

3. ПЕРЕНАПРЯЖЕНИЯ НА НЕЙТРАЛИ СИЛОВЫХ ТРАНСФОРМАТОРОВ 110-220 кВ И ВЫБОР ТЕХНИЧЕСКИХ ХАРАКТЕРИСТИК ОПН-Н

В связи с развитием энергосистем увеличиваются токи короткого замыкания, что приводит к росту динамических воздействий на обмотки трансформаторов, утяжелению работы коммутирующей аппаратуры. Частичное разземление нейтралей силовых трансформаторов 110-220 кВ применяется в качестве эффективной меры ограничения токов однофазного короткого замыкания, которые составляют основную долю в общем числе коротких замыканий [41].

Разземление нейтрали части силовых трансформаторов системы приводит к необходимости защиты изоляции нейтрали от воздействующих на нее в процессе эксплуатации перенапряжений [42]. В настоящее время защита изоляции разземленных нейтралей осуществляется с помощью ОПН, характеристики которых выбираются исходя из обеспечения требования надежной защиты изоляции от грозовых и коммутационных перенапряжений, и, в то же время, предотвращения повреждения самих ОПН от возможных квазистационарных перенапряжений на нейтрали.

В России производством ОПН, предназначенных для защиты изоляции разземляемых нейтралей от грозовых и коммутационных перенапряжений, занимаются многие предприятия, в каталогах продукции которых такие аппараты обозначаются «ОПН-Н», а удовлетворяющие условиям эксплуатации характеристики ОПН-Н для сетей 110-220 кВ приведены, например, в [1,26]. Научный интерес представляет теоретическое обоснование указанных в каталогах основных технических характеристик ОПН-Н, которое проведено ниже.

Для правильного выбора основных характеристик защитного аппарата ОПН-Н необходимо исследовать грозовые и внутренние перенапряжения, возникающие на изоляции разземленной нейтрали трансформатора. Результаты экспериментальных исследований в этой области, проведенных д.т.н. Ф.Х.

Халиловым, изложены в [42], где указаны максимальные грозовые перенапряжения на изоляции нейтрали и влияющие на них факторы, среди которых Ф.Х. Халилов выделяет, главным образом, длительность и максимальное напряжение грозовых импульсов, приходящих на линейные концы обмоток трансформаторов, а также характеристики самих трансформаторов.

Информация о максимальных грозовых перенапряжениях на изоляции нейтрали недостаточна для определения формы грозовых импульсных токов в ОПН-Н и, поэтому, для обоснования характеристик ОПН-Н соискателем составлены расчетные схемы замещения трансформатора, с использованием которых проведен анализ передачи грозовых волн через трансформатор в разземленную нейтраль, и, кроме того, возможен анализ перехода грозовых волн во вторичную цепь.

С использованием схем замещения трансформатора проведен аналитический и компьютерный анализ грозовых перенапряжений на разземленной нейтрали, результаты которого удовлетворительно согласуются с данными [42]. Кроме того, определены максимальные значения и форма импульсных токов в ОПН-Н при грозовых перенапряжениях, что позволило обосновать основные технические характеристики этих защитных аппаратов.

3.1. Уравнения и схемы замещения трансформатора

Волновые процессы в обмотке высшего напряжения могут быть переданы в обмотку низшего напряжения и на разземленную нейтраль как электростатическим, так и магнитным путем [43].

При электростатической передаче начальное распределение напряжения в обмотке высшего напряжения передается в обмотку низшего напряжения благодаря емкостной связи: соответствующая емкостная схема замещения представлена на рис.3.1.

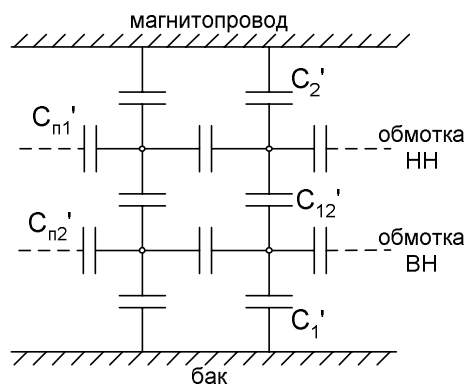


Рис.3.1. Емкостная схема замещения двухобмоточного трансформатора.

Отбросив вследствие малости продольные емкости обмоток (C_{n1}' и C_{n2}'), трансформатор можно представить в виде обобщенной П-схемы замещения рис.3.2 (распределенные емкости C_1' , C_2' , C_{12}' заменены сосредоточенными, размещенными в начале и в конце обмоток).

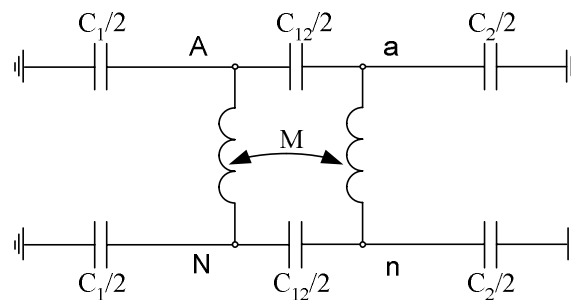


Рис.3.2. П-схема замещения однофазного двухобмоточного трансформатора.

После объединения трех однофазных схем замещения трансформатора в трехфазную группу с соединением обмоток «звезда/треугольник» получим схему рис.3.3. Концы обмоток фаз высокой и низкой стороны на схеме обозначены как A,B,C,N,a,b,c; звезда имеет выведенную нейтраль (заземленную или нет).

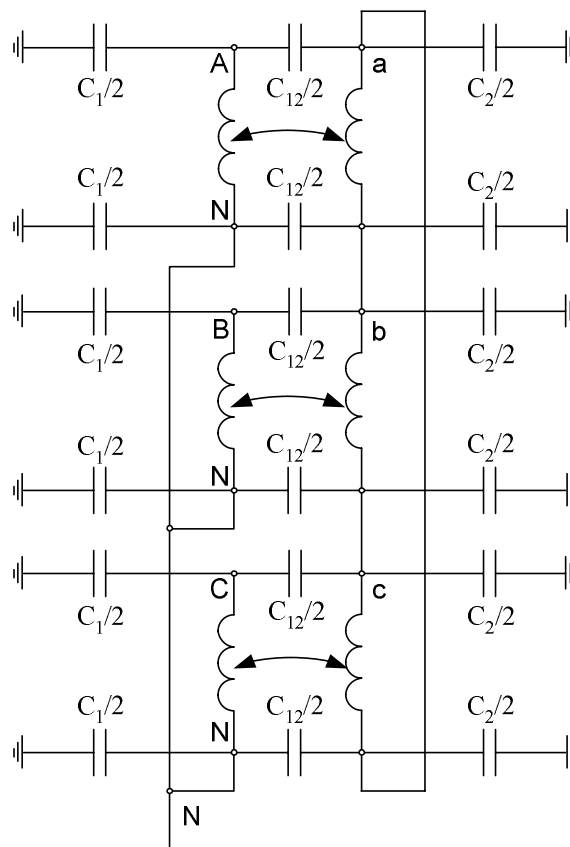


Рис.3.3. П-схема замещения трехфазного трансформатора, обмотки которого соединены по схеме «звезда/треугольник».

Объединив, где требуется, параллельно включенные емкости и несколько преобразовав схему рис.3.3, получим рис.3.4. В схеме рис.3.4 можно проводить анализ передачи перенапряжений как на вторичную сторону, так и на нейтраль (если она разземлена). Далее основное внимание уделено перенапряжениям на разземленной нейтрали и защите изоляции нейтрали от перенапряжений.

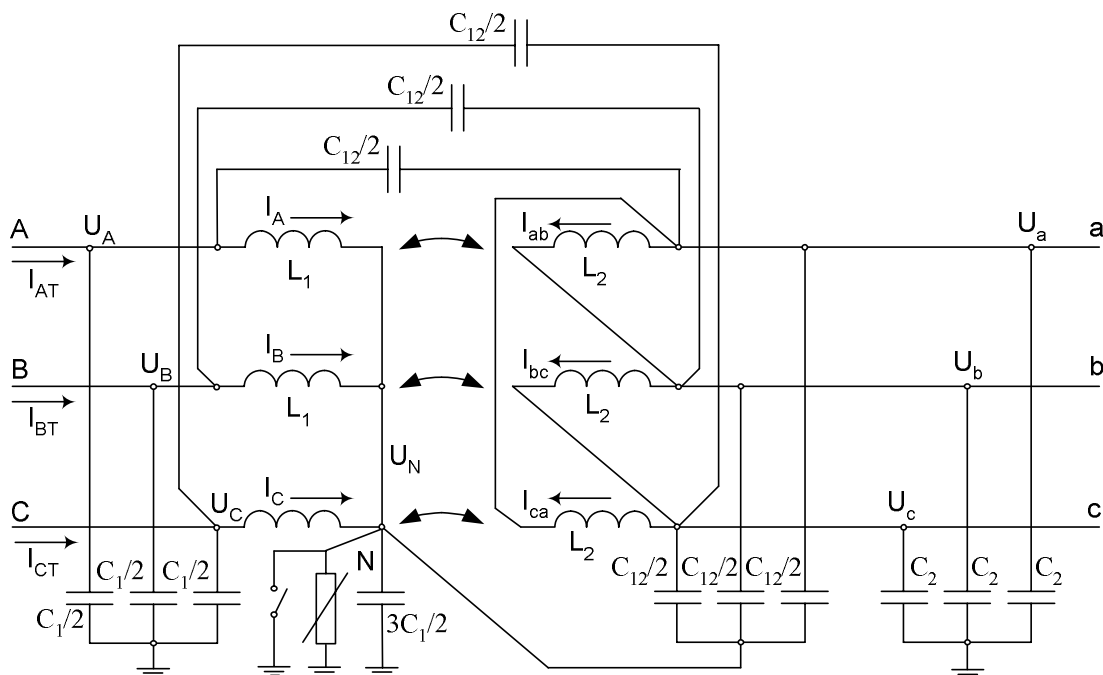


Рис.3.4. Расчетная П-схема замещения трехфазного двухобмоточного трансформатора со схемой соединения обмоток «звезда/треугольник» (трансформатор имеет разземляемую нейтраль, в которую возможна установка ОПН-Н).

Система уравнений двухобмоточного трансформатора без учета активных потерь, нагрузки и тока намагничивания имеет вид в операторной форме:

$$U_A - U_N = p\psi_A + pL_1 I_A, \quad U_B - U_N = p\psi_B + pL_1 I_B, \quad U_C - U_N = p\psi_C + pL_1 I_C,$$

$$p\psi_a = pL_2 I_{ab} + U_a - U_b, \quad p\psi_b = pL_2 I_{bc} + U_b - U_c, \quad p\psi_c = pL_2 I_{ca} + U_c - U_a,$$

$$I_{ab} = KI_A, \quad I_{bc} = KI_B, \quad I_{ca} = KI_C,$$

$$\psi_A = W_1 \Phi_A, \quad \psi_B = W_1 \Phi_B, \quad \psi_C = W_1 \Phi_C,$$

$$\psi_a = W_2 \Phi_A, \quad \psi_b = W_2 \Phi_B, \quad \psi_c = W_2 \Phi_C.$$

При записи уравнений введено обозначение $W_1/W_2 = K$ – отношение чисел витков обмоток на высокой и низкой сторонах трансформатора.

После несложных преобразований уравнения можно записать:

$$U_A - U_N = pL_1 I_A + K(pL_2 KI_A + U_a - U_b) = pL_T I_A + K(U_a - U_b), \quad (3.1)$$

$$U_B - U_N = pL_T I_B + K(U_b - U_c), \quad (3.2)$$

$$U_C - U_N = pL_T I_C + K(U_c - U_a), \quad (3.3)$$

где $L_T = L_1 + K^2 L_2$ – индуктивность короткого замыкания трансформатора, приведенная к стороне высокого напряжения.

К уравнениям трансформатора, определяющим электромагнитные связи между обмотками, добавим уравнения, описывающие электростатические взаимодействия между обмотками. Сделаем это в операторном виде по первому закону Кирхгофа (для нулевых начальных условий на емкостях).

Для высокой стороны:

$$I_{AT} = \frac{pC_1}{2}U_A + \frac{pC_{12}}{2}(U_A - U_a) + I_A, \quad (3.4)$$

$$I_{BT} = \frac{pC_1}{2}U_B + \frac{pC_{12}}{2}(U_B - U_b) + I_B, \quad (3.5)$$

$$I_{CT} = \frac{pC_1}{2}U_C + \frac{pC_{12}}{2}(U_C - U_c) + I_C, \quad (3.6)$$

для низкой стороны:

$$0 = pC_2U_a + \frac{pC_{12}}{2}(U_a - U_N) - \frac{pC_{12}}{2}(U_A - U_a) + I_{ab} - I_{ca}, \quad (3.7)$$

$$0 = pC_2U_b + \frac{pC_{12}}{2}(U_b - U_N) - \frac{pC_{12}}{2}(U_B - U_b) + I_{bc} - I_{ab}, \quad (3.8)$$

$$0 = pC_2U_c + \frac{pC_{12}}{2}(U_c - U_N) - \frac{pC_{12}}{2}(U_C - U_c) + I_{ca} - I_{bc}, \quad (3.9)$$

для нейтрали

$$\frac{p3C_1}{2}U_N = I_A + I_B + I_C + \frac{pC_{12}}{2}(U_a + U_b + U_c - 3U_N) \quad (3.10)$$

3.2. Напряжение на разземленной нейтрали

Найдем выражение для напряжения нейтрали U_N , для чего сложим уравнения (3.1), (3.2), (3.3); получим после преобразований:

$$I_A + I_B + I_C = \frac{U_A + U_B + U_C - 3U_N}{pL_T}.$$

Сложим уравнения (3.7), (3.8), (3.9); после преобразований:

$$U_a + U_b + U_c = 3U_N \frac{C_{12}/2}{C_2 + C_{12}} + (U_A + U_B + U_C) \frac{C_{12}/2}{C_2 + C_{12}}.$$

Подставив два найденных выражения в (3.10), получим

$$3U_N \left[\frac{1}{pL_T} + p \left(\frac{C_1}{2} + \frac{C_{12}}{2} - \frac{C_{12}^2/4}{C_2 + C_{12}} \right) \right] = (U_A + U_B + U_C) \cdot \left[\frac{1}{pL_T} + p \frac{C_{12}^2/4}{C_2 + C_{12}} \right],$$

$$U_N = \frac{(U_A + U_B + U_C)}{3} \cdot \frac{1 + p^2 L_T \frac{C_{12}^2/4}{C_2 + C_{12}}}{1 + p^2 L_T \left(\frac{C_1}{2} + \frac{C_{12}}{2} - \frac{C_{12}^2/4}{C_2 + C_{12}} \right)}.$$

Введя обозначение эквивалентной емкости $C_{\text{ЭКВ}} = \frac{C_1}{2} + \frac{C_{12}}{2} - \frac{C_{12}^2/4}{C_2 + C_{12}}$ и

эквивалентной частоты $\omega_{\text{ЭКВ}} = \frac{1}{\sqrt{L_T C_{\text{ЭКВ}}}}$,

$$U_N = \frac{(U_A + U_B + U_C)}{3} \cdot \left[1 - K_C \cdot \frac{p^2}{p^2 + \omega_{\text{ЭКВ}}^2} \right], \quad (3.11)$$

где $K_C = \frac{C_{\text{ЭКВ}} - \frac{C_{12}^2/4}{C_2 + C_{12}}}{C_{\text{ЭКВ}}}$ – коэффициент, определяемый через емкости.

При расчетах напряжений на нейтрали трансформатора с целью упрощения будем пользоваться предположением, что на первичную обмотку подается импульс напряжения прямоугольной формы. В реальных условиях волны набегают по воздушным линиям, и расчетную схему трансформатора следовало бы включать по правилу эквивалентной волны через волновое сопротивление провода на двойное напряжение волны. Однако, влияние волнового сопротивления первичной цепи на напряжение во вторичной настолько мало, что им можно полностью пренебречь [43]. Наличие защиты

(РВ или ОПН) со стороны высоковольтной обмотки позволяет предположить, что напряжение, подаваемое на обмотку трансформатора со стороны ВН, равно остающемуся напряжению на защитном аппарате. В тех случаях, когда форма фронта или длина волны имеет существенное значение, будут даваться соответствующие оговорки.

Если к высоковольтным обмотками (ВН) всех трех фаз А,В,С одновременно приложить импульс напряжения прямоугольной формы $U_A(t) = U_B(t) = U_C(t) = E$, то в операторной области $U_A = U_B = U_C = \frac{E}{p}$. Согласно [44] оригинал для (3.11) в этом случае будет

$$U_N = E \cdot [1 - K_C \cdot \cos \omega_{\text{ЭКВ}} t]. \quad (3.12)$$

Видно, что в случае одновременного воздействия напряжения прямоугольной формы на все три фазы первичной обмотки напряжение на разземленной нейтрали носит характер колебаний около напряжения E , а максимум напряжения на нейтрали будет при условии $\omega_{\text{ЭКВ}} t = \pi$, т.е. в момент $t = \frac{1}{2f_{\text{ЭКВ}}} = \frac{T_{\text{ЭКВ}}}{2}$. Величина максимума $U_N^{\text{МАКС}} = E(1 + K_C)$ несколько меньше удвоенного значения воздействующего на фазы высокой стороны напряжения.

При приложении напряжения к одной или нескольким фазам высоковольтной обмотки трансформатора на элементах схемы рис.3.4 появится начальное «емкостное» распределение напряжений и только вслед за мгновенным начальным емкостным распределением напряжения на нейтрали и во вторичной обмотке согласно (3.12) разовьются колебания. Долю начального емкостного напряжения на нейтрали можно получить при $t=0$ из (3.12) и она определится выражением

$$\frac{U_N^{\text{НАЧ}}}{E} = 1 - K_C.$$

При реальных параметрах емкостной схемы замещения силового трансформатора 110/10 кВ мощностью, например, 125 МВА можно получить

$U_N^{HAЧ} / E = 0.143$, для трансформатора 220/10 кВ мощностью 125 МВА
 $U_N^{HAЧ} / E = 0.065$.

В эксплуатации на высоковольтные обмотки трансформатора будут воздействовать не идеализированные напряжения прямоугольной формы, а грозовые волны, характеризуемые конечной длительностью фронта импульса τ_ϕ и условной длительностью импульса $\tau_{0.5}$ (длительность импульса до его «полуспада»). Так как реально $T_{ЭКВ} \gg \tau_\phi$, то длительность фронта воздействующих на обмотку грозовых волн практически не влияет на максимальное значение напряжений на нейтрали [42], а условная длительность импульса $\tau_{0.5}$ сопоставима с $T_{ЭКВ}$ и поэтому ее учет является принципиальным.

Пренебрегая фронтом импульса, будем считать, что одновременно на три фазы высокой стороны трансформатора воздействуют волны напряжения $U_A(t) = U_B(t) = U_C(t) = E \cdot \exp(-t/\tau_{имп})$, где $\tau_{имп}$ – постоянная времени импульса. Условная длительность такого импульса может быть найдена из условия $0.5E = E \cdot \exp(-\tau_{0.5}/\tau_{имп})$ и будет $\tau_{0.5} = \tau_{имп} \cdot \ln 2 \approx 0.69\tau_{имп}$.

При воздействии на высоковольтные обмотки импульса напряжения прямоугольной формы $U_A(t) = U_B(t) = U_C(t) = E$ напряжение на нейтрали достигает максимума в момент времени $t = \frac{T_{ЭКВ}}{2}$. Среднее значение экспоненциального импульса $E \cdot \exp(-t/\tau_{имп})$ для определения максимума перенапряжений на нейтрали во временном интервале $0 \leq t \leq \frac{T_{ЭКВ}}{2}$ можно оценить как

$$E \cdot \exp\left[-\frac{(T_{ЭКВ}/2)/2}{\tau_{имп}}\right] = E \cdot \exp\left[-\frac{T_{ЭКВ}}{4\tau_{имп}}\right].$$

Упрощенно заменив затухающий импульс импульсом постоянной амплитуды, найдем с использованием (3.12) максимальное значение напряжения на нейтрали

$$U_N = E \cdot (1 + K_C) \cdot \exp\left[-\frac{T_{ЭКВ}}{4\tau_{имп}}\right] \quad (3.13)$$

Из (3.13) видно, что при малых длительностях воздействующих на высокую сторону трансформатора волн $\tau_{0,5} = 0.69\tau_{имн}$ колебания напряжения на нейтрали не успеют развиться в полной мере, и максимальное напряжение на нейтрали будет невелико, а при больших длительностях падающих волн $\tau_{0,5}$ воздействующие на нейтраль перенапряжения могут быть значительны, достигая величин, несколько меньших $2E$.

Выражение (3.13) получено для случая воздействия волн напряжений одновременно на все три фазы ВН трансформатора. При воздействии только на одну из фаз высоковольтной обмотки трансформатора с разземленной нейтралью ток пораженной фазы, разветвляясь, проходит через непораженные фазы и далее по проводам ВЛ. Без существенной погрешности можно пренебречь волновыми сопротивлениями проводов ВЛ и считать непораженные фазы короткозамкнутыми на концах [43].

Если напряжение $U_A(t)$ приложено только к одной фазе трансформатора, то для получения оценок максимальных перенапряжений на нейтрали можно считать $U_B(t) = U_C(t) = 0$. Если напряжения $U_A(t) = U_B(t)$ приложены к двум фазам трансформатора, то можно упрощенно считать $U_C(t) = 0$. С учетом этого, выражение (3.11) примет вид

$$U_N = \frac{nU}{3} \cdot \left[1 - K_C \cdot \frac{p^2}{p^2 + \omega_{\text{ЭКВ}}^2} \right], \quad (3.14)$$

где n – число фаз трансформатора, к которым одновременно приложено напряжение $U = U(p)$.

Аналогично преобразованиям, выполненным при выводе (3.13), можно получить

$$U_N = \frac{nE}{3} \cdot (1 + K_C) \cdot \exp\left[-\frac{T_{\text{экв}}}{4\tau_{имн}}\right] \quad (3.15)$$

где n – число фаз трансформатора, к которым одновременно приложено напряжение $U(t) = E \cdot \exp(-t/\tau_{имн})$.

Из (3.15) видно, что наибольшие перенапряжения на нейтрали трансформатора будут при воздействии грозовых волн одновременно на три фазы высоковольтной обмотки трансформатора, а минимальные перенапряжения – при воздействии лишь на одну фазу.

Для трансформатора 110/10 кВ 125 МВА по (3.15):

$$U_N = \frac{nE}{3} \cdot [1 + (1 - 0.143)] \cdot \exp\left[-\frac{T_{экв}}{4\tau_{имп}}\right] = 0.619nE \cdot \exp\left[-\frac{T_{экв}}{4\tau_{имп}}\right] \quad (3.16,а)$$

Для трансформатора 220/10 кВ 125 МВА по (3.15):

$$U_N = \frac{nE}{3} \cdot [1 + (1 - 0.065)] \cdot \exp\left[-\frac{T_{экв}}{4\tau_{имп}}\right] = 0.645nE \cdot \exp\left[-\frac{T_{экв}}{4\tau_{имп}}\right] \quad (3.16,б)$$

Для сравнения выражений (3.16) с литературными данными отметим, что исследования [42] обобщаются приведенной в [11] формулой (способов определения $T_{экв}$ в [11] не приведено)

$$U_N = 0.6nE \cdot \left[1 - \exp\left(-\frac{4\tau_{0.5}}{T_{экв}}\right)\right]. \quad (3.17)$$

Формулы (3.16) и (3.17) похожи по структуре и дают близкие результаты, что показано на рис.3.5-3.6, на которых представлены результаты расчетов по формулам (3.16) и (3.17) с использованием соотношения $\tau_{0.5} = 0.69\tau_{имп}$ амплитуд перенапряжений на разземленной нейтрали трансформаторов 110/10 и 220/10 кВ одной и той же номинальной мощности 125 МВА. В качестве E принято типовое значение остающегося на ОПН (стороны ВН) напряжения при амплитуде тока 10 кА: для 110 кВ $E = U_{10кА} = 250$ кВ, для 220 кВ $E = U_{10кА} = 500$ кВ. Так как грозовые токи в подстанционных ОПН 110-220 кВ (стороны ВН), как правило, меньше 10 кА, то получим незаниженные оценки перенапряжений на нейтрали. Кроме того, на рис.3.5-3.6 нанесены испытательные напряжения изоляции нейтрали [12], приведенные в табл.3.1.

Указанное в табл.3.1 в скобках допустимое для изоляции трансформатора значение максимального напряжения грозового импульса получено в соответствии с выражением (1.1).

Таблица 3.1. Испытательное напряжение $U_{исп}$ полного грозового импульса для изоляции нейтрали согласно [12].

U _{ном} , кВ	испытательное (допустимое) напряжение нейтрали, кВ	
	полная	облегченная
110	480 (470)	200
220	750 (705)	400

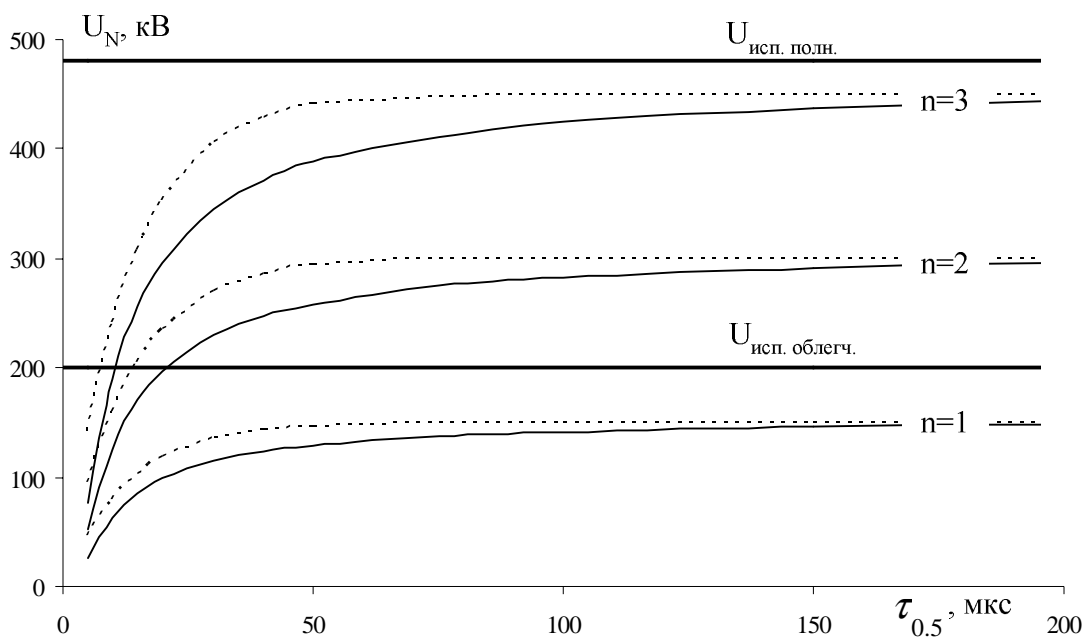


Рис.3.5. Амплитуда перенапряжений на разземленной нейтрали силового двухобмоточного трансформатора 110/10 кВ, S=125 МВА (согласно (3.16,а) – сплошная линия, согласно (3.17) – пунктир) в зависимости от условной длительности импульса $\tau_{0,5}$ и числа фаз n (вторичная обмотка ненагружена, $E = 250$ кВ).

Из рис.3.5 видно, что при всех реально возможных длительностях $\tau_{0,5}$ воздействующих на силовой трансформатор 110 кВ волн грозовых перенапряжений амплитуда напряжений на разземленной нейтрали не превосходит испытательного напряжения нейтрали в случае, если ее изоляция полная (как у линейной обмотки трансформатора).

Имеющийся согласно рис.3.5 запас между максимальными грозовыми перенапряжениями на изоляции нейтрали и ее полными испытательными напряжениями позволяет предположить, что защита от грозовых перенапряжений полной изоляции разземленных нейтралей силовых

трансформаторов 110 кВ не требуется. Этот вывод получен для случая, когда высоковольтная обмотка трансформатора защищена современными ОПН 110 кВ и без учета числа воздействующих на изоляцию разземленной нейтрали грозových перенапряжений [42]. В случае защиты высоковольтной обмотки вентильными разрядниками РВС-110 и РВМГ-110 кВ величина E будет больше, чем для ОПН, а значит и расчетные перенапряжения на изоляции нейтрали возрастут и заведомо потребуют ограничения, так же как и в случае, если изоляция разземленной нейтрали облегченная.

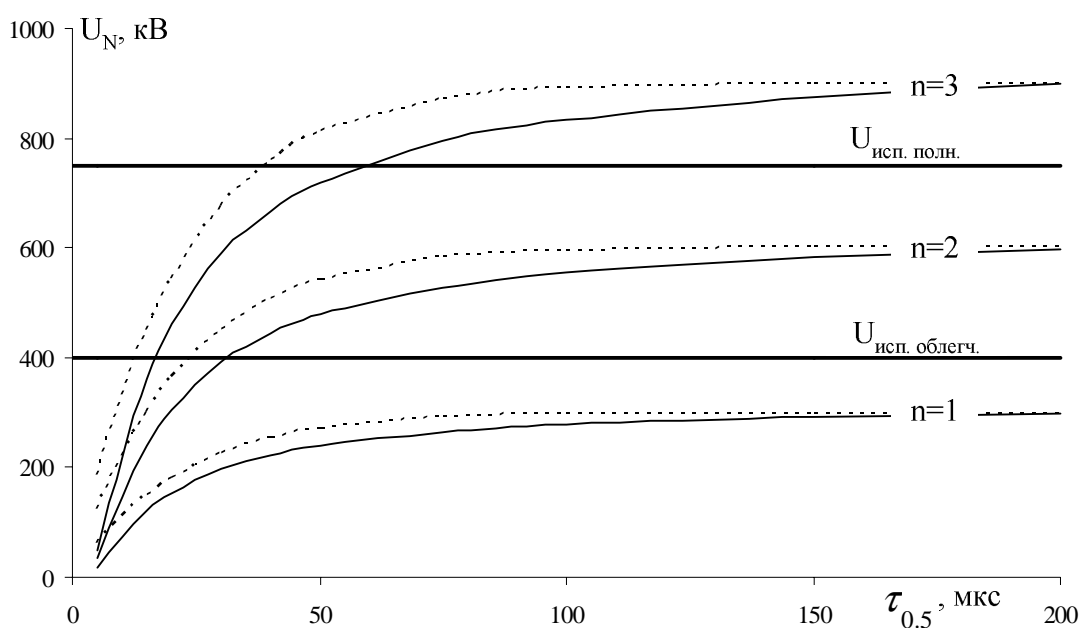


Рис.3.6. Амплитуда перенапряжений на разземленной нейтрали силового двухобмоточного трансформатора 220/10 кВ, $S=125$ МВА (согласно (3.16,б) – сплошная линия, согласно (3.17) – пунктир) в зависимости от условной длительности импульса $\tau_{0,5}$ и числа фаз n (вторичная обмотка ненагружена, $E = 500$ кВ).

На рис.3.6 показано, что разземленная нейтраль силовых трансформаторов 220 кВ требует защиты от грозových перенапряжений во всех случаях (и полная изоляция, и облегченная).

На подстанциях 110-220 кВ, как правило, установлено два силовых трансформатора, работающих параллельно, а нейтраль разземляется только у одного из них, что обеспечивает грозových перенапряжения на изоляции разземленной нейтрали с максимальными значениями, меньшими указанных на рис.3.5-3.6.

3.3. Защита изоляции нейтрали с помощью ОПН-Н

Пусть в разземленной нейтрали силового трансформатора установлен защитный ОПН-Н, который для простоты будем моделировать источником постоянного напряжения $U_{\text{ОПН-Н}}$ (внутреннее сопротивление источника принято равным нулю). Тогда в схеме рис.3.4 емкость $3C_1/2$ при сделанных допущениях оказывается включенной на неизменное напряжение и, следовательно, может не учитываться. Уравнение (3.10) примет простой вид

$$U_N = U_{\text{ОПН-Н}}.$$

Ток в ОПН-Н

$$I_{\text{ОПН-Н}} = I_A + I_B + I_C + \frac{pC_{12}}{2}(U_a + U_b + U_c - 3U_N) \quad (3.18)$$

Сложив уравнения (3.1), (3.2), (3.3), получим после преобразований:

$$I_A + I_B + I_C = \frac{U_A + U_B + U_C - 3U_N}{pL_T}.$$

Сложив уравнения (3.7), (3.8), (3.9); после преобразований:

$$U_a + U_b + U_c = (U_A + U_B + U_C + 3U_N) \frac{C_{12}/2}{C_2 + C_{12}}.$$

Подставим в (3.18) $U_N = U_{\text{ОПН-Н}}$ и два последних равенства, получим

$$I_{\text{ОПН-Н}} = (U_A + U_B + U_C) \left(\frac{1}{pL_T} + \frac{pC_{12}^2/4}{C_2 + C_{12}} \right) - 3U_{\text{ОПН-Н}} \left(\frac{1}{pL_T} + \frac{pC_{12}(C_2 + C_{12}/2)}{2(C_2 + C_{12})} \right). \quad (3.19)$$

Наибольшие перенапряжения в нейтрали имеют место при воздействии одновременно на три фазы высокой стороны трансформатора, и поэтому максимальной токовой нагрузки на ОПН следует ожидать именно в этом случае, который и рассмотрим.

Можно показать, что в выражении (3.19) «емкостные» составляющие тока ОПН-Н пренебрежимо малы, по сравнению с «индуктивными». Тогда в случае воздействия на трансформатор волн напряжения $U_A(t) = U_B(t) = U_C(t) = E \cdot \exp(-t/\tau_{\text{умн}}) = E \cdot \exp(-\alpha \cdot t)$ получим, упрощенно считая $U_{\text{ОПН-Н}}(t) = \text{const}$, приближенное выражение для тока в ОПН-Н

$$I_{\text{ОПН-Н}} = \frac{3E}{pL_T(p + \alpha)} - \frac{3U_{\text{ОПН-Н}}}{p^2 L_T},$$

оригинал которого

$$I_{\text{ОПН-Н}}(t) = \frac{3E\tau_{\text{умн}}}{L_T} \cdot [1 - \exp(-t/\tau_{\text{умн}})] - \frac{3U_{\text{ОПН-Н}}}{L_T} t. \quad (3.20)$$

Выражение (3.20) корректно при условии $I_{\text{ОПН-Н}}(t) \geq 0$, в противном случае моделирующий ОПН-Н источник постоянного напряжения $U_{\text{ОПН-Н}}$ будет не поглощать, а выдавать энергию, что неверно.

Решив уравнение $\frac{dI_{\text{ОПН-Н}}(t)}{dt} = 0$, определим момент наступления максимума тока в ОПН-Н

$$t_{\text{МАКС}} = \tau_{\text{умн}} \cdot \ln \frac{E}{U_{\text{ОПН-Н}}}. \quad (3.21)$$

Подставив (3.21) в (3.20) получим формулу для определения амплитуды тока в ОПН-Н

$$I_{\text{ОПН-Н}}^{\text{МАКС}} = \frac{3\tau_{\text{умн}}}{L_T} \left[E - U_{\text{ОПН-Н}} \left(1 + \ln \frac{E}{U_{\text{ОПН-Н}}} \right) \right]. \quad (3.22)$$

Из (3.22) видно, что чем длиннее воздействующие на фазы трансформатора волны и мощнее трансформатор, тем больше при прочих равных условиях будет амплитуда тока в ОПН-Н. При сделанных допущениях импульс тока в ОПН-Н имеет вид, показанный рис.3.7.

При падении на высоковольтную обмотку волн по одной или двум фазам ОПН-Н в нейтрали будет частично шунтирован «свободными» фазами и поэтому токовые нагрузки будут меньше, чем по формулам (3.20) и (3.22).

На рис.3.8-3.9 представлены результаты расчетов по формуле (3.22) (при $n = 3$) амплитуд импульсных токов в ОПН-Н разземленной нейтрали трансформаторов 110/10 и 220/10 кВ одной и той же номинальной мощности 125 МВА, а также показан теоретически максимально возможный расчетный ток в ОПН-Н (в случае $U_{\text{ОПН-Н}} \rightarrow 0$).

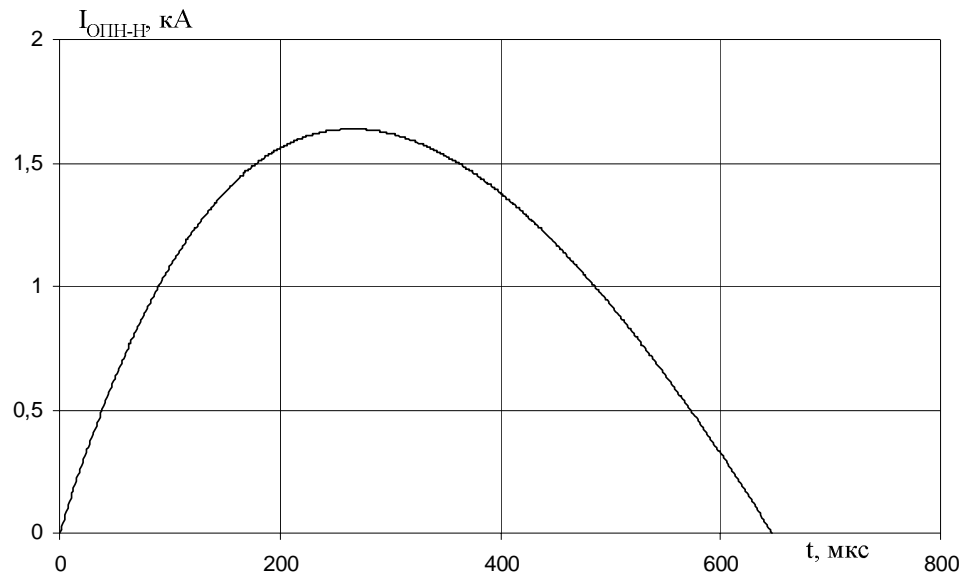


Рис.3.7. Импульс тока в ОПН-Н согласно выражению (3.20) при $E = 250$ кВ, $U_{\text{ОПН-Н}} = 100$ кВ, $\tau_{\text{умп}} = 290$ мкс ($\tau_{0,5} = 200$ мкс), $L_T = 0.031$ Гн, $n = 3$, $I_{\text{ОПН-Н}}(t) \geq 0$.

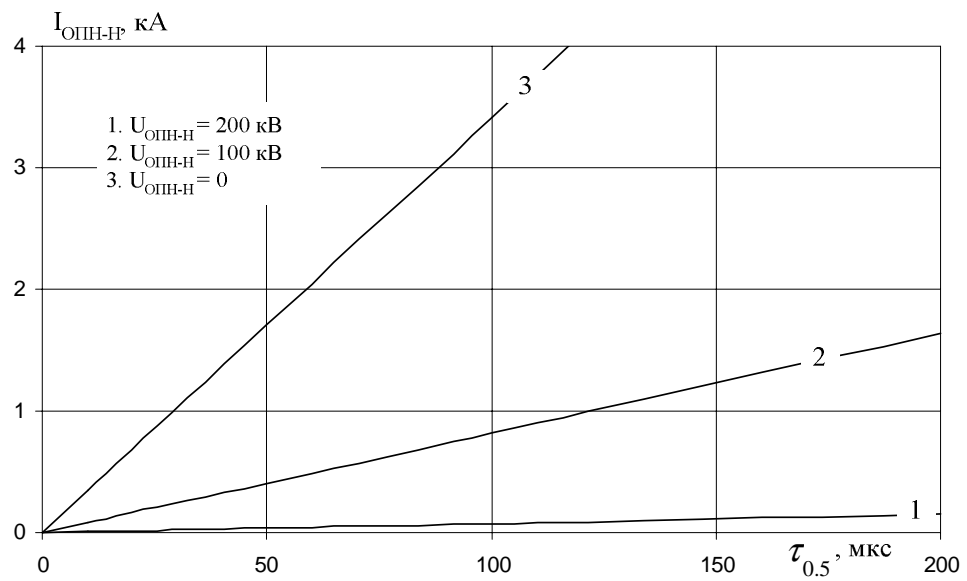


Рис.3.8. Амплитуда тока ОПН-Н, установленного в разземленной нейтрали силового двухобмоточного трансформатора (110/10 кВ, $S=125$ МВА $L_T = 0.031$ Гн), согласно (3.22) в зависимости от условной длительности импульса $\tau_{0,5}$ и остающегося напряжения ОПН-Н (принято $n = 3$, $E = 250$ кВ, вторичная обмотка ненагружена).

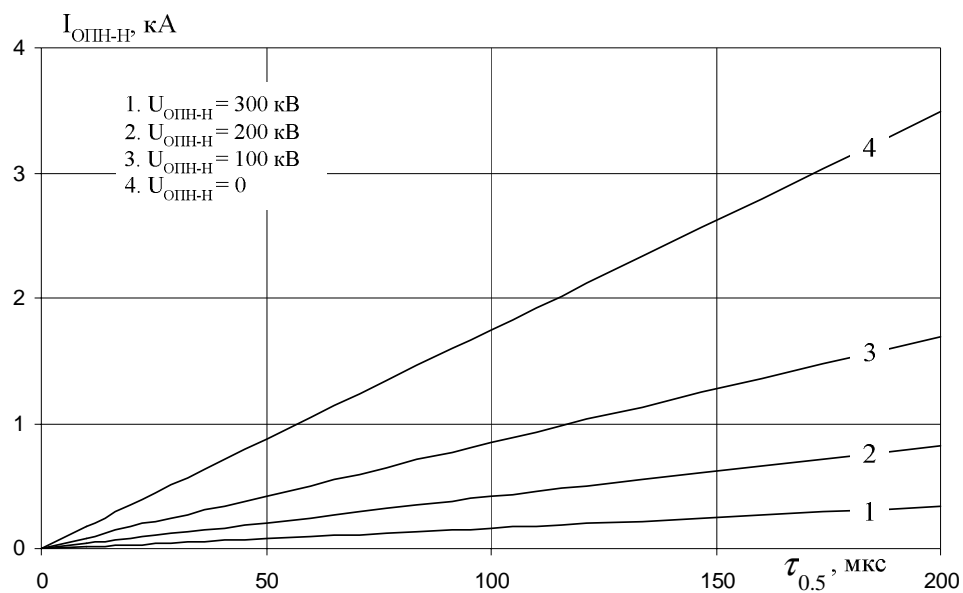


Рис.3.9. Амплитуда тока ОПН-Н, установленного в разземленной нейтрали силового двухобмоточного трансформатора (220/10 кВ, $S=125 \text{ МВА}$ $L_T = 0.123 \text{ Гн}$), согласно (3.22) в зависимости от условной длительности импульса $\tau_{0.5}$ и остающегося напряжения ОПН-Н (принято $n = 3$, $E = 500 \text{ кВ}$, вторичная обмотка ненагружена).

3.4. Внутренние перенапряжения на изоляции нейтрали

Помимо грозовых перенапряжений на изоляцию разземленной нейтрали силовых трансформаторов 110-220 кВ могут воздействовать коммутационные перенапряжения и напряжение промышленной частоты. Расчеты коммутационных перенапряжений в разземленной нейтрали свидетельствуют о том, что они не являются определяющими при выборе характеристик ОПН-Н, тогда как учет напряжения промышленной частоты при выборе ОПН-Н является принципиальным.

Напряжение промышленной частоты может возникать на изоляции разземленной нейтрали лишь при несимметрии во внешней сети, различные виды которой можно условно разделить на продольную и поперечную.

3.4.1. Поперечная несимметрия

Определим напряжение на разземленной нейтрали в одном из основных расчетных случаев поперечной несимметрии – однофазном коротком замыкании на шинах ПС 110-220 кВ.

С использованием метода симметричных составляющих отношение токов при трехфазном и однофазном коротких замыканиях для некоторой точки сети можно получить в виде

$$\frac{I_K^{(3)}}{I_K^{(1)}} = \frac{Z_1 + Z_2 + Z_0}{3Z_1} = \frac{2Z_1 + Z_0}{3Z_1} = \frac{2}{3} + \frac{1}{3} \cdot \frac{Z_0}{Z_1}$$

или

$$m = \frac{Z_0}{Z_1} = \frac{3I_K^{(3)}}{I_K^{(1)}} - 2, \quad (3.23)$$

где Z_1 , Z_2 , Z_0 – суммарные сопротивления прямой, обратной (обычно $Z_2 = Z_1$) и нулевой последовательности относительно точки к.з.

По известным для данной ПС величинам токов однофазного и трехфазного короткого замыкания с помощью (3.23) можно определить число

$m = \frac{Z_0}{Z_1}$, которое вещественно при пренебрежении проводимостями и активными

сопротивлениями сети.

Величина напряжения, действующего на разземленную нейтраль трансформатора при к.з. непосредственно у выводов трансформатора, может быть определена из выражения

$$U_N = E_1 \frac{Z_0}{2Z_1 + Z_0} = E_1 \frac{m}{m+2}, \quad (3.24)$$

где E_1 – эквивалентная э.д.с. прямой последовательности в расчетной схеме.

Число m из (3.23) подставим в (3.24) и найдем напряжение на разземленной нейтрали (рис.3.10), которое следует использовать для выбора одной из точек характеристики «напряжение-время» ОПН-Н.

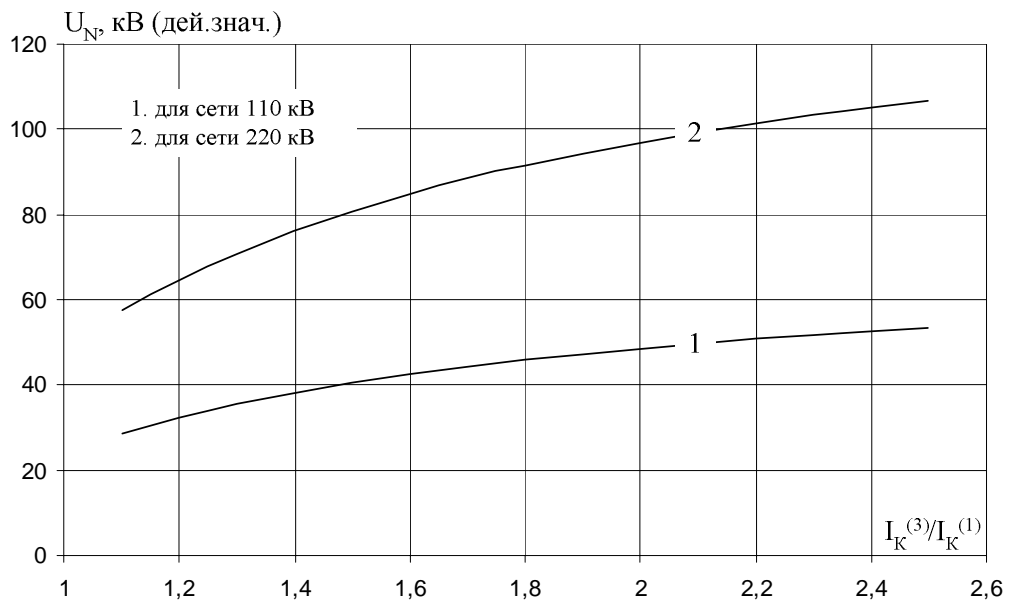


Рис.3.10. Зависимость действующего значения квазистационарного напряжения на нейтрали трансформаторов 110 и 220 кВ от соотношения величин токов короткого замыкания сети.

Для оценки максимального напряжения промышленной частоты по (3.24), которое может появиться на нейтрали в случае однофазного короткого замыкания в сети, следует найти максимальное значение коэффициента m для сетей 110-220 кВ.

Для рассмотренного случая однофазного короткого замыкания напряжение на неповрежденной фазе в месте повреждения:

$$|U_B| = \sqrt{3}E_1 \frac{\sqrt{m^2 + m + 1}}{m + 2}. \quad (3.25)$$

Согласно [3] сети 110-220 кВ выполняются с эффективно заземленной нейтралью; в таких сетях $\frac{U_B}{E_1} \leq 1.4$. Для этих сетей, используя (3.25), получим неравенство $m \leq 5.5$, на основе которого с использованием выражения (3.24) можно оценить максимально возможное напряжение промышленной частоты на нейтрали как

$$U_N = E_1 \frac{m}{m + 2} = E_1 \frac{5.5}{5.5 + 2} \leq 0.73 \cdot E_1,$$

откуда наибольшее возможное напряжение промышленной частоты (действующее значение) на разземленной нейтрали силовых трансформаторов 110-220 кВ при однофазном коротком замыкании в сети:

$$U_{N-110} = 0.73E_1 = 0.73 \cdot U_{np}^{ceму} / \sqrt{3} = 0.73 \cdot 126 / \sqrt{3} = 53 \text{ кВ},$$

$$U_{N-220} = 0.73 \cdot 252 / \sqrt{3} = 106 \text{ кВ}.$$

3.4.2. Продольная несимметрия

При продольной несимметрии, связанной со включением трансформатора одной фазой, напряжение на нейтрали трансформатора будет равно фазному напряжению питающей сети, т.е. $U_N = U_{np}^{ceму} / \sqrt{3}$, что больше, чем в рассмотренном ранее случае однофазного замыкания (поперечная несимметрия), когда максимальное напряжение на нейтрали не превосходило $U_N = 0.73 \cdot U_{np}^{ceму} / \sqrt{3}$.

В случае включения двумя фазами напряжение промышленной частоты на нейтрали будет равно половине фазного напряжения питающей сети $U_N = 0.5U_{np}^{ceму} / \sqrt{3}$.

3.5. Расчеты процессов в программном комплексе ЕМТР

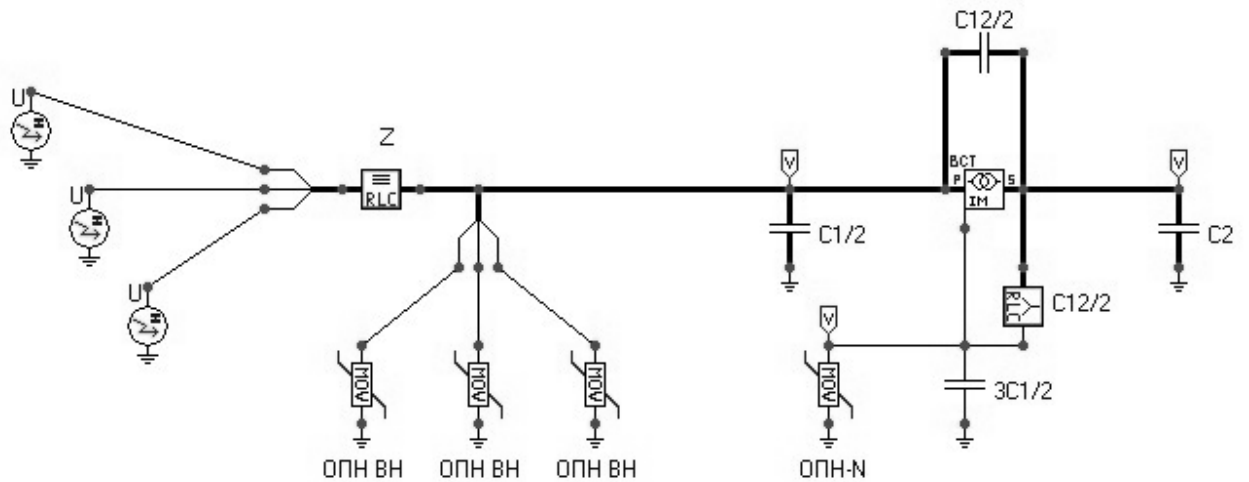


Рис.3.11. ЕМТР-схема для расчета грозовых перенапряжений на трехфазном двухобмоточном трансформаторе при соединении его обмоток "звезда-треугольник".

На рис.3.11 показаны: схема замещения трансформатора по рис.3.4; ОПН, установленные в каждую фазу стороны ВН трансформатора и в нейтраль; три импульсных источника грозовых волн с амплитудой E , подключаемых к трансформатору через сопротивление Z .

При упрощенном анализе перенапряжений в схеме рис.3.11 принимается $Z = 0$, т.е. источник импульсных напряжений подключается напрямую к трансформатору. При более полном анализе принимается $Z = 400$ Ом (собственное волновое сопротивление фазных проводов ВЛ 110-220 кВ), а амплитуда напряжения источника волн принимается по правилу эквивалентной волны равным $2E$.

Вольтамперные характеристики ОПН в схеме рис.3.11 задаются выражением $U = AI^\alpha$, где $\alpha = 0.08$, а параметр A определяется по одной точке характеристики $U_{10кА}$, соответствующей амплитуде тока в ОПН $I = 10$ кА.

Численные значения емкостей обмоток на землю C_1 и C_2 , а также емкости между обмотками C_{12} можно получить по эмпирическим выражениям [45,46] (S в кВА; $U_{ВН}$, $U_{НН}$ в кВ):

$$C_1 = 0.07 \frac{S^{0.35}}{U_{ВН}^{0.175}} \cdot 10^{-9} \text{ Ф}, \quad (3.26)$$

$$C_2 = 1.3 \frac{\sqrt{S}}{U_{HH} + 13 + 0.2\sqrt{S}} \cdot 10^{-9} \text{ Ф}, \quad (3.27)$$

$$C_{12} = \frac{\sqrt{S}}{U_{BH}} \cdot 10^{-9} \text{ Ф}. \quad (3.28)$$

Для проведения расчетов индуктивность трансформатора, приведенную к высокой стороне, можно определить как

$$L_T = \frac{u_k [\%]}{100} \cdot \frac{U_{BH}^2}{314S_{ном}}. \quad (3.29)$$

Результаты расчетов емкостей (3.26)-(3.28) и индуктивностей (3.29) двух силовых трансформаторов 110-220 кВ приведены в табл.3.2.

Таблица 3.2. Параметры схемы замещения трансформатора.

силовой трансф.	нФ				Гн	мкс
	C ₁	C ₂	C ₁₂	C _{ЭКВ}	L _T ^{*)}	T _{ЭКВ}
110/10кВ, 125МВА	1,81	4,905	3,214	2,224	0,031	52
220/10кВ, 125МВА	1,656	4,905	1,607	1,532	0,123	86

^{*)} – в расчеты заложено значение $u_k = 10\%$.

На рис.3.12-3.13 приведены полученные в схеме рис.3.11 расчетные осциллограммы напряжения на разземленной нейтрали силового трансформатора 110 кВ. Источник импульсного напряжения подключался одновременно к трем ($n = 3$) фазам стороны ВН трансформатора напрямую (т.е. при $Z = 0$). Амплитуда напряжения E импульсного источника условно принималась равной остающемуся напряжению типового ОПН 110 кВ при импульсном токе 8/20 мкс 10 кА, т.е. $E = U_{10кА} = 250$ кВ. Строго говоря, импульсные грозовые токи в ОПН 110 кВ имеют амплитуду (при удаленных от ПС ударах молнии в ВЛ) менее 10 кА и, как правило, не превосходят 5 кА, поэтому вернее было бы принять, например, $E = U_{5кА}$. Так как $U_{5кА}$ незначительно отличается от $U_{10кА}$, но «менее привычно», то $E = U_{10кА}$.

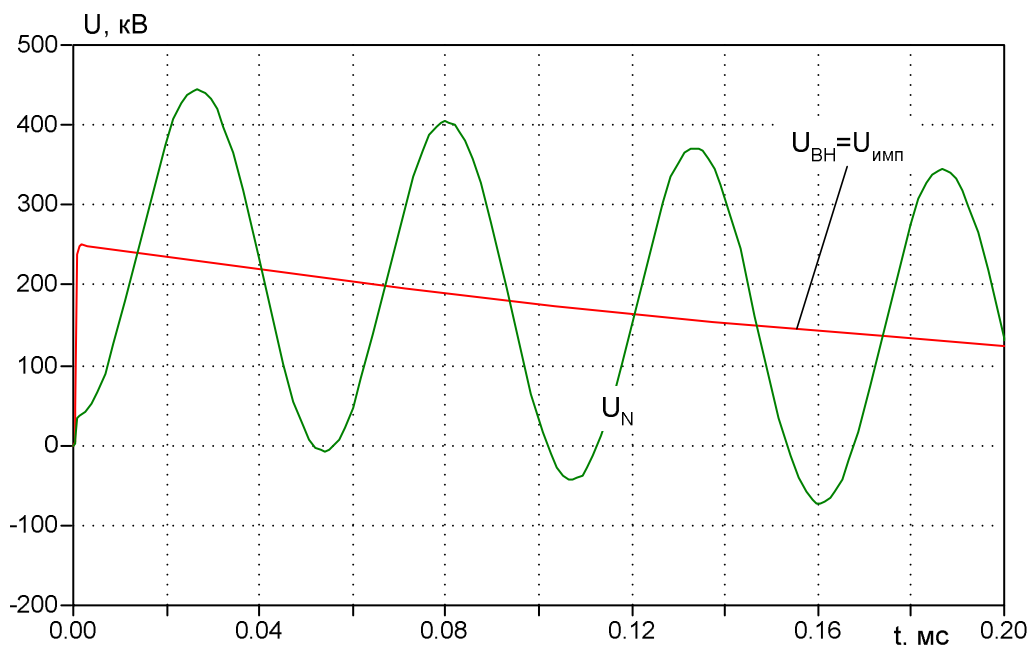


Рис.3.12. Напряжение на разземленной нейтрали силового трансформатора 110/10кВ, 125МВА при подключении к обмотке ВН импульсного источника $E = 250$ кВ, $1/200$ мкс ($\tau_{имп} = 290$ мкс, $n = 3$, вторичная обмотка ненагружена, ОПН-Н нет).

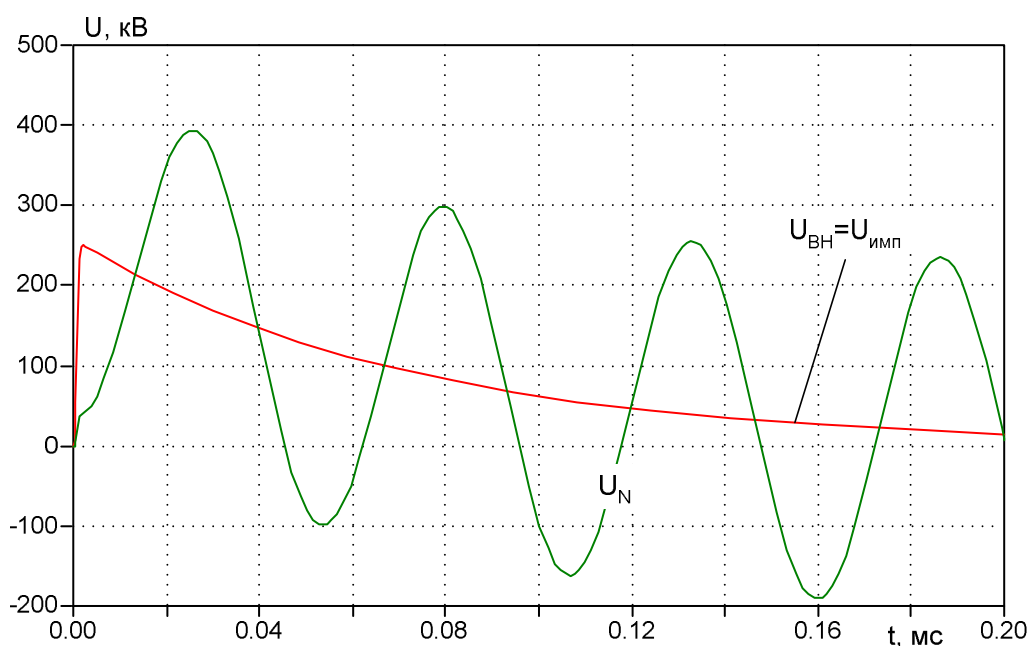


Рис.3.13. Напряжение на разземленной нейтрали силового трансформатора 110/10кВ, 125МВА при подключении к обмотке ВН импульсного источника $E = 250$ кВ, $1/50$ мкс ($\tau_{имп} = 72$ мкс, $n = 3$, вторичная обмотка ненагружена, ОПН-Н нет).

Сравнив рис.3.12 и рис.3.13, видно, что более длинная волна $\tau_{50\%} = 200$ мкс (рис.3.12) вызывает на разземленной нейтрали большие перенапряжения, чем сравнительно короткая волна $\tau_{50\%} = 50$ мкс (рис.3.13) – 450 кВ и 400 кВ

соответственно. Этот вывод был сделан ранее при анализе выражений (3.15)-(3.17). Само напряжение на нейтрали носит характер колебаний, период которых $T_{\text{ЭКВ}} = 52$ мкс совпадает с указанным в табл.3.2 значением. В первый момент времени на рис.3.12-3.13 напряжение на нейтрали претерпевает скачок, обусловленный начальным емкостным распределением напряжения.

На рис.3.14 приведены полученные в схеме рис.3.11 осциллограммы напряжений на разземленной нейтрали силового трансформатора 110 кВ. Источник импульсного напряжения подключался одновременно к одной ($n=1$), двум ($n=2$) или трем ($n=3$) фазам стороны ВН трансформатора через волновое сопротивление $Z=400$ Ом. При $n=1$ и $n=2$ свободные от воздействия импульсных волн фазы ВН трансформатора заземлялись через сопротивление $Z=400$ Ом. Амплитуда напряжения импульсного источника условно принималась равной удвоенной импульсной прочности линейной изоляции ВЛ 110 кВ, т.е. $E = 2 \cdot 750 = 1500$ кВ. Воздействие импульсных напряжений на фазы обмотки ВН ограничивалось ОПН-ВН, для которых $U_{10кА} = 250$ кВ.

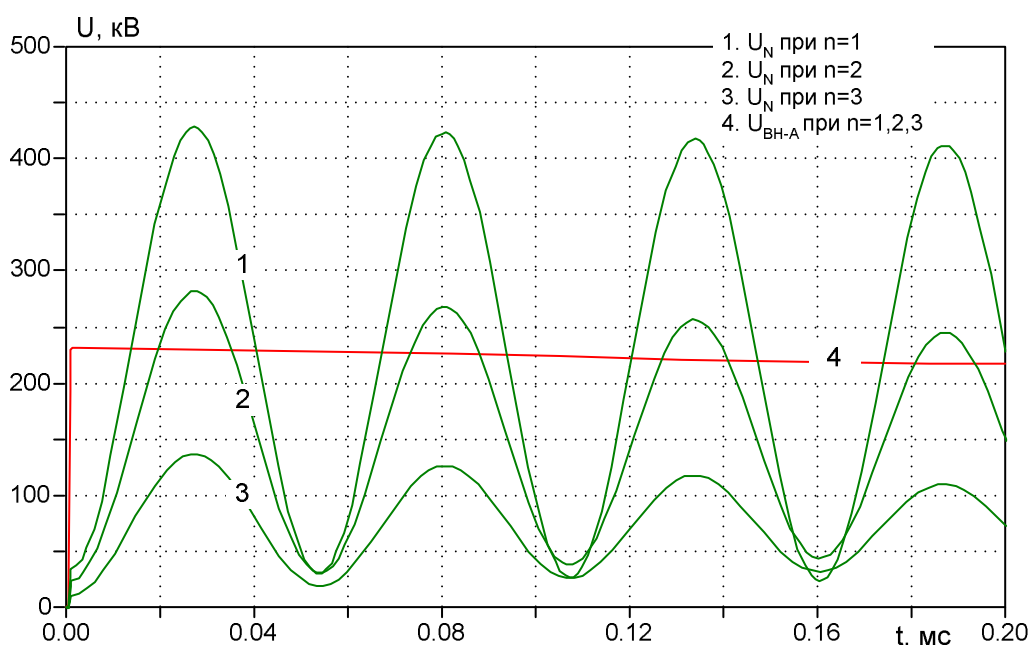


Рис.3.14. Напряжение на разземленной нейтрали силового трансформатора 110/10кВ, 125МВА при подключении к его обмотке ВН через волновое сопротивление источника импульсного напряжения $E = 2 \cdot 750$ кВ, $1/200$ мкс ($\tau_{\text{умн}} = 290$ мкс, $n = 1,2,3$, вторичная обмотка ненагружена, ОПН-Н нет).

На рис.3.14 показано, что воздействующее на изоляцию линейного вывода обмотки высокого напряжения (ВН) трансформатора напряжение $U_{ВН}$ оказалось менее $U_{10кА} = 250$ кВ, т.е. импульсный ток в ОПН-ВН действительно менее 10 кА. Кроме того, рис.3.14 иллюстрирует ранее полученный вывод о том, что максимальные перенапряжения на нейтрали пропорциональны n : при $n=1$ имеем $U_N^{макс} = 140$ кВ, при $n=2$ – $U_N^{макс} = 280$ кВ, при $n=3$ – $U_N^{макс} = 420$ кВ.

При максимально возможной скорости распространения электромагнитной волны вдоль проводов ВЛ $v=300$ м/мкс волна условной длительностью $\tau_{0,5} = 200$ мкс будет занимать 60 км длины ВЛ, однако, как правило, длины ВЛ 110-220 км не превосходят 50-100 км, и, поэтому воздействие столь длинных грозových набегающих на ПС волн маловероятно. Кроме того, маловероятно, что волны высокой (близкой к импульсной прочности изоляции ВЛ) амплитуды распространяются одновременно по трем фазам ВЛ, не приведя к перекрытию хотя бы одной из них. Перекрытие же будет означать не тяжелый $n=3$, а более легкий расчетный случай $n=2$ или даже $n=1$. Поэтому рассмотренный на рис.3.14 случай $E=1500$ кВ, $\tau_{0,5} = 200$ мкс и $n=3$ практически маловероятен. Но даже в этом случае перенапряжения на разземленной нейтрали силового трансформатора 110 кВ в самой неблагоприятной «тупиковой» схеме ПС меньше испытательного импульсного грозowego напряжения нейтрали (480 кВ) и допустимого напряжения полного грозowego импульса (470 кВ). Поэтому установка ОПН в разземляемую нейтраль силовых трансформаторов 110 кВ для защиты изоляции нейтрали (выполненной с полной изоляцией) от грозowych перенапряжений, по всей видимости, не требуется (в случае защиты стороны ВН трансформатора современными ОПН).

Рис.3.15 получен для трансформатора 220 кВ при напряжении импульсного источника $E = 2 \cdot 1250 = 2500$ кВ (импульсная прочность ВЛ 220 кВ принята равной 1250 кВ) и $U_{10кА} = 500$ кВ для ОПН-ВН.

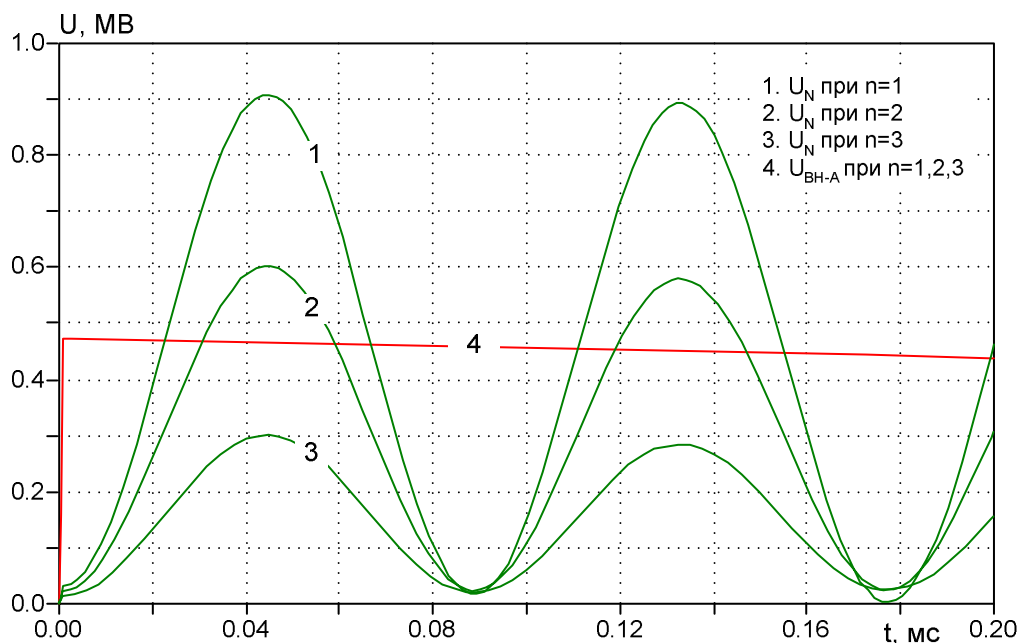


Рис.3.15. Напряжение на разземленной нейтрали силового трансформатора 220/10кВ, 125МВА при подключении к его обмотке ВН через волновое сопротивление источника импульсного напряжения $E = 2 \cdot 1250$ кВ, 1/200 мкс ($\tau_{имп} = 290$ мкс, $n = 1, 2, 3$, вторичная обмотка ненагружена, ОПН-Н нет).

На рис.3.15 показано, что перенапряжения на разземленной нейтрали трансформатора 220 кВ превышают допустимые (см. табл.3.1) и требуется установка в нейтраль защитного аппарата ОПН-Н.

При установке ОПН-Н в разземленную нейтраль напряжение на ней при воздействии грозových волн на обмотку ВН перестает носить колебательный характер; нейтраль в этом случае имеет резистивное заземление (роль нелинейного резистора играет ОПН-Н). Это показано на рис.3.16, где для трансформатора 110/10 кВ 125 МВА при наличии в его нейтрали ОПН-Н приведены осциллограммы напряжений в узлах схемы рис.3.11. На рис.3.16 показаны: напряжение источника импульсного напряжения (для удобства масштабирования напряжение источника ограничено величиной 750 кВ, вместо необходимых 1500 кВ), напряжение на стороне ВН (на ОПН-ВН), напряжение на нейтрали (на ОПН-Н).

На рис.3.17 в условиях рис.3.16 показаны токи в ОПН-ВН и ОПН-Н. Полученный в полной схеме с учетом реальных вольтамперных характеристик

защитных аппаратов ток в ОПН-Н отличается от рис.3.7, полученного ранее по упрощенным формулам для аналогичного случая (он приблизительно в 2 раза больше, чем на рис.3.7).

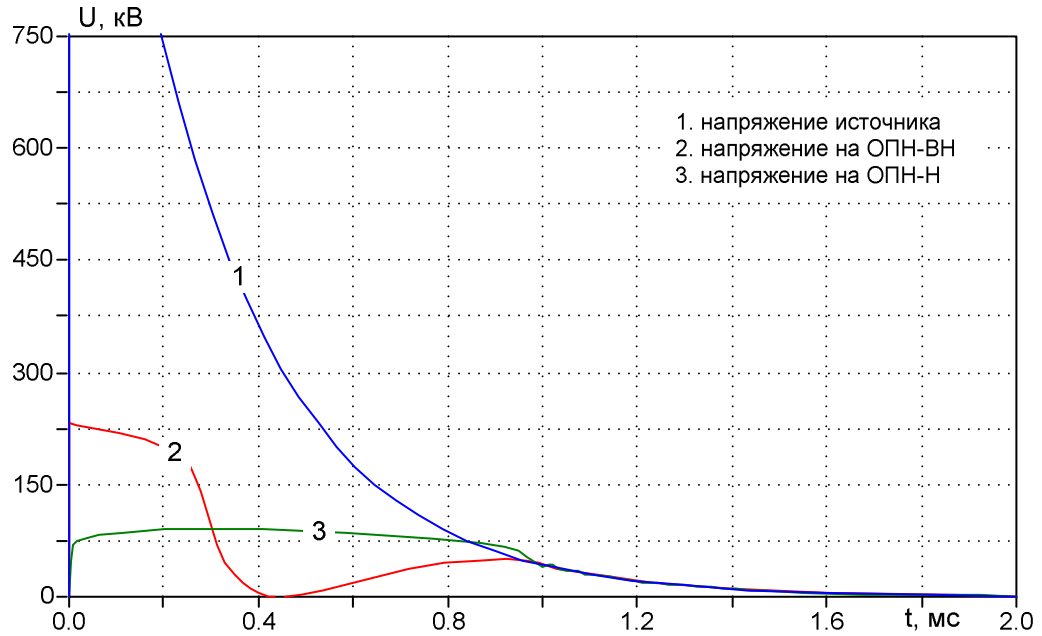


Рис.3.16. Напряжения в узлах схемы рис.3.11 при установке ОПН-Н ($U_{10кВ} = 100$ кВ) в разземленную нейтраль трансформатора 110/10 кВ 125 МВА. Схема включается через волновое сопротивление 400 Ом на волну напряжения $E = 2 \cdot 750$ кВ, $\tau_{имп} = 290$ мкс ($\tau_{0,5} = 200$ мкс), $n = 3$.

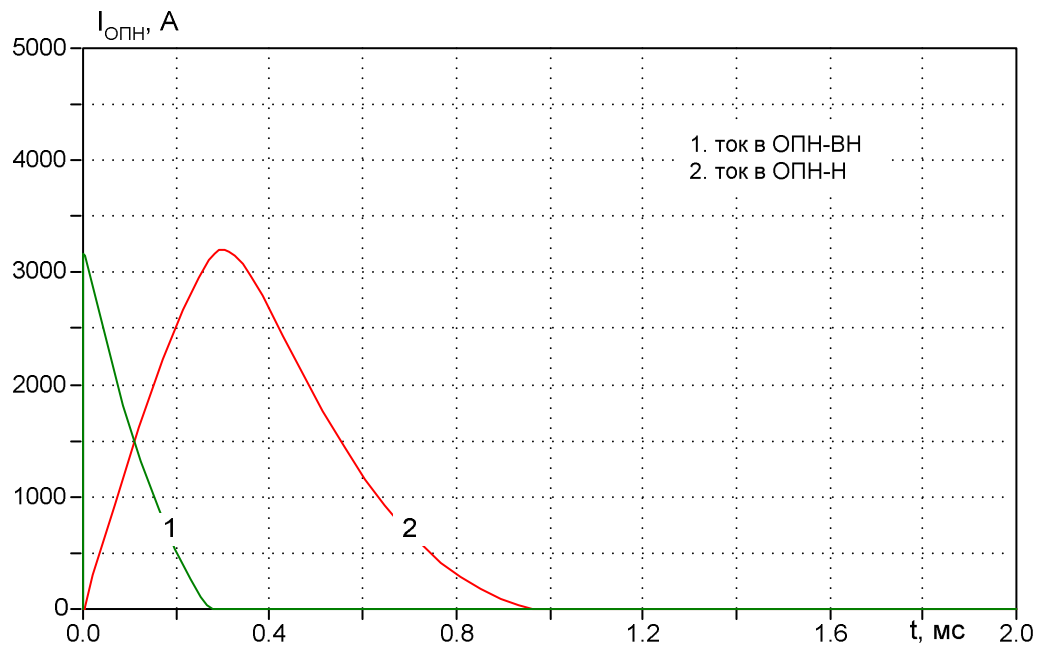


Рис.3.17. Токи в ОПН-ВН и ОПН-Н в условиях рис.3.16.

Длительность протекания импульсов тока в ОПН-Н на рис.3.17 (или на рис.3.7) высока и в несколько раз превосходит условную длительность $\tau_{0.5}$ воздействующей на трансформатор эквивалентной волны напряжения, что можно объяснить тем, что ОПН-Н имеет достаточно низкую вольтамперную характеристику, а экспоненциальный импульс дает заметные воздействия на трансформатор напряжения даже при $t > \tau_{0.5}$.

В задачах грозозащиты при моделировании волн грозовых перенапряжений основное внимание уделяется их амплитуде и форме фронта, а форма грозовых волн при $t > \tau_{0.5}$ в типовых задачах грозозащиты не имеет особого значения и малоизученна. Поэтому корректность моделирования формы импульсов грозовых перенапряжений при $t > \tau_{0.5}$ с помощью медленно спадающей экспоненциальной функции вызывает сомнение и, соответственно, осторожно следует относиться к получаемым здесь временным параметрам грозовых токов в ОПН-Н.

Ток в ОПН-Н определяется при заданных воздействующих на обмотку ВН грозовых волнах разностью остающихся напряжений ОПН-ВН и ОПН-Н и падением напряжения на индуктивности трансформатора от импульсного тока в ОПН-Н. При варьировании величины $U_{10кВ}$ у ОПН-Н это показано на рис.3.18-3.20 для трансформатора 110 кВ и на рис.3.21-3.23 для трансформатора 220 кВ.

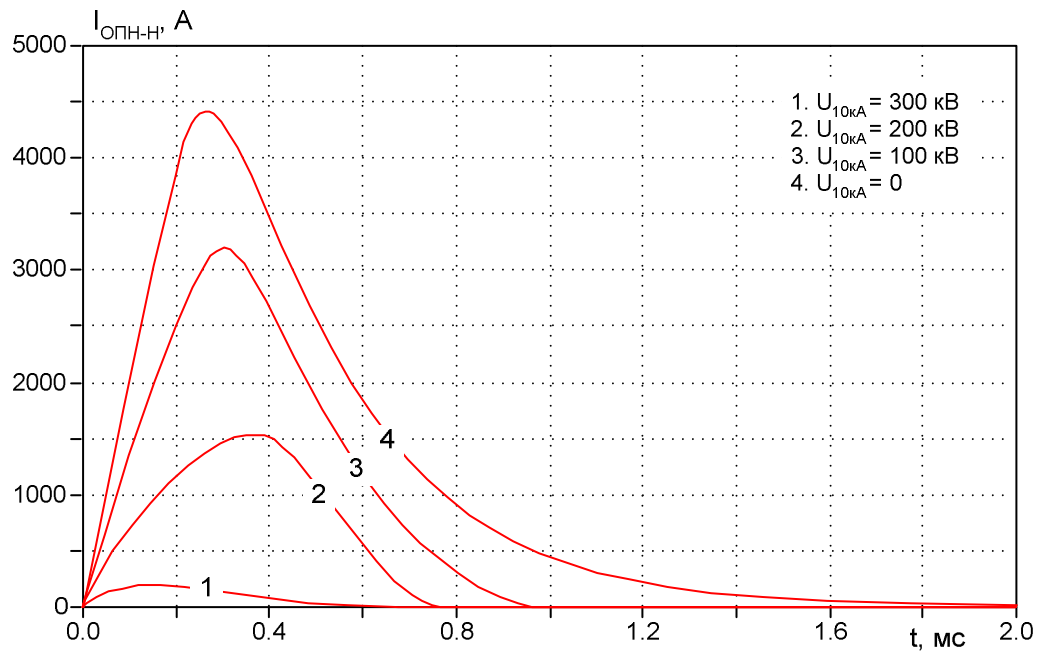


Рис.3.18. Ток ОПН-Н в нейтрали трансформатора 110 кВ в зависимости от его ВАХ. Условия рис.3.14 при $n = 3$.

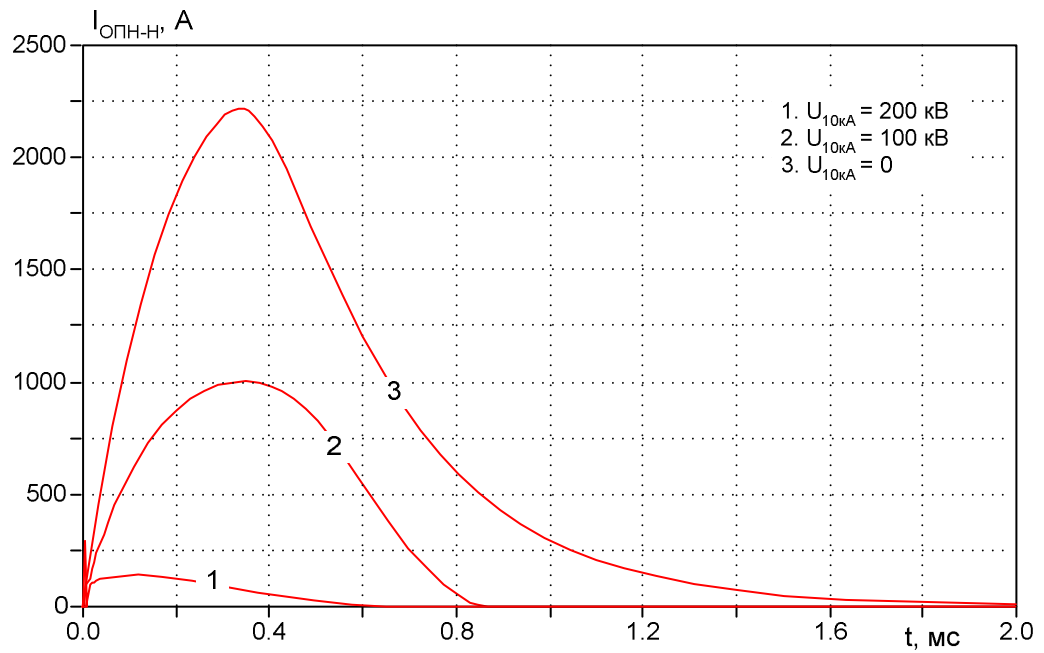


Рис.3.19. Ток ОПН-Н в нейтрали трансформатора 110 кВ в зависимости от его ВАХ. Условия рис.3.14 при $n = 2$.

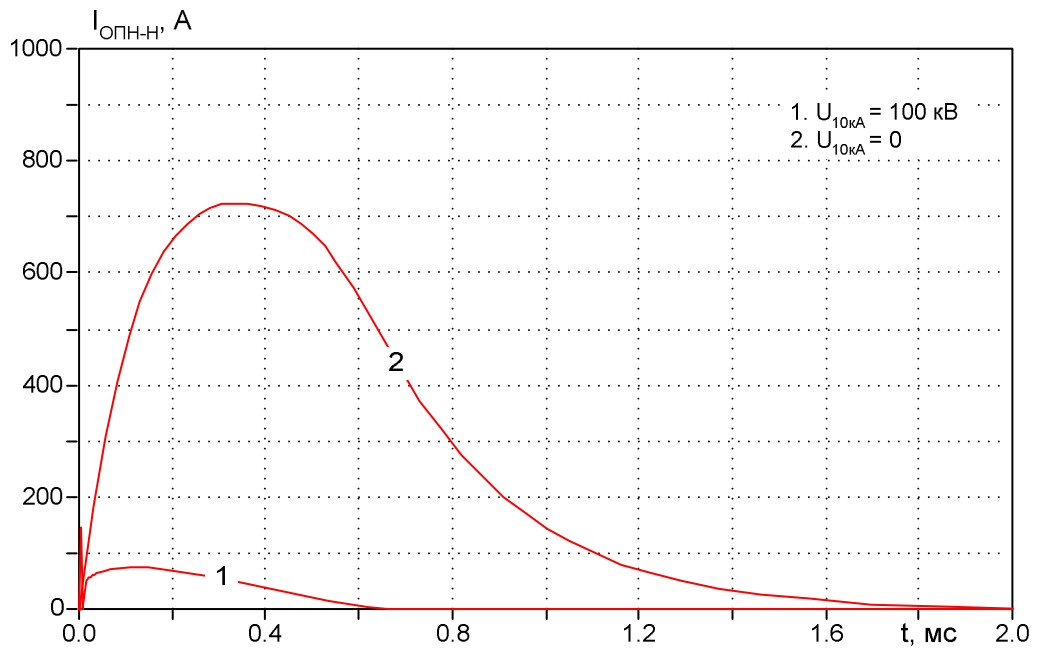


Рис.3.20. Ток ОПН-Н в нейтрали трансформатора 110 кВ в зависимости от его ВАХ. Условия рис.3.14 при $n = 1$.

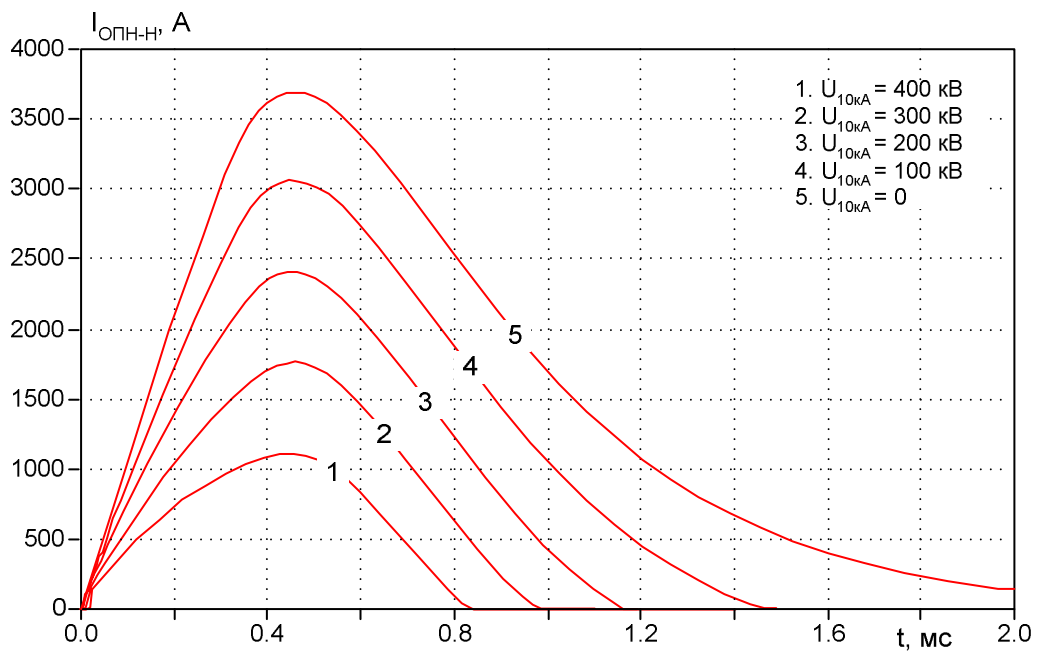


Рис.3.21. Ток ОПН-Н в нейтрали трансформатора 220 кВ в зависимости от его ВАХ. Условия рис.3.15 при $n = 3$.

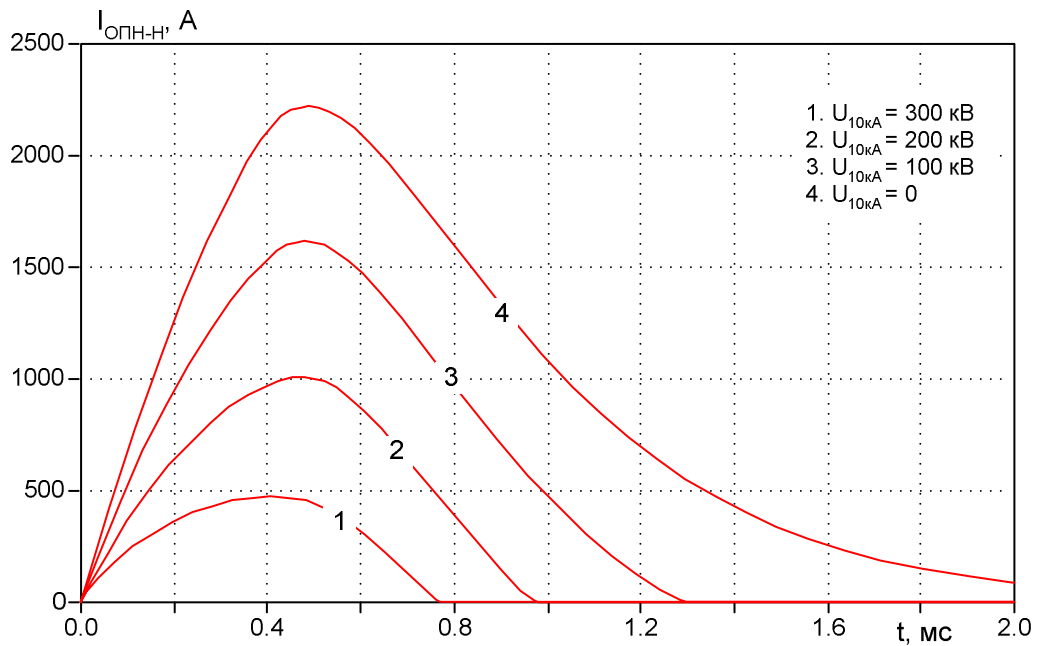


Рис.3.22. Ток ОПН-Н в нейтрали трансформатора 220 кВ в зависимости от его ВАХ. Условия рис.3.15 при $n = 2$.

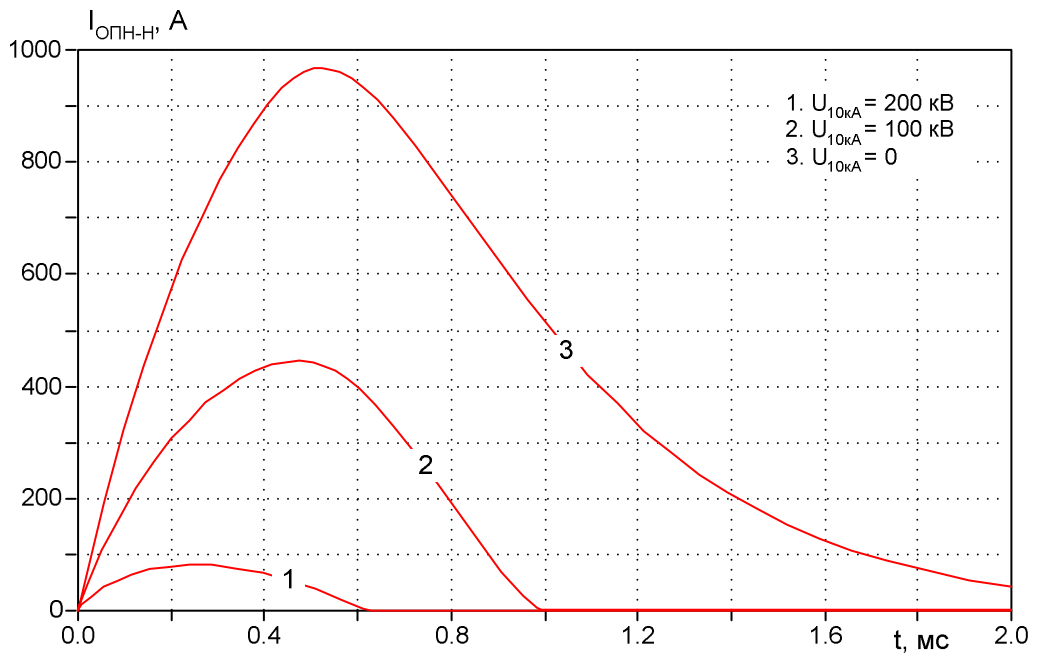


Рис.3.23. Ток ОПН-Н в нейтрали трансформатора 220 кВ в зависимости от его ВАХ. Условия рис.3.15 при $n = 1$.

На рис.3.18-3.23 показано, что в случае воздействия на обмотку ВН трансформаторов 110-220 кВ полных грозовых волн большой длительности токи в ОПН-Н так же могут быть большой длительности, соответствующей временным параметрам испытательных коммутационных импульсов ОПН. Поэтому для оценки опасности грозовых токовых воздействий на ОПН-Н

максимальные значения импульсов тока в ОПН-Н по рис.3.18-3.23 можно сравнивать с токами пропускной способности ОПН на прямоугольных импульсах 2000 мкс (2 мс). Так как грозовые токи в ОПН-Н все же короче 2 мс, то более полную оценку грозовых воздействий на ОПН-Н правильнее провести по выделяющимся в этих аппаратах энергиям.

Самые большие токовые нагрузки на ОПН-Н, при прочих равных, возникают в случае $n = 3$, для которого на рис.3.24 приведены полученные в схеме рис.3.11 согласно выражению (1.7) выделяющиеся в ОПН-Н энергии.

Приняв кратность ограничения грозовых перенапряжений в сетях 110-220 кВ с помощью современных ОПН равной $K_{гроз} = 2.2$ (в месте установки аппарата), получим по известному $U_{10кВ}$ действующее значение наибольшего рабочего напряжения ОПН-Н $U_{пр}^{ОПН} = U_{10кВ} / (K_{гроз} \sqrt{2})$, с использованием которого на основе рис.3.24 определим удельную энергию $W_{уд} = W / U_{пр}^{ОПН}$ (см. рис.3.25).

С помощью рис.3.25 по известному наибольшему рабочему напряжению предполагаемого к установке ОПН-Н можно определить, какая удельная энергия (диаметр варисторов) потребуется для этого ОПН-Н, чтобы он не повредился при самом тяжелом грозовом воздействии. Временные параметры токов в ОПН-Н при тяжелых грозовых воздействиях близки к 2 мс, поэтому полученные грозовые удельные энергии рис.3.25 можно считать требуемыми энергоемкостями варисторов ОПН-Н при воздействии импульсов пропускной способности ОПН (прямоугольные импульсы длительностью 2мс).

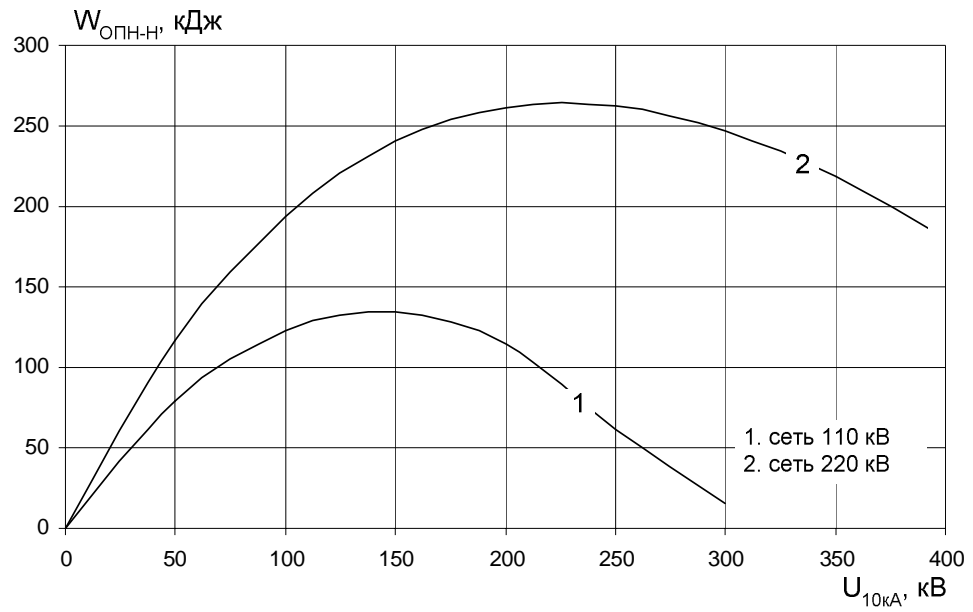


Рис.3.24. Выделяющиеся в ОПН-Н энергии в зависимости от ВАХ ОПН-Н. Условия рис.3.14 (сеть 110 кВ) и рис.3.15 (сеть 220 кВ); случай $n = 3$.

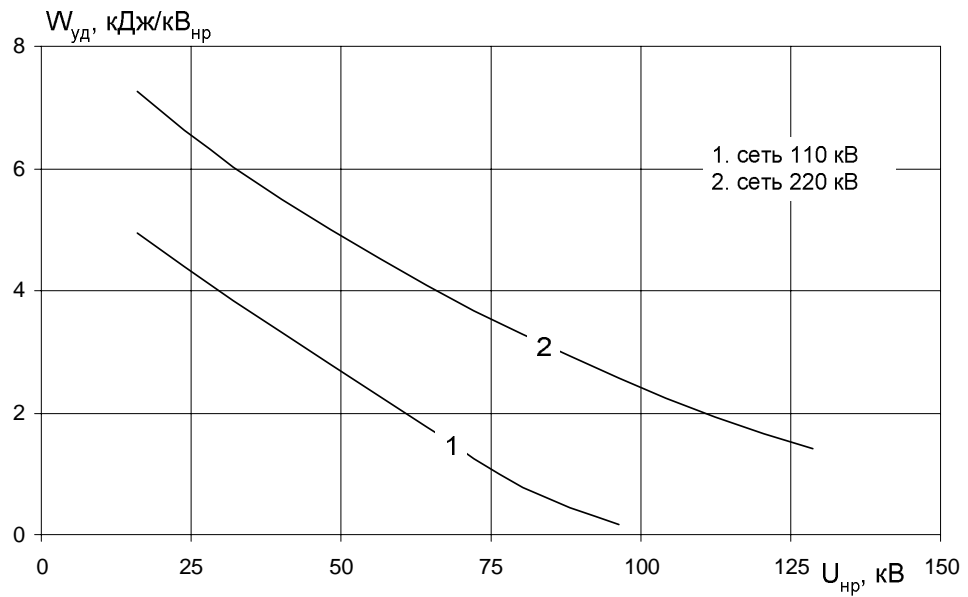


Рис.3.25. Удельные выделяющиеся в ОПН-Н энергии в зависимости от наибольшего рабочего напряжения ОПН-Н (действ. знач.). Условия рис.3.14 (110 кВ) и рис.3.15 (220 кВ); случай $n = 3$.

3.6. Выбор основных характеристик ОПН-Н

Выбор ОПН-Н начнем с его наибольшего рабочего напряжения, которое определим на основе рассмотренных ранее случаев продольной и поперечной несимметрии сети.

На основе информации о токах короткого замыкания сети можно определить с использованием рис.3.10 (случай однофазного короткого замыкания) напряжение промышленной частоты, воздействующее на ОПН-Н до отключения однофазного короткого замыкания. Длительность этого интервала $t_{\max}^{(1)}$ определяется выдержками времени основных и резервных релейных защит. Для этого времени по характеристике «напряжение-время» выбранного типа ОПН, построенной в относительных единицах напряжения, находится допустимая кратность воздействующего на ограничитель напряжения $K_{\max}(t_{\max}^{(1)}) = \frac{U_N}{U_{\text{нр}}^{\text{ОПН-Н}}}$, с использованием которой наибольшее рабочее напряжение ОПН-Н

$$U_{\text{нр}}^{\text{ОПН-Н}} \geq \frac{U_N}{K_{\max}(t_{\max}^{(1)})}.$$

В нормальном симметричном режиме работы сети напряжение на разземленной нейтрали и, соответственно, на защищающем изоляцию нейтрали ограничителе ОПН-Н практически равно нулю. Напряжение на ОПН-Н будет появляться лишь при несимметричных режимах работы сети, и, поэтому, строго говоря, термин «наибольшее рабочее напряжение ОПН» не имеет привычного смысла в случае ОПН-Н.

С учетом уставок основных и резервных релейных защит в сетях 110-220 кВ $t_{\max}^{(1)} < 10$ с, что по типовой характеристике «напряжение-время» ОПН [1,24] соответствует $K_{\max}(t_{\max}^{(1)}) > 1.25$. Тогда согласно рис.3.10 для ОПН-Н в сети 110 кВ достаточно иметь $U_{\text{нр}}^{\text{ОПН-Н}} \approx \frac{53}{1.25} = 42$ кВ; в сети 220 кВ $U_{\text{нр}}^{\text{ОПН-Н}} \approx \frac{106}{1.25} = 85$ кВ.

При неполнофазном подключении трансформатора напряжение на нейтрали будет равно фазному напряжению сети $U_{\text{нр}}^{\text{сети}} / \sqrt{3}$ (для 110 кВ

получим $U_N = 73$ кВ; для 220 кВ – $U_N = 146$ кВ). Максимальная длительность режима неполнофазного включения трансформатора мала и может быть принята равной $t_{\text{макс}} = 0.1$ с, что по типовой характеристике «напряжение-время» ОПН соответствует $K_{\text{макс}} = 1.4$. Тогда для ОПН-Н в режиме неполнофазного включения достаточно иметь $U_{\text{нр}}^{\text{ОПН-Н}} = \frac{73}{1.4} = 52$ кВ (сеть 110 кВ),
 $U_{\text{нр}}^{\text{ОПН-Н}} = \frac{146}{1.4} = 104$ кВ (сеть 220 кВ).

В табл.3.3 приведены результаты расчета требуемых наибольших рабочих напряжений ОПН-Н при рассмотренных видах поперечной и продольной несимметрии, а за окончательное значение $U_{\text{нр}}^{\text{ОПН-Н}}$ принимается максимальное из полученных значений, указанное в последнем столбце.

Таблица 3.3. Выбор наибольшего рабочего напряжения ОПН-Н (действующее значение).

Сеть, кВ	Схемно-режимная ситуация	свойства сети		свойства ОПН-Н		
		$t_{\text{макс}}$, с	$U_N^{\text{макс}}$, кВ	$K_{\text{макс}}(t_{\text{макс}})$, о.е.	$U_{\text{нр}}^{\text{ОПН-Н}}$, кВ	
110	однофазное к.з.	10	53	1,25	42	52
	включение одной фазой	0,1	73	1,4	52	
220	однофазное к.з.	10	106	1,25	85	104
	включение одной фазой	0,1	146	1,4	104	

По найденным значениям $U_{\text{нр}}^{\text{ОПН-Н}}$, указанным в последнем столбце табл.3.3, с использованием рис.3.25 определяем достаточное значение удельной энергоемкости ОПН-Н, которое для сетей 110-220 кВ составляет $W_{\text{уд}} = 3$ кДж/кВ. Так как рис.3.25 соответствует крайне неблагоприятному стечению обстоятельств, то нет необходимости делать запас в энергоемкости ОПН-Н по сравнению с найденным значением $W_{\text{уд}} = 3$ кДж/кВ.

Энергоемкость $W_{\text{уд}} = 3$ кДж/кВ соответствует току пропускной способности (прямоугольный импульс 2 мс) около 600 А и, следовательно, на такое значение тока пропускной способности ОПН-Н для сетей 110-220 кВ рекомендуется ориентироваться.

Временные параметры ограниченных действием ОПН-Н импульсов грозových напряжений на разземленной нейтрали таковы, что можно не учитывать волновой процесс в ошиновке между ОПН-Н и нейтральным выводом трансформатора, т.е. напряжение на изоляции нейтрали совпадает с остающимся напряжением на ОПН-Н. Учитывая испытательные напряжения облегченной изоляции трансформатора (табл.3.1), достаточно принять $U_{10кА} \leq 190$ кВ для сети 110 кВ и $U_{10кА} \leq 380$ кВ для сети 220 кВ. Так как токи в ОПН-Н заведомо меньше 5-10 кА, то и напряжение на изоляции будет заметно меньше указанных значений $U_{10кА}$.

Основные характеристики ОПН-Н, предназначенных для защиты изоляции разземляемой нейтрали силовых трансформаторов 110-220 кВ, сведены в табл.3.4 и соответствуют данным [1,26].

Таблица 3.4. Основные технические характеристики ОПН, предназначенных для защиты изоляции разземляемой нейтрали силовых трансформаторов 110-220 кВ.

№	Параметр ОПН для защиты изоляции нейтрали	сеть 110 кВ	сеть 220 кВ	Примечания
1	Наибольшее рабочее напряжение ОПН, не менее (кВ)	52	104	
2	Характеристика "напряжение-время". Допустимая кратность повышения напряжения 50 Гц при времени его воздействия 10 с, не менее (о.е.)	1.25	1.25	кратность указана по отношению к наибольшему рабочему напряжению ОПН по пункту 1
3	Амплитуда тока пропускной способности 2000 мкс, не менее (А)	600	600	
4	Энергоемкость одного импульса тока пропускной способности 2000 мкс, не менее (кДж/кВ)	3	3	энергоемкость указана по отношению к наибольшему рабочему напряжению ОПН по пункту 1
5	Остающееся напряжение в режиме ограничения коммутационных перенапряжений, не более (кВ)	-	-	этот параметр не критичен
6	Остающееся напряжение в режиме ограничения грозовых перенапряжений, не более (кВ)	190	380	значение указано при импульсе тока 8/20 мкс амплитудой 10 кА
7	Номинальный разрядный ток на импульсе 8/20 мкс, не менее (кА)	10	10	
8	Амплитуда импульса большого тока 4/10 мкс, не менее (кА)	-	-	этот параметр не критичен

3.7. Обобщение полученных результатов

- построена модель трансформатора, предназначенная для анализа передачи грозовых волн через трансформатор в разземленную нейтраль и во вторичную цепь;
- с использованием модели трансформатора получены аналитические выражения, позволяющие оценить максимальное значение и форму импульса грозовых перенапряжений на изоляции разземленной нейтрали силовых трансформаторов 110-220 кВ; проанализированы факторы, влияющие на перенапряжения;
- проведено компьютерное моделирование переходных процессов в трансформаторе и определены параметры импульсов грозовых перенапряжений на изоляции нейтрали, а также импульсных токов в ОПН-Н;
- расчетами показано, что для силовых трансформаторов 110 кВ с полной изоляцией нейтрали в случае защиты их высоковольтной обмотки 110 кВ с помощью современных ОПН 110 кВ не требуется установки ОПН-Н в нейтраль для защиты ее изоляции от грозовых перенапряжений;
- проведенные расчеты показали хорошее совпадение основных характеристик ОПН-Н с указанными в [1,26].