

Грозовые перенапряжения на изоляции нейтрали и защита от них (Дмитриев М.В.)

1. Общая характеристика вопроса

Внимание к вопросу о передаче напряжения во вторичную цепь было привлечено наблюдавшимися во время гроз повреждениями изоляции генераторов, включенных блоком на повышающие трансформаторы [1]. При отсутствии непосредственной связи генераторных блоков с воздушными линиями естественно было предположить, что опасные для изоляции напряжения возникали при воздействии грозовых волн напряжений на первичную обмотку.

Для анализа передачи перенапряжений через трансформатор во вторичную цепь, а так же перенапряжений на нейтрали в случае, если она не заземлена, необходимо составление расчетных схем замещения трансформатора (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).

2. 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.

При электростатической передаче начальное распределение напряжения, установившееся в обмотке высшего напряжения, передается благодаря емкостной связи в обмотку низшего напряжения. Соответствующая емкостная схема замещения представлена на рис.1.

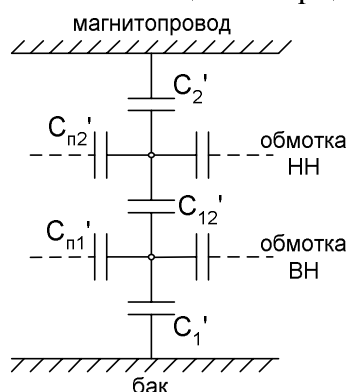


Рис.1. Емкостная схема замещения двухобмоточного трансформатора.

Отбросив вследствие малости продольные емкости обмоток (C_{n1}' и C_{n2}'), трансформатор можно представить в виде обобщенной П-схемы замещения рис.2 (распределенные емкости C_1' , C_2' , C_{12}' заменены сосредоточенными, размещенными в начале и в конце обмоток).

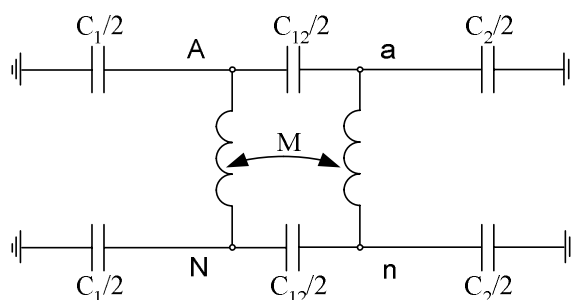


Рис.2. П-схема замещения однофазного двухобмоточного трансформатора.

После объединения трех однофазных схем замещения трансформатора в трехфазную группу с соединением обмоток «звезда/треугольник» получим схему рис.3. Концы обмоток фаз высокой и низкой стороны на схеме обозначены как А,В,С,Н,а,б,с. Звезда имеет выведенную нейтраль (заземленную или нет).

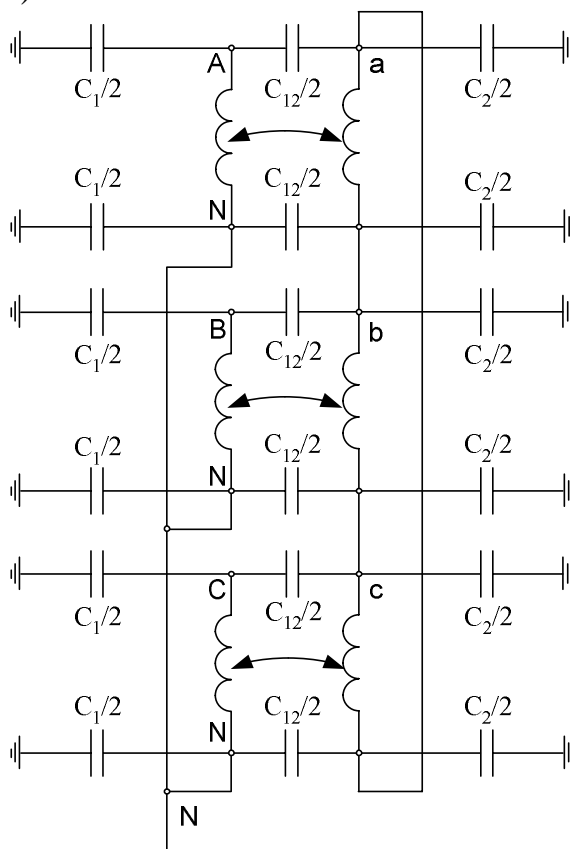


Рис.3. П-схема замещения трехфазного трансформатора, обмотки которого соединены по схеме «звезда/треугольник».

Объединив, где требуется, параллельно включенные емкости и несколько преобразовав схему рис.3, получим рис.4.

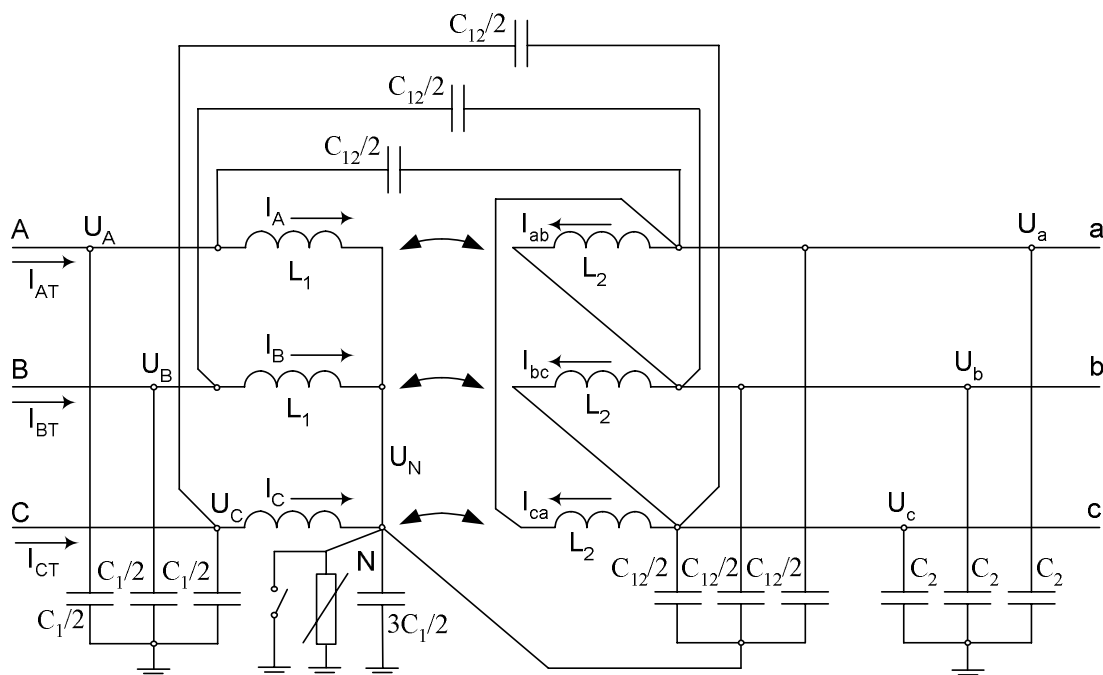


Рис.4. Расчетная П-схема замещения трехфазного двухобмоточного трансформатора со схемой соединения обмоток «звезда/треугольник» (трансформатор имеет разземляемую нейтраль, в которую возможна установка ОПН-Н).

В схеме рис.4 можно проводить анализ передачи перенапряжений как на вторичную сторону, так и на нейтраль (если она разземлена). Далее основное внимание будем уделять перенапряжениям на разземленной нейтрали и защите изоляции нейтрали от перенапряжений.

Система уравнений двухобмоточного трансформатора без учета активных потерь и тока намагничивания имеет вид (система записана в операторной области):

$$\begin{aligned}
 U_A - U_N &= p\psi_A + pL_1 I_A, & U_B - U_N &= p\psi_B + pL_1 I_B, & U_C - U_N &= p\psi_C + pL_1 I_C, \\
 p\psi_a &= pL_2 I_{ab} + U_a - U_b, & p\psi_b &= pL_2 I_{bc} + U_b - U_c, & p\psi_c &= pL_2 I_{ca} + U_c - U_a, \\
 I_{ab} &= KI_A, & I_{bc} &= KI_B, & I_{ca} &= KI_C, \\
 \psi_A &= W_1 \Phi_A, & \psi_B &= W_1 \Phi_B, & \psi_C &= W_1 \Phi_C, \\
 \psi_a &= W_2 \Phi_A, & \psi_b &= W_2 \Phi_B, & \psi_c &= W_2 \Phi_C.
 \end{aligned}$$

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 так:

$$U_A - U_N = pL_1 I_A + K(pL_2 KI_A + U_a - U_b) = pL_T I_A + K(U_a - U_b), \quad (1)$$

$$U_B - U_N = pL_T I_B + K(U_b - U_c), \quad (2)$$

$$U_C - U_N = pL_T I_C + K(U_c - U_a), \quad (3)$$

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). Трансформатор упрощенно будем считать ненагруженным.

Для высокой стороны:

$$I_{AT} = \frac{pC_1}{2}U_A + \frac{pC_{12}}{2}(U_A - U_a) + I_A, \quad (4)$$

$$I_{BT} = \frac{pC_1}{2}U_B + \frac{pC_{12}}{2}(U_B - U_b) + I_B, \quad (5)$$

$$I_{CT} = \frac{pC_1}{2}U_C + \frac{pC_{12}}{2}(U_C - U_c) + I_C, \quad (6)$$

для низкой стороны:

$$0 = pC_2U_a + \frac{pC_{12}}{2}(U_a - U_N) - \frac{pC_{12}}{2}(U_A - U_a) + I_{ab} - I_{ca}, \quad (7)$$

$$0 = pC_2U_b + \frac{pC_{12}}{2}(U_b - U_N) - \frac{pC_{12}}{2}(U_B - U_b) + I_{bc} - I_{ab}, \quad (8)$$

$$0 = pC_2U_c + \frac{pC_{12}}{2}(U_c - U_N) - \frac{pC_{12}}{2}(U_C - U_c) + I_{ca} - I_{bc}, \quad (9)$$

для нейтрали

$$\frac{p3C_1}{2}U_N = I_A + I_B + I_C + \frac{pC_{12}}{2}(U_a + U_b + U_c - 3U_N) \quad (10)$$

3. Параметры схемы замещения трансформатора

Численные значения емкостей обмоток на землю C_1 и C_2 , а также емкости между обмотками C_{12} можно получить по эмпирическим выражениям [2,3] (S в кВА; U_{BH} , U_{HH} в кВ):

$$C_1 = 0.07 \frac{S^{0.35}}{U_{BH}^{0.175}} \cdot 10^{-9} \Phi,$$

$$C_2 = 1.3 \frac{\sqrt{S}}{U_{HH} + 13 + 0.2\sqrt{S}} \cdot 10^{-9} \Phi,$$

$$C_{12} = \frac{\sqrt{S}}{U_{BH}} \cdot 10^{-9} \Phi.$$

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

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

Результаты расчетов емкостей и индуктивностей двух силовых трансформаторов 110-220 кВ приведены в табл. 1.

Таблица 1

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 $u_k = 10\%$.

4. Напряжение на разземленной нейтрали

Получим выражение для напряжения нейтрали U_N . Для этого сложим уравнения (1), (2), (3), получим после преобразований

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

Сложим уравнения (7), (8), (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 (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 $\omega_{\text{ЭКВ}} = \frac{1}{\sqrt{L_T C_{\text{ЭКВ}}}}$,

$$U_N = \frac{(U_A + U_B + U_C)}{3} \cdot \left[1 - K_C \cdot \frac{p^2}{p^2 + \omega_{\text{ЭКВ}}^2} \right], \quad (11)$$

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 ради упрощений будем пользоваться предположением, что первичная обмотка включается на источник постоянного напряжения. В действительных 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 [1]. 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 обмоткам (ВН) всех трех фаз А,В,С одновременно приложить постоянное напряжение $U_A(t) = U_B(t) = U_C(t) = E$, то в операторной области $U_A = U_B = U_C = \frac{E}{p}$. Согласно [4] оригинал для (11) в этом случае будет

$$U_N = E \cdot [1 - K_C \cdot \cos \omega_{\text{ЭКВ}} t]. \quad (12)$$

Видно, что в случае одновременного воздействия постоянного напряжения на все три фазы первичной обмотки напряжение на разземленной нейтрали носит характер колебаний около напряжения E . 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.4 появится начальное «емкостное» распределение напряжений. Лишь вслед за мгновенным начальным емкостным распределением напряжения на нейтрали и во вторичной обмотке согласно (12) разовьются колебания.

Долю начального емкостного напряжения на нейтрали можно получить при $t = 0$ из (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 125 МВА можно получить $U_N^{\text{НАЧ}} / E = 0.143$, для трансформатора 220/10 кВ мощностью 125 МВА $U_N^{\text{НАЧ}} / E = 0.065$.

В эксплуатации на высоковольтные обмотки трансформатора будут воздействовать не идеализированные постоянные напряжения, а грозовые волны, характеризующиеся конечной длительностью фронта импульса τ_ϕ и условной длительностью всего импульса $\tau_{50\%}$ (длительность импульса до его «полуспада»).

Так как реально $T_{\text{ЭКВ}} \gg \tau_\phi$, то длительность фронта воздействующих на обмотку грозовых волн практически не влияет на максимальное значение напряжений на нейтрали. Условная длительность импульса $\tau_{50\%}$ сопоставима с $T_{\text{ЭКВ}}$ и поэтому ее учет является принципиальным.

Пренебрегая фронтом импульса, будем считать, что одновременно на три фазы высокой стороны трансформатора воздействуют волны напряжения

$U_A(t) = U_B(t) = U_C(t) = E \cdot \exp(-t/\tau_{умн})$. Условная длительность такого импульса может быть найдена из условия $0.5E = E \cdot \exp(-\tau_{50\%}/\tau_{умн})$ и будет $\tau_{50\%} = \tau_{умн} \cdot \ln 2 \approx 0.69\tau_{умн}$.

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

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

Упрощенно заменив затухающий импульс импульсом постоянной амплитуды, найдем с использованием (12) максимальное значение напряжения на нейтрали

$$U_N = E \cdot (1 + K_C) \cdot \exp\left[-\frac{T_{\text{ЭКВ}}}{4\tau_{умн}}\right] \quad (13)$$

Из (13) видно, что при малых длительностях воздействующих на высокую сторону трансформатора волн $\tau_{50\%} = 0.69\tau_{умн}$ колебания напряжения на нейтрали не успеют развиться в полной мере, и максимальное напряжение на нейтрали будет невелико. При больших длительностях падающих волн $\tau_{50\%}$ воздействующие на нейтраль перенапряжения могут быть значительны, достигая величин, несколько меньших $2E$.

Выражение (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 [1].

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 (11) примет вид

$$U_N = \frac{nU}{3} \cdot \left[1 - K_C \cdot \frac{p^2}{p^2 + \omega_{\text{ЭКВ}}^2}\right], \quad (14)$$

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

Аналогично преобразованиям, выполненным при выводе (13), можно получить

$$U_N = \frac{nE}{3} \cdot (1 + K_C) \cdot \exp\left[-\frac{T_{экс}}{4\tau_{имн}}\right] \quad (15)$$

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

Из (15) видно, что наибольшие перенапряжения на нейтрали трансформатора будут при воздействии волн грозových перенапряжений одновременно на три фазы высоковольтной обмотки трансформатора, а минимальные перенапряжения – при воздействии лишь на одну фазу.

Для трансформатора 110/10 кВ 125 МВА по (15):

$$U_N = \frac{nE}{3} \cdot [1 + (1 - 0.143)] \cdot \exp\left[-\frac{T_{экс}}{4\tau_{имн}}\right] = 0.619nE \cdot \exp\left[-\frac{T_{экс}}{4\tau_{имн}}\right] \quad (16-a)$$

Для трансформатора 220/10 кВ 125 МВА по (15):

$$U_N = \frac{nE}{3} \cdot [1 + (1 - 0.065)] \cdot \exp\left[-\frac{T_{экс}}{4\tau_{имн}}\right] = 0.645nE \cdot \exp\left[-\frac{T_{экс}}{4\tau_{имн}}\right] \quad (16-б)$$

Для сравнения выражений (16) с литературными данными отметим, что исследования [5] обобщаются приведенной в [6] формулой

$$U_N = 0.6nE \cdot \left[1 - \exp\left(-\frac{4\tau_{имн}}{T_{экс}}\right)\right]. \quad (17)$$

Формулы (16) и (17) похожи по структуре и дают качественно одинаковые результаты. Однако способ получения (17) в [6] не описан и не дано определения величинам $T_{экс}$ и $\tau_{имн}$.

На рис.5-6 представлены результаты расчетов по формуле (16) с использованием соотношения $\tau_{50\%} = 0.69\tau_{имн}$ 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 грозové 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.5-6 нанесены испытательные напряжения изоляции нейтрали, приведенные в табл.2.

Таблица 2

Испытательное напряжение полного грозového импульса для изоляции нейтрали согласно ГОСТ 1516.3-96

| Уном, кВ | испытательное (допустимое) напряжение нейтрали, кВ | |
|----------|--|-------------|
| | полная | облегченная |
| 110 | 480 (470) | 200 |
| 220 | 750 (705) | 400 |

Допустимое напряжение на трансформаторе принимается равным [6]
 $U_{дон} = 1.1(U_{исн} - 0.5U_{ном})$.

Из рис.5 видно, что при всех реально возможных длительностях $\tau_{50\%}$ 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.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. 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. Если изоляция разземленной нейтрали облегченная, то ее защита обязательна во всех случаях.

Из рис.6 видно, что разземленная нейтраль силовых трансформаторов 220 кВ требует защиты от грозовых перенапряжений во всех случаях (и полная изоляция, и облегченная).

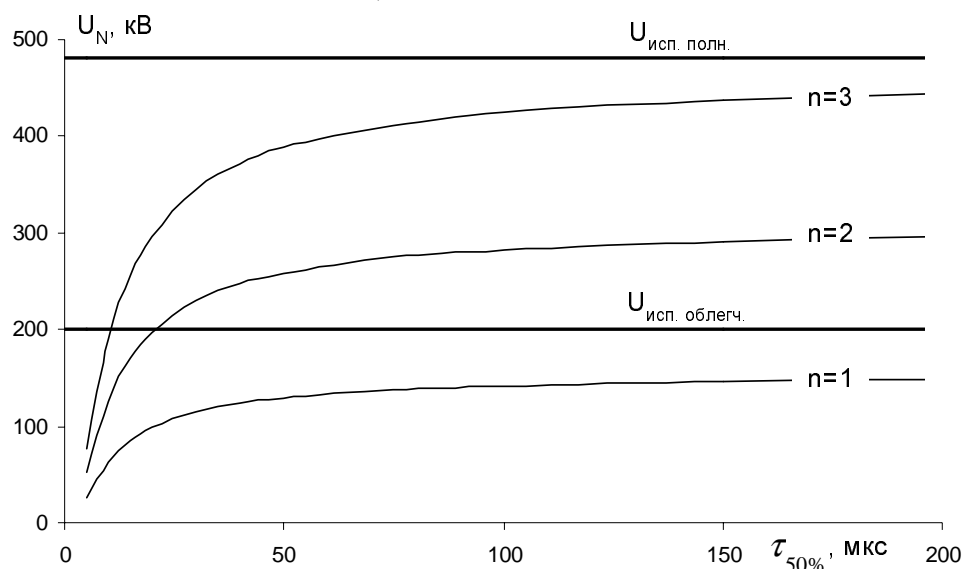


Рис.5. Амплитуда перенапряжений на разземленной нейтрали силового двухобмоточного трансформатора 110/10 кВ, $S=125$ МВА (согласно (16-а)) в зависимости от условной длительности импульса $\tau_{50\%}$ и числа фаз n (вторичная обмотка ненагружена, $E = 250$ кВ).

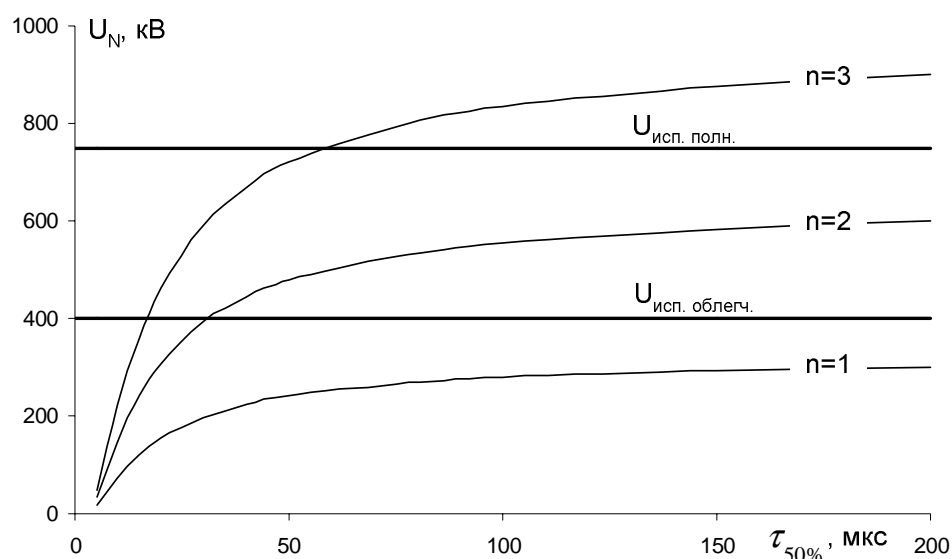


Рис.6. Амплитуда перенапряжений на разземленной нейтрали силового двухобмоточного трансформатора 220/10 кВ, $S=125$ МВА (согласно (16-б)) в зависимости от условной длительности импульса $\tau_{50\%}$ и числа фаз n (вторичная обмотка ненагружена, $E = 500$ кВ).

4. Выводы

- Получены аналитические выражения, которые позволяют оценить максимальные грозовые перенапряжения на изоляции разземленной нейтрали силовых трансформаторов 110-220 кВ;
- Проанализированы факторы, влияющие на перенапряжения на разземленной нейтрали силовых трансформаторов;
- 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;
- Для силовых трансформаторов 220 кВ установка ОПН-Н в разземляемую нейтраль для защиты ее изоляции от грозовых перенапряжений необходима во всех случаях (полная изоляция, облегченная).

Литература:

- [1] Л.И. Сиротинский. Техника высоких напряжений. Часть третья. Выпуск первый. "Волновые процессы и внутренние перенапряжения в электрических системах". Государственное энергетическое издательство. Москва-Ленинград, 1959.
- [2] П. Хаммарлунд. "Восстанавливающееся напряжение на контактах выключателя". Перевод с англ. яз. Государственное энергетическое издательство, Москва-Ленинград, 1956.
- [3] "Электротехнический справочник. Том 1", издание пятое, исправленное. Под общей редакцией П.Г. Грудинского и др. – М.: "Энергия", 1974.

- [4] Г. Корн и Т. Корн. Справочник по математике для научных работников и инженеров. Москва, “Наука”, 1970.
- [5] Г.М. Иманов, А.А. Пухальский, Ф.Х. Халилов, А.И. Таджибаев. “Защита электрических сетей предприятий нефти и газа от перенапряжений”. Санкт-Петербург, изд-во ПЭИПК, 1999.
- [6] 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-Петербургское отделение. 1995.