

УДК 621.313.32

**Сивокобыленко В.Ф., Лебедев В.К., Сердюков Р.П.**

**ПЕРЕХОДНЫЕ ПРОЦЕССЫ В ЭЛЕКТРИЧЕСКИХ СЕТЯХ С  
РЕЗИСТОРНЫМ ЗАЗЕМЛЕНИЕМ НЕЙТРАЛИ**

*Донецкий национальный технический университет*

*In the paper the mathematical model of a network with resistor neutral grounding is considered, the analysis of arc short circuits is made. The paper offers the use of the low-voltage resistor and a technique of a choice of parameters of this resistor and transformers for neutral grounding.*

*Keywords: an electric network, a neutral, the arc short circuit, the transformer, the resistor, mathematical model.*

*В работе рассматривается математическая модель сети с резисторным заземлением нейтрали, произведен анализ дуговых замыканий. Предложено использование низковольтного резистора и методика выбора параметров этого резистора и трансформаторов для заземления нейтрали.*

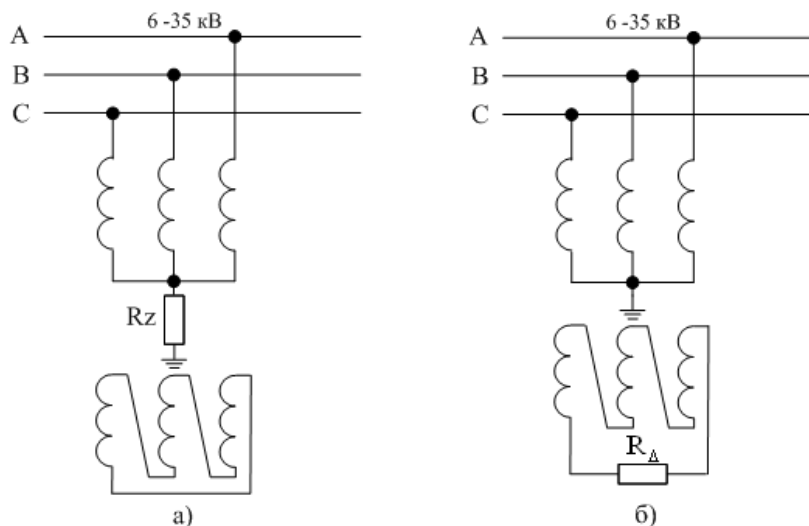
*Ключевые слова: электрическая сеть, нейтраль, дуговое замыкание, трансформатор, резистор, математическая модель.*

В настоящее время в электрических системах находятся в эксплуатации сети 6-35 кВ с изолированной нейтралью, с резонансно-заземленной через дугогасящую катушку, а также, в последнее время, находит применение способ заземления нейтрали через высоковольтный резистор [1]. В работах [2-6 и др.] показано, что резисторное заземление нейтрали позволяет предотвращать феррорезонансные процессы и перенапряжения в режимах однофазного замыкания на землю (ОЗЗ), а также повышать чувствительность релейной защиты. При этом для резисторного заземления применяют высоковольтные бетэловые или высоковольтные специальные резисторы из электропроводящего композиционного материала на основе керамики. Однако внедрение таких

резисторов, с одной стороны, требует разработки методики их выбора с учетом параметров сети, а с другой стороны, громоздкость, сложность монтажа и наладки, а также высокая стоимость требуют рассмотрения вопросов возможности применения более простых и дешевых низковольтных резисторов и разработки схем их подключения. Актуальным является также разработка способов анализа переходных процессов в сетях с резисторным заземлением нейтрали и оценка уровней перенапряжений при глухих и дуговых замыканиях фазы на землю. Этим вопросам и посвящена данная работа.

В сетях 6-35 кВ обмотки низшего напряжения силовых трансформаторов соединяют, как правило, в треугольник, в связи с чем для резисторного заземления нейтрали требуется специальный трансформатор со схемой соединения фазных обмоток в звезду с выводом нулевой точки звезды. При этом его обмотки низшего напряжения соединяют в треугольник (рис. 1а).

При решении вопросов, связанных с подключением резистора к нейтрали специального трансформатора, необходимо выбрать его параметры, величину сопротивления резистора, способ его подключения.



**Рис. 1 – Схемы подключения резисторов заземления нейтрали:**

**а) высоковольтного; б) низковольтного**

Основное назначение резисторного заземления нейтрали заключается в том, чтобы при возникновении дуговых замыканий фазы на землю предотвратить возникновение перенапряжений, превышающих 3-5 кратные амплитудные фазные номинальные напряжения ( $3-5 U_{\phi}$ ) и ограничить их до уровня не более  $2,5 U_{\phi}$ . Для решения этой задачи выбор величины резистора производят с учетом следующего.

При возникновении дугового замыкания в сети с изолированной нейтралью и погасании дуги в момент перехода через “ноль” высокочастотной составляющей, заряженные емкости сети сохраняют свои заряды, так как не имеют пути разряда, что и является причиной возникновения перенапряжений величиной до  $(3-4)U_{\phi}$  и даже более при повторных зажиганиях дуги. Включение резистора в нейтраль разряжает емкость сети, что предотвращает процесс накопления зарядов на ней и возможность появления больших перенапряжений.

Высоковольтный резистор должен также предотвращать возникновение феррорезонансных процессов в сети при перемежающемся характере горения дуги. Эти процессы могут возникать при высокой степени намагничивания магнитопроводов трансформаторов напряжения, имеющих заземленную нейтраль, через индуктивность обмоток которых стекает емкостной заряд на землю после погасания дуги. Насыщение магнитопроводов трансформаторов может возникнуть, если энергия, запасенная в емкостях сети к моменту погасания дуги ( $W_C$ ), окажется больше порогового значения электромагнитной энергии ( $W_L$ ), запасенной в индуктивностях указанных выше трансформаторов. Другими словами, если на емкости остается заряд, величина которого достаточна для высокой степени насыщения магнитопровода трансформатора при разряде емкости на землю через одну из обмоток, то в сети возникает феррорезонансный процесс, условием появления которого являются:

$$W_C > W_L \quad \text{или} \quad \frac{C \cdot U^2}{2} > \frac{L \cdot I^2}{2},$$

где  $C$  - емкость сети,  $\Phi$ ;  $U$  - величина напряжения при погасании дуги,  $B$ ;  $L$  - индуктивность трансформатора, через который стекает заряд,  $Гн$ ;  $I$  - величина тока разряда емкостей сети,  $A$ .

Насыщение магнитопровода можно предотвратить, если разряд емкости после погасания дуги протекает за время менее полупериода промышленной частоты сети ( $T/2 = 0,01с$ ). Принимая, что процесс затухания емкости через резистор имеет экспоненциальный характер и заканчивается примерно за 3,6 постоянной времени разряда емкости, величину резистора можно определить как:

$$R_z \leq (T / 2) \cdot (3,6 \cdot C)^{-1} \quad (1)$$

Мощность, на которую должен быть рассчитан резистор при длительном замыкании, а также и трансформатор, находим из условия

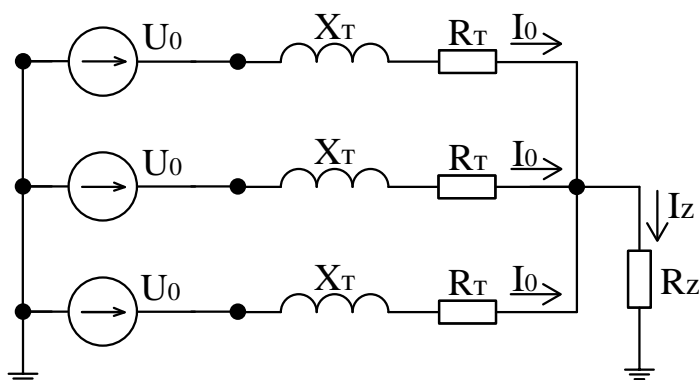
$$P \geq R_z \cdot (3 \cdot U_\phi \cdot \omega \cdot C)^2 \quad (2)$$

При этом следует иметь в виду, что активная составляющая тока замыкания на землю, обусловленная сопротивлением резистора, будет примерно равна емкостному току сети. Уровень перенапряжений в сети при выборе сопротивления резистора по (1) будет несколько выше, чем при меньшем сопротивлении, однако тогда ток в месте замыкания возрастает. По этой же причине не следует принимать мощность трансформатора слишком завышенной.

Рассмотрим возможность решения задачи ограничения перенапряжений до такого же уровня путем применения более простой схемы (рис.1б), в которой вместо высоковольтного резистора использован низковольтный, подключенный в разомкнутый треугольник обмоток низшего напряжения трехфазного трансформатора броневого типа или использовать для этой цели три однофазных двухобмоточных трансформатора.

Установим эквивалентность схем (рис.1а и б) с точки зрения значений токов нулевой последовательности в первичной цепи для выбранных по (1) и (2) присоединительного трансформатора и резистора. Для схемы (рис.1а), при

собранных в треугольник обмотках низшего напряжения, расчетная схема замещения показана на рис.2, параметры которой определяются по известным соотношениям.



**Рис. 2 – Расчетная схема замещения при подключении резистора к нейтрали обмоток высшего напряжения трансформатора**

Сопротивления фазы нейтралеобразующего трансформатора определяем по известным номинальным значениям мощности, тока, напряжения, а также напряжению и потерям короткого замыкания :

$$R_T = \frac{P_{К.З}}{3 \cdot I_H^2}; \quad X_T = \frac{Uk\%}{100} \cdot \frac{U_{ВН}^2}{S_H}. \quad (3)$$

При установке резистора в нейтрали обмотки высшего напряжения (рис.1а), ток в цепи высоковольтного резистора будет равен:

$$I_Z = \frac{U_0}{\frac{1}{3}R_T + j \cdot \frac{1}{3}X_T + R_Z} = \frac{3 \cdot U_0}{(R_T + 3 \cdot R_Z) + j \cdot X_T}, \quad (4)$$

где  $U_0$  - напряжение нулевой последовательности, равное номинальному фазному напряжению обмотки высшего напряжения.

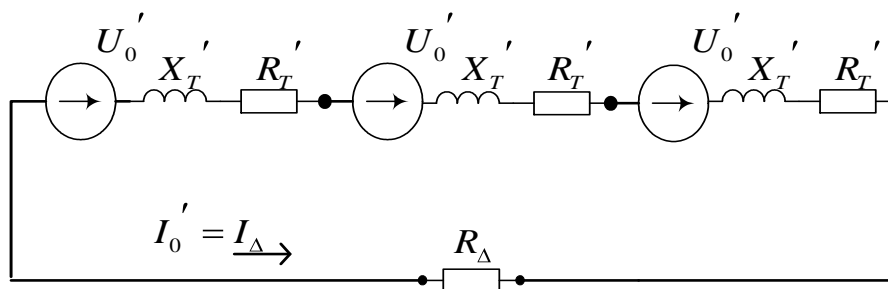
Величина активной мощности, поглощаемая высоковольтным резистором, равна:

$$P_Z = |I_Z|^2 \cdot R_Z, \quad (5)$$

Падение напряжения на высоковольтном резисторе составит:

$$\Delta U_Z = I_Z \cdot R_Z. \quad (6)$$

При установке резистора в цепи разомкнутого треугольника обмоток низшего напряжения нейтралеобразующего трансформатора (рис.1б), схема замещения для определения тока нулевой последовательности имеет вид :



**Рис. 3 – Эквивалентная схема замещения при подключении резистора в разомкнутый треугольник обмоток низшего напряжения**

Параметры этой схемы замещения, приведенные к номинальному напряжению низшей стороны, определяются с использованием номинального коэффициента трансформации  $K_T$  по следующим соотношениям:

$$U_0' = K_T^{-1} \cdot U_0; \quad R_T' = R_T \cdot K_T^{-2}; \quad X_T' = X_T \cdot K_T^{-2}. \quad (7)$$

При установке резистора в цепи разомкнутого треугольника обмоток низшего напряжения трансформатора (рис.1б) запишем выражение для тока в его цепи согласно схемы замещения (рис.3):

$$I_0' = I_\Delta = \frac{3 \cdot U_0'}{3 \cdot R_T' + j \cdot 3 \cdot X_T' + R_\Delta}. \quad (8)$$

Величину резистора в треугольнике обмоток низшего напряжения  $R_\Delta$  (рис.3), эквивалентному по режиму установки резистора  $R_z$  в нейтрали обмоток высокого напряжения, найдем из условия равенства активных мощностей, потребляемых этими резисторами в режиме ОЗЗ:

$$(3 \cdot |I_0|)^2 \cdot R_z = |I_0'|^2 \cdot R_\Delta = (|I_0| \cdot K_T)^2 \cdot R_\Delta \quad (9)$$

Из (9) следует:

$$R_\Delta = \frac{9 \cdot R_z}{K_T^2}. \quad (10)$$

Величину активной мощности низковольтного резистора определяем как:

$$P_{\Delta} = \left| \dot{I}'_0 \right|^2 \cdot R_{\Delta} \quad (11)$$

Подтвердим эквивалентность схем (рис.1а,1б), с точки зрения ограничения уровней перенапряжения при ОЗЗ, используя математическую модель сети. Математическое моделирование переходных процессов в сетях 6-35 кВ для анализа переходных процессов при резисторном заземлении нейтрали предлагается осуществлять на основе полных дифференциальных уравнений сети путем их решения с помощью неявных методов численного интегрирования. Это вызвано тем, что указанные методы обеспечивают численную устойчивость при определении уровней перенапряжений и разрядно-зарядных бросков токов емкостей, изменяющихся с высокой частотой, что требует небольших по времени шагов расчета. Расчет будем производить для мгновенных значений приложенных напряжений и остальных интересующих нас величин для заданной схемы замещения, например, изображенной на рис.4. На ней изображены, подключенные к сборным шинам: питающий трансформатор (ИП), присоединительный трансформатор для резисторного заземления нейтрали (ПТ), отходящие присоединения (П<sub>1</sub> ... П<sub>n</sub>).

Мгновенные значения напряжений трехфазной сети имеют следующий вид:

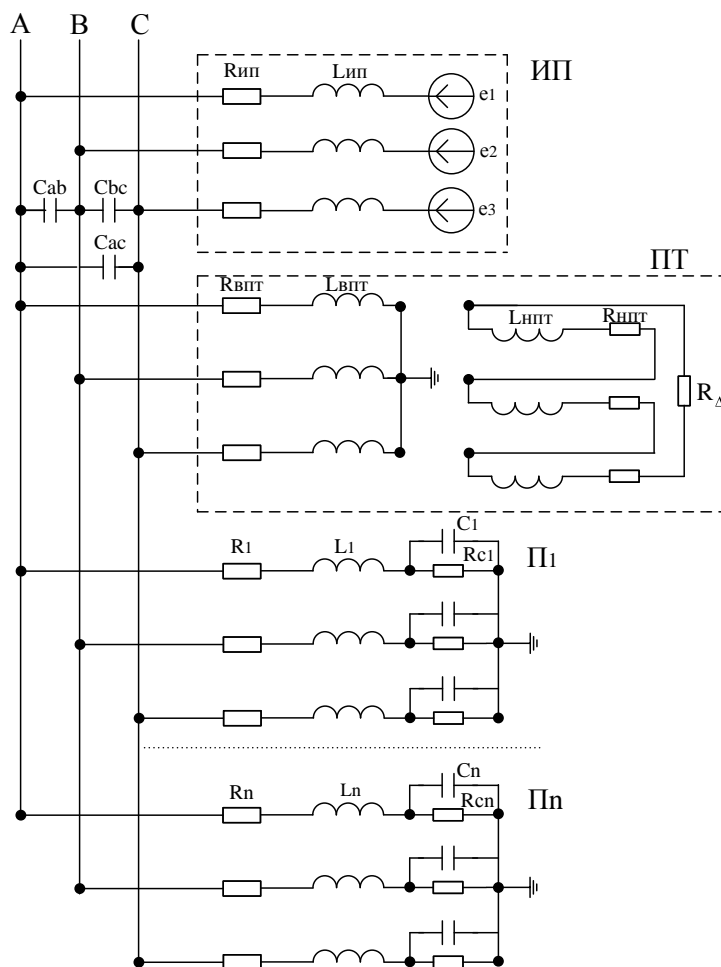
$$e_1(t) := \sqrt{2} \cdot \frac{6300}{\sqrt{3}} \cdot \cos(\omega \cdot t) \quad e_2(t) := \sqrt{2} \cdot \frac{6300}{\sqrt{3}} \cdot \cos\left(\omega \cdot t + \frac{2}{3} \cdot \pi\right) \quad (12)$$

$$e_3(t) := \sqrt{2} \cdot \frac{6300}{\sqrt{3}} \cdot \cos\left(\omega \cdot t - \frac{2}{3} \cdot \pi\right)$$

Сущность неявных методов [5,6] заключается в том, что производные токов аппроксимируются полиномами первого, второго или более высоких порядков, в которых значения токов на предыдущих шагах входят с соответствующими коэффициентами. Для неявного метода второго порядка (p=2) значения этих коэффициентов составляет:  $a_0 = 1,5$ ,  $a_1 = -2$ ,  $a_2 = 0,5$ . Производные в дифференциальных уравнениях заменяем конечными разностями, а для определения токов и напряжений используются такие же методы, как для расчета установившихся режимов. Тогда сопротивление в

переходных режимах для каждой фазы отходящих присоединений (рис.4) имеет резистивный характер и на каждом шаге расчета  $h$  определяется как:

$$Z = R + \frac{a_0}{h} \cdot L + \frac{h \cdot Rc}{a_0 \cdot Rc \cdot C + h} \quad , \quad (13)$$



**Рис. 4 – Схема замещения моделируемой сети**

а падение напряжения на зажимах этой ветви находим следующим образом:

$$E_V^{(k)} = \frac{L}{h} \cdot \sum_{s=1}^p a_s \cdot \dot{i}^{(k+1-s)} - \frac{1}{a_0 + \frac{h}{Rc \cdot C}} \cdot \sum_{s=1}^p a_s \cdot u_C^{(k+1-s)} \quad , \quad (14)$$

где  $u_C$  и  $\dot{i}$  - мгновенные значения напряжения на емкости и тока ветви на соответствующем шаге расчета,  $R$  – сопротивление ветви,  $Rc$  – сопротивление изоляции фазы на землю,  $C$  – емкость фазы на землю,  $L$  – индуктивность линии или трансформатора.



Используя матрично-векторные уравнения метода узловых напряжений, матрицу соединений ветвей с узлами схемы  $P$  и выражения (13) и (14), находим матрицу узловых проводимостей  $Y_{UZ}$ , узловые напряжения  $U_{UZ}$  и напряжения ветвей  $U_V$  на каждом шаге расчета :

$$Y_{uz}=P \cdot Z^{-1} \cdot P^T; \quad (15) \quad U_{UZ}=Y_{uz}^{-1} \cdot P \cdot Z^{-1} \cdot (e(t)-E_V); \quad (16)$$

$$U_V=P^T \cdot U_{UZ}, \quad (17)$$

где  $e(t)$  – вектор мгновенных напряжений сети, формируемый по (12)

Затем находим интегрируемые переменные, в качестве которых приняты мгновенные значения токов ветвей и напряжения на емкостях схемы:

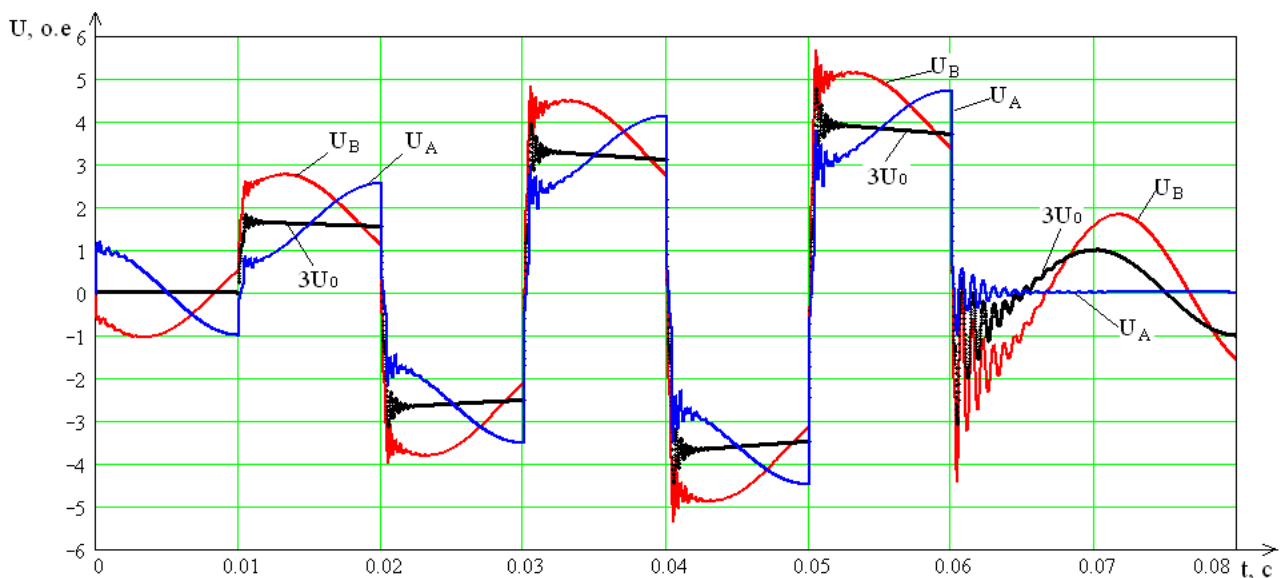
$$i^{(k+1)}=Z^{-1} \cdot (e(t)-E_V-U_V), \quad (18)$$

$$u_c^{(k+1)}=\frac{h \cdot R_c \cdot i^{(k+1)}}{a_0 \cdot R_c \cdot C+h} - \frac{R_c \cdot C}{a_0 \cdot R_c \cdot C+h} \cdot \sum_{s=1}^p a_s \cdot u_c^{(k+1-s)}. \quad (19)$$

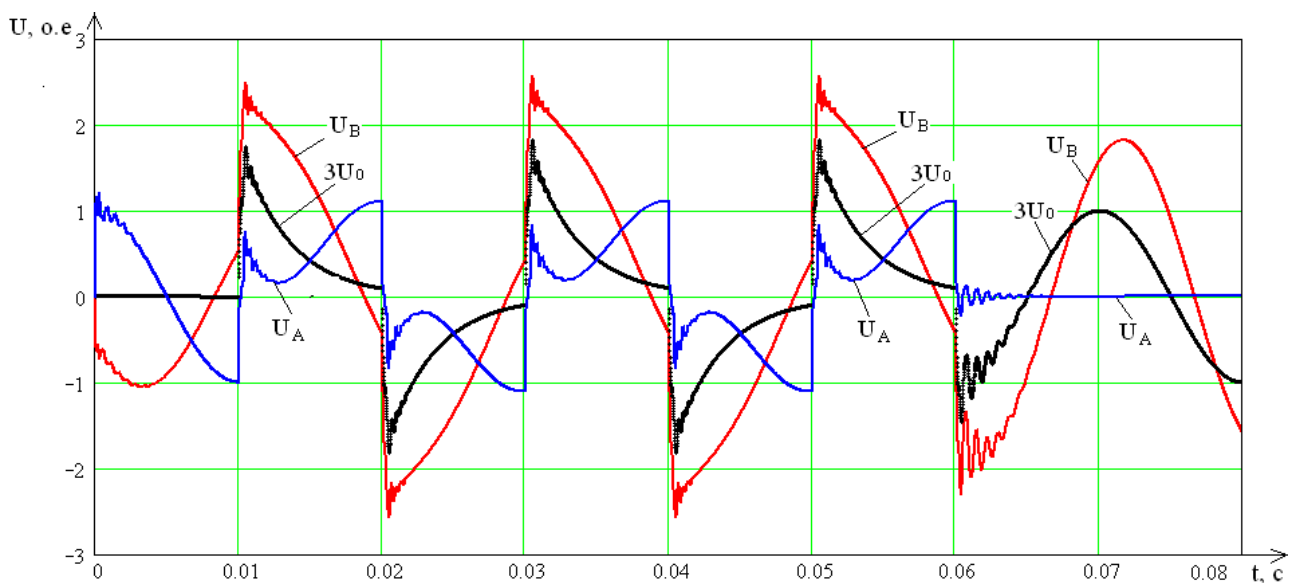
Используя изложенный алгоритм для схемы, показанной рис.4, были произведены расчеты переходных процессов при дуговых замыканиях на землю при различных способах подключения резистора к нейтрали сети.

В схеме сети емкость составила 0,56 мкФ, а ток глухого однофазного замыкания на землю ( $3I_0 = 1,75$  А). Как видно из результатов моделирования дугового замыкания фазы **A** на землю (рис.5) при изолированной нейтрали сети с каждым последующим пробоем изоляции уровни перенапряжений возрастают и при пятом пробое на здоровой фазе **B** они достигают  $5,8U_\phi$ , в связи с тем, что наблюдается эскалация напряжения из-за незначительного затухания напряжения смещения нейтрали  $3U_0$  за каждые полпериода промышленной частоты.

Результаты моделирования дугового замыкания при резисторном замыкании нейтрали через высоковольтный резистор (1700 Ом), включенный по схеме рис.1а, и через низковольтный резистор (17,5 Ом), включенный по предложенной в работе схеме (рис.1б), полностью совпали и приведены на рис.6.



**Рис. 5 – Уровни перенапряжений при дуговом ОЗЗ и изолированной нейтрали сети**



**Рис. 6 – Уровни перенапряжений при дуговом ОЗЗ и резисторном заземлении нейтрали сети**

Как видно из результатов моделирования дугового замыкания фазы А на землю (рис.6) при резисторном заземлении нейтрали сети с каждым последующим пробоем изоляции уровни перенапряжений на здоровой фазе В не превышают  $2,5U_{\phi}$  и остаются постоянными, в связи с тем, что напряжение смещения нейтрали  $3U_0$  за каждые полпериода промышленной частоты затухает практически полностью.

## Выводы:

1. В работе показано, что для повышения надежности работы сетей 6 кВ целесообразно применять резисторное заземление нейтрали по предложенной схеме включения резистора в разомкнутый треугольник обмоток низшего напряжения присоединительного трансформатора, подключенного к сборным шинам. Это позволяет ограничить перенапряжения до уровня  $(2 - 2,5)U_{\phi}$  при использовании более простого и дешевого оборудования.

2. Разработана методика выбора низковольтного резистора и присоединительного трансформатора, и с помощью математического моделирования подтверждена эффективность применения низковольтного резисторного заземления нейтрали сети 6 кВ.

## Литература

1. Правила устройства электроустановок. – Х.: Изд – во «Форт» 2009. – 704с.
2. Евдокунин Г.А., Гудилин С.В., Корепанов А.А. Выбор способа заземления нейтрали в сетях 6-10 кВ. – Электричество, 1998, №12. – С. 8-22.
3. Стогний Б.С., Масляник В.В., Назаров В.В. и др. О необходимости изменений режимов нейтрали в сетях 3-35кВ. – Энергетика и Электрификация, 2001, №4. – С. 27-29.
4. Сивокобыленко В.Ф., Лебедев В.К. Выбор величины резистора для заземления нейтрали в сетях 6-35 кВ// VI міжнародна науково-технічна конф.: зб.праць. – Маріуполь: Вид-во ПДТУ, 2008. – С. 306-311.
5. Сивокобыленко В.Ф., Лебедев В.К., Ковязин А.В., Сердюков Р.П. и др. Повышение надежности работы карьерных сетей при однофазных замыканиях на землю // Сб. научн. тр. ДонГТУ (Серия: электротехника и энергетика). – Выпуск 9(158). – Донецк, 2009. – С. 211-220.
6. Сивокобыленко В.Ф. Переходные процессы в системах электроснабжения собственных нужд электростанций : учебное пособие. / В.Ф. Сивокобыленко, В.К.Лебедев. – Донецк, ДонНТУ, 2002. –135с.