутации. Для этого определяются напряжения в ветвях электрической сети до и после коммутации в установившемся режиме [2].

Рассмотрим симметричный режим работы тупиковой ВЛ 35 кВ:

При $X_C \gg X_L, R$ напряжение на емкостных проводимостях проводов линии относительно земли:

$$\begin{cases} \dot{U}_{A0'} \approx \dot{E}_A = U_m \cdot e^{j0} = U_m \cdot \sin \omega t \\ \dot{U}_{B0'} \approx \dot{E}_B = U_m \cdot e^{-j120} = U_m \cdot \sin(\omega t - \frac{2 \cdot p}{3}) \\ \dot{U}_{C0'} \approx \dot{E}_C = U_m \cdot e^{j120} = U_m \cdot \sin(\omega t + \frac{2 \cdot p}{3}) \end{cases} \quad (1)$$

При замыкании фазы А на землю

$$X_{CA} = 0;$$

$$X_{CB} = X_{CC} = X_C.$$

Напряжение между узлами 0 и 0¹ с учетом емкостного сопротивления фаз относительно земли

$$U_{00'} = E_A \frac{Z_B - Z_A}{Z_B + 2Z_A} = E_A \frac{X_C - X_{CA}}{X_C + 2X_{CA}} = E_A \frac{X_C}{X_C} = E_A = U_m \cdot e^{j0} = U_m \cdot \sin \omega t . \quad (2)$$

При замыкании фазы А на землю выражение (1) примет вид:

$$\begin{cases} U_{A0'} = E_A - U_{00'} = E_A - E_A = 0 \\ U_{B0'} = E_B - U_{00'} = E_B - E_A = \sqrt{3} \cdot U_m \cdot e^{-j\frac{5p}{6}} . \\ U_{C0'} = E_C - U_{00'} = E_C - E_A = \sqrt{3} \cdot U_m \cdot e^{j\frac{5p}{6}} \end{cases}$$

Рассмотрим переходной процесс напряжения для отстающей фазы В при замыкании на землю фазы А. На рисунке 3 приведена схема замещения, учитывающая режим работы фазы В до и после замыкания на землю фазы А.

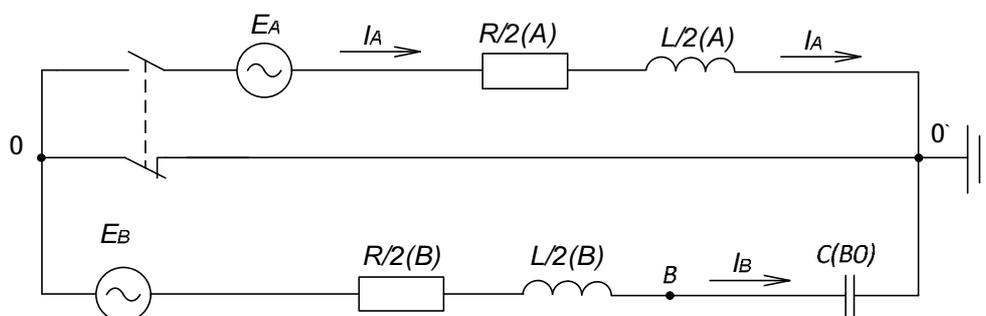


Рисунок 3 - Схема замещения для отстающей фазы В

Для цепи фазы В, образовавшейся после коммутации, уравнение Кирхгофа имеет вид [2]:

$$U_R + U_L + U_C = U_{AB} . \quad (3)$$

В выражение (3) подставляются формулы $U_L = L di / dt$, $i = CdU_C / dt$:

$$LC \frac{d^2 U_C}{dt^2} + RC \frac{dU_C}{dt} + U_C = U_{AB} . \quad (4)$$

Выражение (4) – неоднородное уравнение второго порядка. Его решение состоит из принужденной и свободной составляющих:

$$U_C = U_{Cnp} + U_{Cсв} , \quad (5)$$

где U_C – напряжение относительно земли отстающей фазы В при замыкании на землю фазы А;

U_{Cnp} – принужденная составляющая напряжения, полученная как частное решение неоднородного уравнения;

U_{Cce} – свободная составляющая напряжения, полученная как общее решение однородного уравнения (без правой части).

Входное сопротивление цепи после коммутации

$$Z_{B0'}(j\omega) = R + j\omega L + \frac{1}{j\omega C}. \quad (6)$$

Пусть $j\omega = p$, где p – корень характеристического уравнения, тогда

$$Z_{B0'}(p) = R + Lp + \frac{1}{Cp}. \quad (7)$$

Составляется характеристическое уравнение:

$$\frac{L Cp^2 + R Cp + 1}{Cp} = 0, \quad (8)$$

$$L Cp^2 + R Cp + 1 = 0. \quad (9)$$

Корни характеристического уравнения

$$p_{1,2} = -\frac{R}{2L} \pm j \sqrt{\frac{1}{LC} - \frac{R^2}{4L^2}}. \quad (10)$$

Вводятся обозначения:

$$d = \frac{R}{2L}, \quad (11)$$

где d – коэффициент затухания.

$$\omega_0 = \sqrt{\frac{1}{LC} - \frac{R^2}{4L^2}}, \quad (12)$$

где ω_0 – частота свободных затухающих колебаний.

Подставим выражения (11) и (12) в выражение (10):

$$p_{1,2} = -d \pm j\omega_0 \quad (13)$$

Общим решением свободной составляющей напряжения является функция вида

$$U_{Cce}(t) = A \cdot e^{-dt} \cdot \sin(\omega_0 t + n), \quad (14)$$

где A и n – постоянные (определяются значениями параметров схемы, начальными условиями и величиной ЭДС источника).

Продифференцируем выражение (14):

$$\frac{dU_{C_{св}}}{dt} = -Ade^{-dt} \cdot \sin(w_0t + n) + Aw_0e^{-dt} \cdot \cos(w_0t + n) \quad (15)$$

При $t = 0$ выражения (14) и (15) будут иметь следующий вид:

$$U_{C_{св}}(0_+) = A \cdot \sin n, \quad (16)$$

$$\frac{dU_{C_{св}}(0_+)}{dt} = -Ad \cdot \sin n + Aw_0 \cdot \cos n \quad (17)$$

По закону коммутации напряжение в цепи емкости не изменяется в первоначальный момент после коммутации

$$U_C(0_-) = U_{C_{нр}}(0_+) + U_{C_{св}}(0_+), \quad (18)$$

$$U_{C_{св}}(0_+) = U_C(0_-) - U_{C_{нр}}(0_+). \quad (19)$$

Введем обозначение a – момент замыкания фазы A на землю, тогда напряжение на фазе B до момента замыкания с учетом (1) имеет вид:

$$U_C(0_-) = U_m \cdot \sin(a - \frac{2 \cdot p}{3}) \quad (20)$$

Принужденная составляющая после момента замыкания равна:

$$U_{C_{нр}}(0_+) = \sqrt{3} \cdot U_m \cdot \sin(a - \frac{5 \cdot p}{6}) \quad (21)$$

С учетом (20) и (21) выражение (19) примет вид:

$$\begin{aligned} U_{C_{св}}(0_+) &= U_m \cdot \sin(a - \frac{2 \cdot p}{3}) - \sqrt{3} \cdot U_m \cdot \sin(a - \frac{5 \cdot p}{6}) = \\ &= U_M \cdot (\sin(a - \frac{2 \cdot p}{3}) - \sqrt{3} \cdot \sin(a - \frac{5 \cdot p}{6})) \end{aligned} \quad (22)$$

Для определения производной в (17) выразим ток i через U_C :

$$i = C \frac{dU_C}{dt}; \quad (23)$$

$$\frac{dU_C}{dt} = \frac{i}{C}; \quad (24)$$

$$\frac{dU_{C_{св}}(0_+)}{dt} = \frac{i_{св}(0_+)}{C}. \quad (25)$$

По закону коммутации ток в цепи с индуктивностью не изменяется в первоначальный момент после коммутации

$$i(0_-) = i_{np}(0_+) + i_{cс}(0_+), \quad (26)$$

$$i_{cс}(0_+) = i(0_-) - i_{np}(0_+). \quad (27)$$

Для фазы B (при $X_C \gg X_L, R$):

$$i(0_-) = \frac{U_B}{Z} \approx \frac{U_m \cdot e^{j(a-\frac{2p}{3})}}{Z \cdot e^{-j\frac{p}{2}}}, \quad (28)$$

$$i_{np}(0_+) = \frac{U_{B0'}}{Z} \approx \frac{\sqrt{3} \cdot U_m \cdot e^{j(a-\frac{5p}{6})}}{Z \cdot e^{-j\frac{p}{2}}}; \quad (29)$$

С учетом (28) и (29) выражения (27) и (25) примут вид:

$$\begin{aligned} i_{cс}(0_+) &= \frac{U_m \cdot e^{j(a-\frac{2p}{3})}}{Z \cdot e^{-j\frac{p}{2}}} - \frac{\sqrt{3} \cdot U_m \cdot e^{j(a-\frac{5p}{6})}}{Z \cdot e^{-j\frac{p}{2}}} = \\ &= \frac{U_m}{Z \cdot e^{-j\frac{p}{2}}} \cdot (e^{j(a-\frac{2p}{3})} - \sqrt{3} \cdot e^{j(a-\frac{5p}{6})}) \end{aligned} \quad (30)$$

$$\frac{dU_{Cс}(0_+)}{dt} = \frac{i_{cс}(0_+)}{C} = \frac{U_m}{Z \cdot C \cdot e^{-j\frac{p}{2}}} \cdot (e^{j(a-\frac{2p}{3})} - \sqrt{3} \cdot e^{j(a-\frac{5p}{6})}). \quad (31)$$

С учетом (22) и (31) выражения (16) и (17) для фазы B примут вид:

$$\begin{cases} A \cdot \sin n = U_M \cdot (\sin(a - \frac{2 \cdot p}{3}) - \sqrt{3} \cdot \sin(a - \frac{5 \cdot p}{6})) \\ -Ad \cdot \sin n + Aw_0 \cdot \cos n = \frac{U_m}{Z \cdot C \cdot e^{-j\frac{p}{2}}} \cdot (e^{j(a-\frac{2p}{3})} - \sqrt{3} \cdot e^{j(a-\frac{5p}{6})}) \end{cases} \quad (32)$$

Из системы уравнений (32) определим значения постоянных A и n :

$$n = \text{arcctg}\left(\frac{1}{Z \cdot C \cdot e^{-j\frac{p}{2}} \cdot w_0} + \frac{1}{d \cdot w_0}\right); \quad (33)$$

$$A = \frac{U_M \cdot (\sin(a - \frac{2 \cdot p}{3}) - \sqrt{3} \cdot \sin(a - \frac{5 \cdot p}{6}))}{\sin(\text{arcctg}(\frac{1}{Z \cdot C \cdot e^{-j\frac{p}{2}} \cdot w_0} + \frac{1}{d \cdot w_0}))}. \quad (34)$$

Общее решение для напряжения на отстающей фазе B при замыкании фазы A на землю будет иметь вид:

$$\begin{aligned}
 U_c = & \sqrt{3} \cdot U_m \cdot \left(\sin\left(\omega t - \frac{5p}{6} \right) + \right. \\
 & + \frac{U_M \cdot \left(\sin\left(a - \frac{2 \cdot p}{3} \right) - \sqrt{3} \cdot \sin\left(a - \frac{5 \cdot p}{6} \right) \right)}{\sin\left(\operatorname{arctg}\left(\frac{1}{Z \cdot C \cdot e^{-j\frac{p}{2}} \cdot \omega_0} + \frac{1}{d \cdot \omega_0} \right) \right)} \cdot e^{-dt} \times \\
 & \times \left. \sin\left(\omega_0 t + \operatorname{arctg}\left(\frac{1}{Z \cdot C \cdot e^{-j\frac{p}{2}} \cdot \omega_0} + \frac{1}{d \cdot \omega_0} \right) \right) \right)
 \end{aligned} \tag{35}$$

На основе полученных выше выражений можно исследовать форму кривой напряжения отстающей фазы B для различных моментов времени замыкания на землю фазы A .

В качестве примера на рисунке 4 приведена форма кривой напряжения отстающей фазы B при замыкании фазы A на землю в момент времени, соответствующий углу 60° . Расчеты проведены для ВЛ 35 кВ, длиной 30 км, марка провода АС-70.

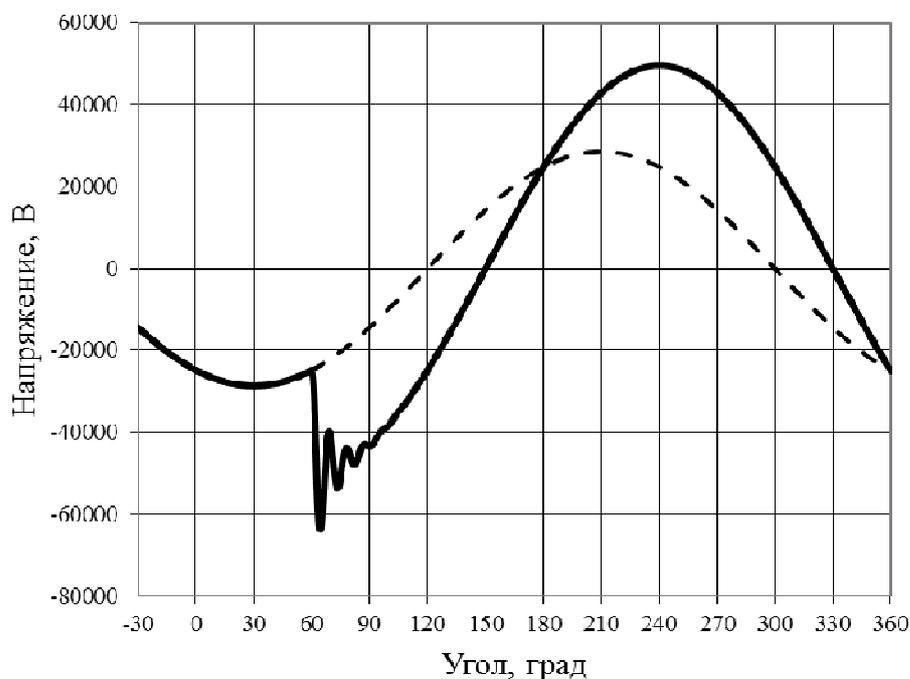


Рисунок 4 – Форма кривой напряжения отстающей фазы B при замыкании фазы A на землю в момент $\alpha = 60^\circ$

Аналогично вышеизложенному получены выражения для исследования формы кривой напряжения опережающей фазы *C* для различных моментов времени замыкания на землю фазы *A*.

Анализ и обработка полученных результатов исследования формы кривой напряжения отстающей и опережающей фазы при однократном однофазном замыкании на землю показали, что величина начального импульса напряжения на неповрежденных фазах ВЛ 35 кВ в момент однофазного замыкания на землю изменяется в широком диапазоне значений.

На рисунке 5 приведены полученные зависимости начального импульса напряжения отстающей фазы *B* и опережающей фазы *C* от момента замыкания фазы *A* на землю. Начальный импульс напряжения на рисунке 5 рассчитан в долях от максимального мгновенного значения фазного напряжения ВЛ 35 кВ.

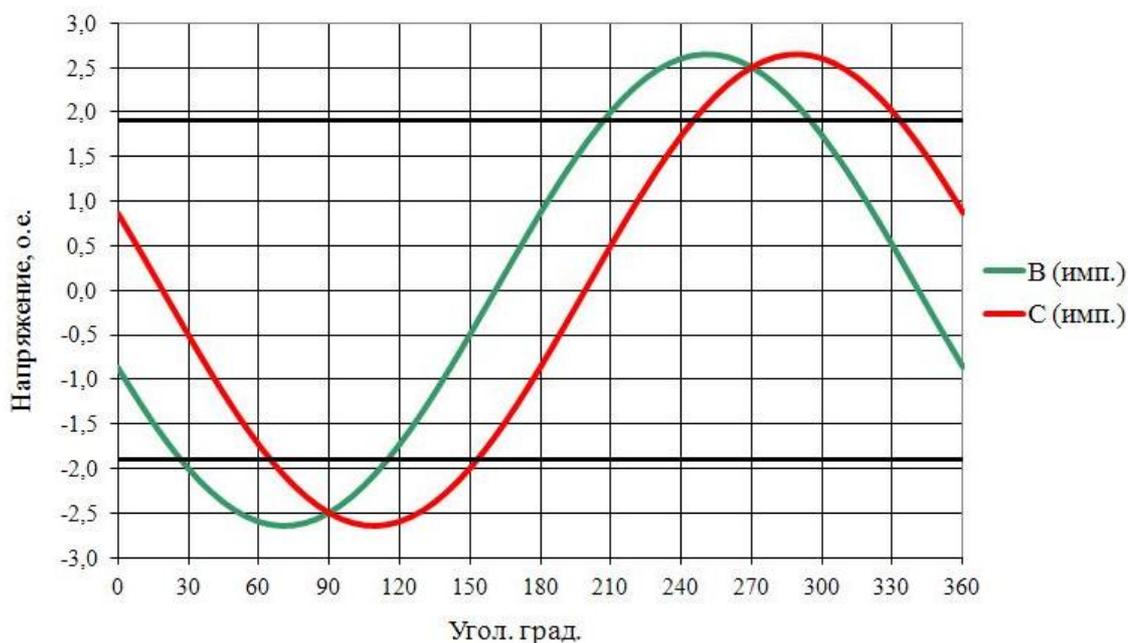


Рисунок 5 – Зависимости начального импульса напряжения на неповрежденных фазах *B* и *C* от момента однократного замыкания фазы *A* на землю

Горизонтальные линии на рисунке 5 показывают границы допустимого уровня мгновенного напряжения $(1,1 \cdot \sqrt{3} \cdot U_{ф.макс})$, выход за которые считается перенапряжением [4]. Таким образом, при однократном однофазном замыкании на землю вероятность возникновения перенапряжения на неповрежденных фазах можно определить как отношение длительности перенапряжения к длительности периода изменения напряжения.

Выводы:

1. Получены зависимости величины начального импульса напряжения на неповрежденных фазах линии от момента однократного однофазного замыкания на землю в сети 35 кВ с изолированной нейтралью.

2. Максимум начального импульса напряжения на неповрежденных фазах при однократном однофазном замыкании на землю более чем в 1,5 раза превышает максимальное мгновенное значение линейного напряжения сети 35 кВ в моменты времени, соответствующие углам 70° и 250° для отстающей фазы, углам 110° и 290° для опережающей фазы.

3. При однократном однофазном замыкании на землю вероятность возникновения перенапряжения для каждой из неповрежденных фаз ВЛ 35 кВ с изолированной нейтралью составляет порядка 50 %.

4. При однократном однофазном замыкании на землю вероятность возникновения перенапряжения в любой из неповрежденных фаз ВЛ 35 кВ с изолированной нейтралью составляет порядка 70 %.

5. При однократном однофазном замыкании на землю вероятность возникновения перенапряжения одновременно в двух неповрежденных фазах ВЛ 35 кВ с изолированной нейтралью составляет порядка 30 %.

Список литературы

1. Лихачев, Ф.А. Замыкания на землю в сетях с изолированной нейтралью и с компенсацией емкостных токов. М.: Энергия, 1971. 152 с.
2. Бессонов, Л.А. Теоретические основы электротехники. М.: Высш. школа, 1973. 752 с.
3. Долгинов, А.И. Техника высоких напряжений в электроэнергетике. М.: Энергия, 1968. 464 с.
4. ГОСТ 13109-97 "Электрическая энергия. Совместимость технических средств электромагнитная. Нормы качества электрической энергии в системах электроснабжения общего назначения". Дата введения 1999-01-01.