

УДК 621.316.99:621.3.052.32:621.316.1:621.3.027.7

## МОДЕЛИРОВАНИЕ ПЕРЕНАПРЯЖЕНИЙ

**М. В. КАМИНСКИЙ, А. О. ДОБРОДЕЙ**

*Учреждение образования «Гомельский государственный  
технический университет имени П. О. Сухого»,  
Республика Беларусь*

*Приведены результаты моделирования перенапряжений в сети 10 кВ в программном комплексе Multisim для различных режимов работы нейтрали при различных условиях. Получены осциллограммы фазных напряжений для сетей: с изолированной нейтралью, нейтралью, заземленной через резистор, нейтралью, заземленной через дугогасящий реактор, с комбинированным заземлением. Выполнен анализ полученных результатов при различных значениях сопротивления резистора заземления и дугогасящего реактора. Произведен расчет кратности перенапряжений для сети 10 кВ в различных режимах работы. Наглядно показана необходимость применения резистивного заземления и правильного выбора резистора для заземления.*

**Ключевые слова:** перенапряжение, резистивное заземление, моделирование, резистор, изолированная нейтраль, катушка, однофазное замыкание на землю.

## OVERVOLTAGE SIMULATION

**M. V. KAMINSKY, A. O. DOBRODEY**

*Educational institution "Sukhoi State Technical University  
of Gomel", the Republic of Belarus*

*Authors present the results of modeling overvoltages in the 10 kV network in the Multisim software complex for different neutral operating modes under different conditions. Oscillograms of phase voltages were obtained for networks: with isolated neutral, neutral, grounded through a resistor, neutral, grounded through an arc suppression reactor, with combined earthing. The obtained results were analyzed at different resistance values of the grounding resistor and arc suppression reactor. The multiplicity of overvoltages for the 10 kV network in various operating modes was calculated. The need for resistive grounding and proper selection of the grounding resistor is clearly shown.*

**Keywords:** overvoltage, resistive earthing, modeling, resistor, isolated neutral, coil, single-phase earth fault.

### **Введение**

Режим заземления нейтрали сетей 6–35 кВ при замыкании на землю определяет величины перенапряжений, которые воздействуют на изоляцию всей электрически связанной сети, и в конечном итоге режим работы нейтрали существенно влияет на исход «аварийного события».

Выбор режима заземления нейтрали в сети 6–35 кВ является важным вопросом при проектировании, эксплуатации и реконструкции электрических распределительных сетей [1].

Режим заземления нейтрали в сети 6–35 кВ определяет:

- ток в месте повреждения и перенапряжения при однофазном замыкании на землю (ОЗЗ);
- схему построения релейной защиты;
- бесперебойность электроснабжения потребителей;
- безопасность персонала и электрооборудования при ОЗЗ.

Также режим работы нейтрали определяет уровень воздействия на изоляцию кабелей, которая крайне чувствительна к высокочастотным перенапряжениям, возни-

кающим при ОЗЗ и коммутациях высоковольтными выключателями, поэтому крайне важно снижать не только уровень перенапряжений, но и длительность путем реализации низкоомного резистивного заземления нейтрали с действием защит от замыканий на землю на отключение.

Таким образом, очевидно, что режим заземления нейтрали в сетях 6–35 кВ влияет на значительное число технических решений, которые реализуются в конкретной сети.

В мире в сетях среднего напряжения используются четыре возможных варианта режима работы нейтрали, а именно:

- изолированная (незаземленная) нейтраль;
- заземленная нейтраль через дугогасящий реактор;
- заземленная нейтраль через резистор (низкоомное и высокоомное заземление);
- режим параллельного включения дугогасящего реактора и резистора – так называемое комбинированное заземление.

До настоящего времени для сетей 6–35 кВ в Республики Беларусь широко применялись системы с изолированной нейтралью и системы с компенсированной через дугогасящий реактор нейтралью, однако в соответствии с [2], [3] на вновь вводимых и реконструируемых подстанциях необходимо применять резистивное заземление нейтрали.

Целью данной работы является моделирование перенапряжений в сети 10 кВ для различных режимов работы нейтрали при различных условиях.

### Изолированная нейтраль

Изолированная нейтраль – нейтраль трансформатора или генератора, не присоединенная к заземляющему устройству или присоединенная к нему через приборы сигнализации, измерения, защиты, заземляющие дугогасящие реакторы и подобные им устройства, имеющие большое сопротивление. К сетям с изолированной нейтралью обычно относятся сети напряжением 6, 10 и 35 кВ [5].

В такой системе при нормальном режиме работы и одинаковых емкостях фаз относительно земли и друг друга при замыкании на землю происходит изменение напряжения на «здоровых» фазах от фазного до линейного. Основными причинами замыкания на землю являются перекрытия или пробой изоляции под воздействием атмосферных перенапряжений, обрыв проводов, набросы.

Система с изолированной нейтралью изображена на рис. 1.

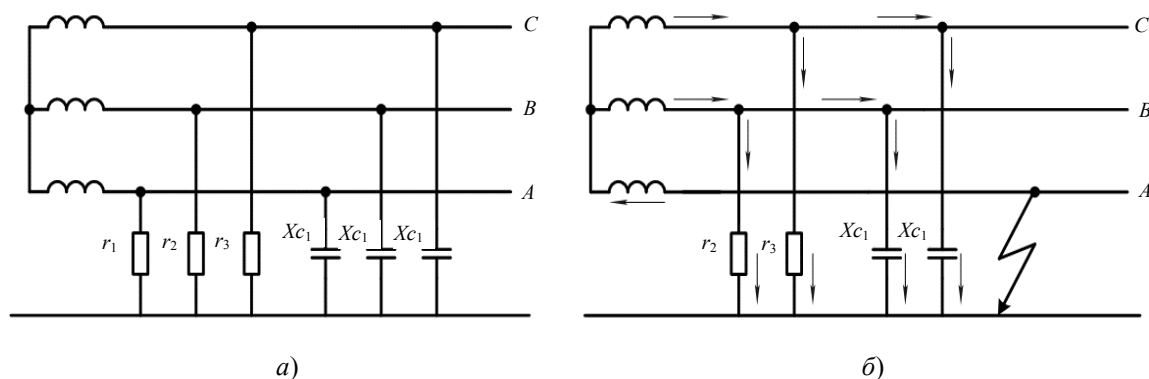


Рис. 1. Система с изолированной нейтралью:

а – в нормальном режиме;

б – в режиме однофазного замыкания на землю

В данной статье моделирование проводилось для сети, изображенной на рис. 2, в программном комплексе Multisim, схема замещения в программном комплексе Multisim представлена на рис. 3.

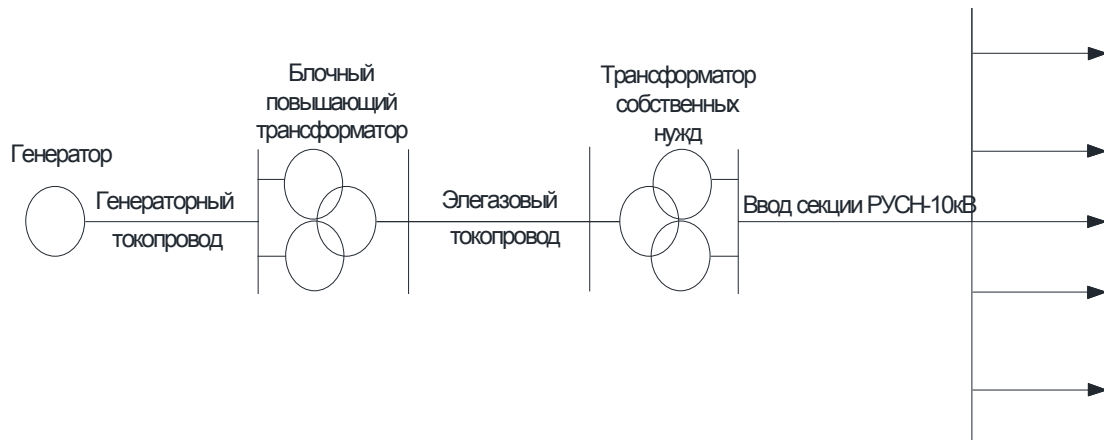


Рис. 2. Исследуемая сеть

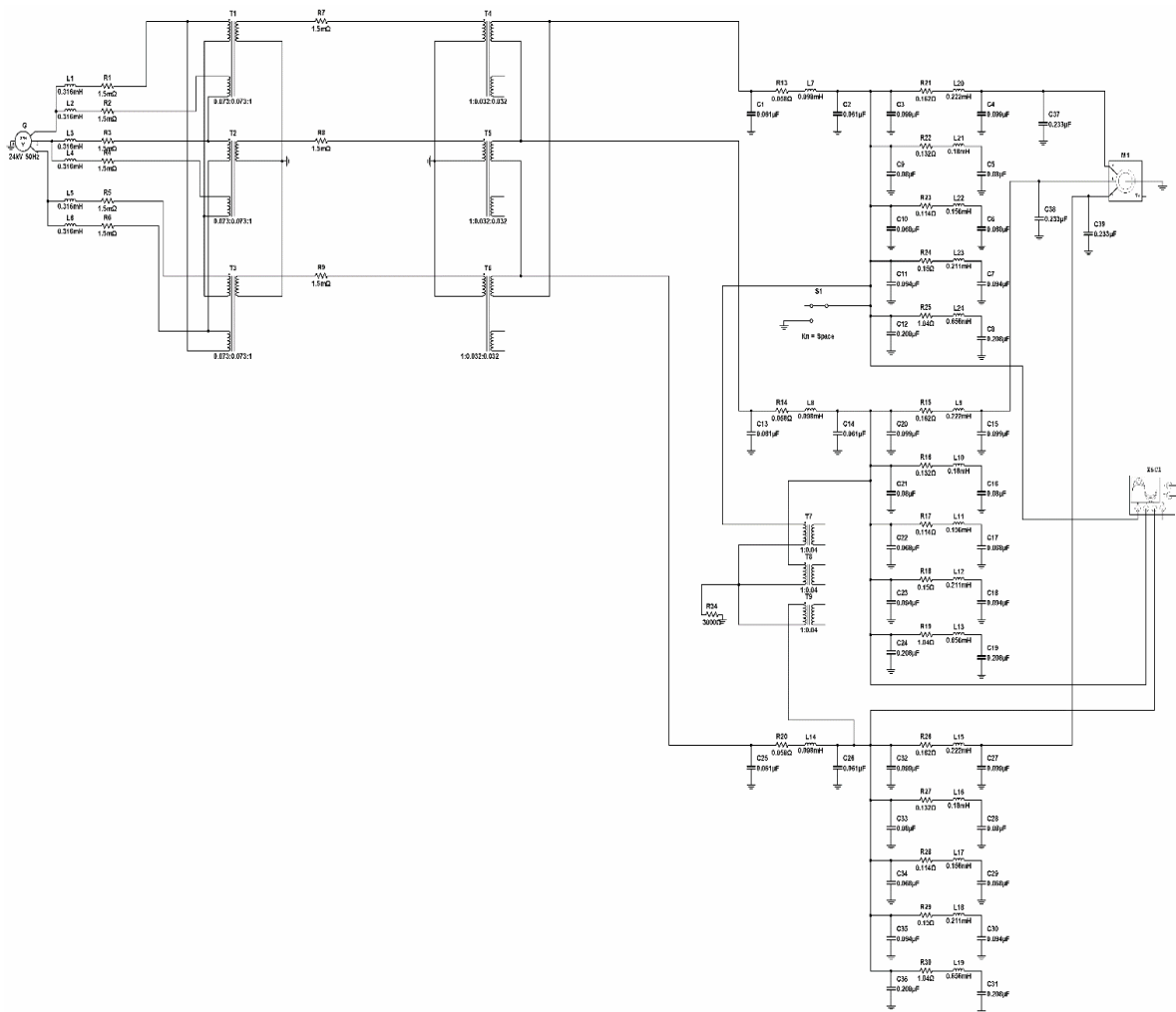


Рис. 3. Схема замещения в программном комплексе Multisim

**Расчет параметров сети**

Используемая схема замещения элементов сети дана на рис. 4.

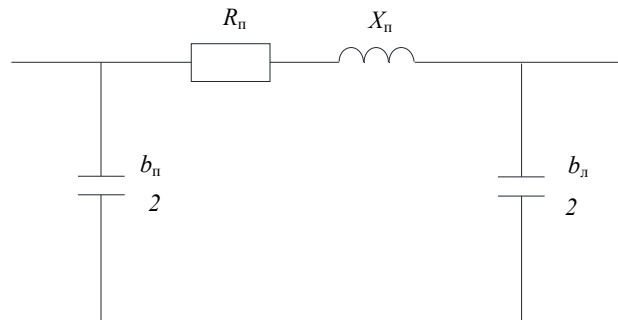


Рис. 4. Схема замещения элементов сети

Для приближенных расчетов допускается ток замыкания на землю кабельных линий рассчитывать по выражению

$$I_{\text{спр}} = I_{\text{суд}} L, \quad (1)$$

где  $I_{\text{суд}}$  – удельный емкостный ток кабельной линии;  $L$  – длина кабельной линии.

Тогда по формуле (1):

$$I_{\text{спр}} = 0,69 \cdot 2 = 1,38 \text{ А.}$$

Суммарный емкостный ток рассчитывается по формуле

$$\sum I_c = 1,1 \cdot \sum I_{\text{сп}i}. \quad (2)$$

Согласно формуле (2):

$$\sum I_c = 1,1(1,38 + 0,73 + 0,54 + 0,61 + 0,76 + 0,0075) = 4,43 \text{ А.}$$

Так как  $\sum I_c < 10 \text{ А}$ , то в заземлении нейтрали используем высокоомное сопротивление.

Зададимся  $K_n = 2,6$  [4].

Емкостное сопротивление определяется по формуле

$$X_c = \frac{U_n \cdot 10^3}{\sum I_c \sqrt{3}}. \quad (3)$$

Тогда по формуле (3):

$$X_c = \frac{10,5 \cdot 10^3}{4,43 \sqrt{3}} = 1368,43 \text{ Ом.}$$

Определяем величину сопротивления резистора:

$$R_N = X_c \frac{K_n - 1}{3,4 - K_n}. \quad (4)$$

Тогда по формуле (4):

$$R_N = 1368,43 \frac{2,6-1}{3,4-2,6} = 2736,87 \text{ Ом.}$$

Принимаем к установке NER-3000.

Уточним значение  $K_n$ :

$$K_n = \frac{2,4R_N}{R_N + X_c} + 1. \quad (5)$$

Согласно формуле (5):

$$K_n = \frac{2,4 \cdot 3000}{3000 + 1368,47} + 1 = 2,64.$$

Рассчитаем мощность трансформатора для цепей резистивного заземления:

$$S_{\text{тр}} = \frac{U_{\text{л}}^2}{3K_{\text{пер}}R_N}. \quad (6)$$

Тогда по формуле (6):

$$S_{\text{тр}} = \frac{10,5^2}{3 \cdot 1,4 \cdot 3000} = 8,75 \text{ кВА.}$$

Принимаем к установке трансформатор ТМГ-25/10.

Результаты моделирования в сети с изолированной нейтралью представлены на рис. 5.

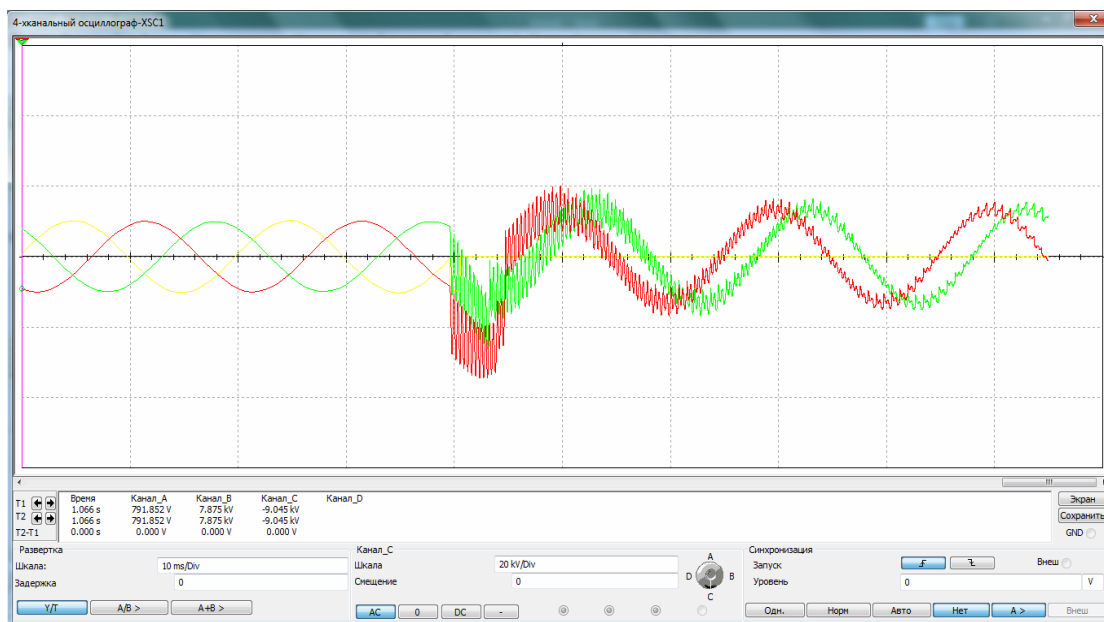


Рис. 5. Осциллограммы фазных напряжений в сети с изолированной нейтралью при однофазном замыкании на землю фазы А

**Резистивное заземление**

Результаты моделирования в сети с нейтралью, заземленной через различные резисторы, приведены на рис. 6–8.

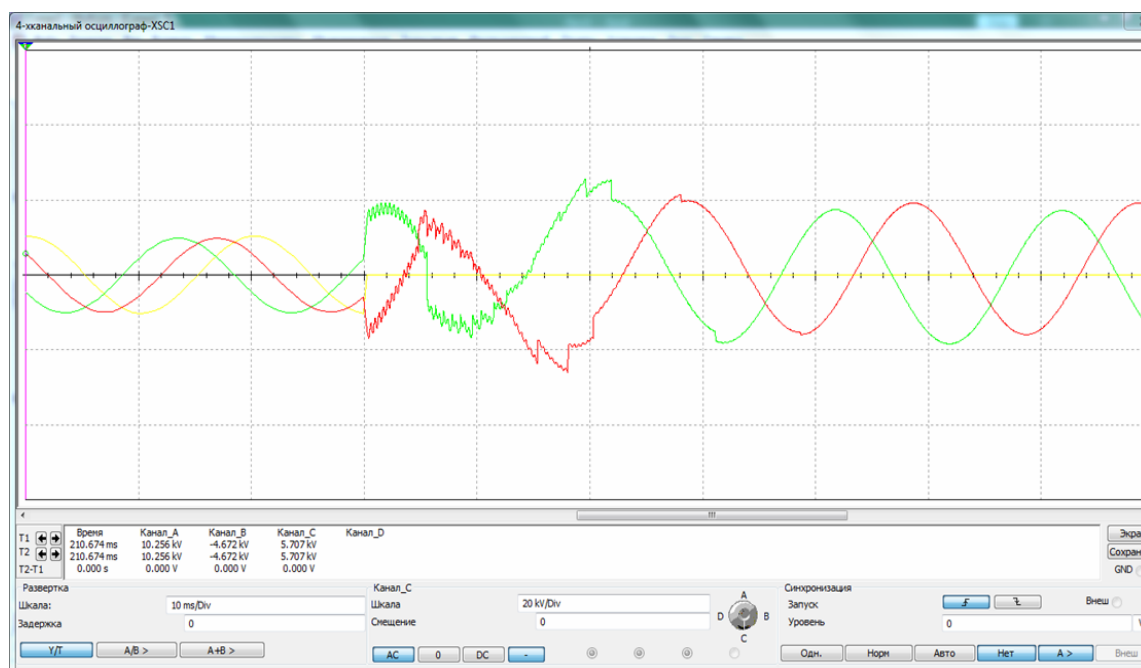


Рис. 6. Осциллограммы фазных напряжений при однофазном замыкании на землю фазы A в сети с заземленной через резистор 3000 Ом нейтралью

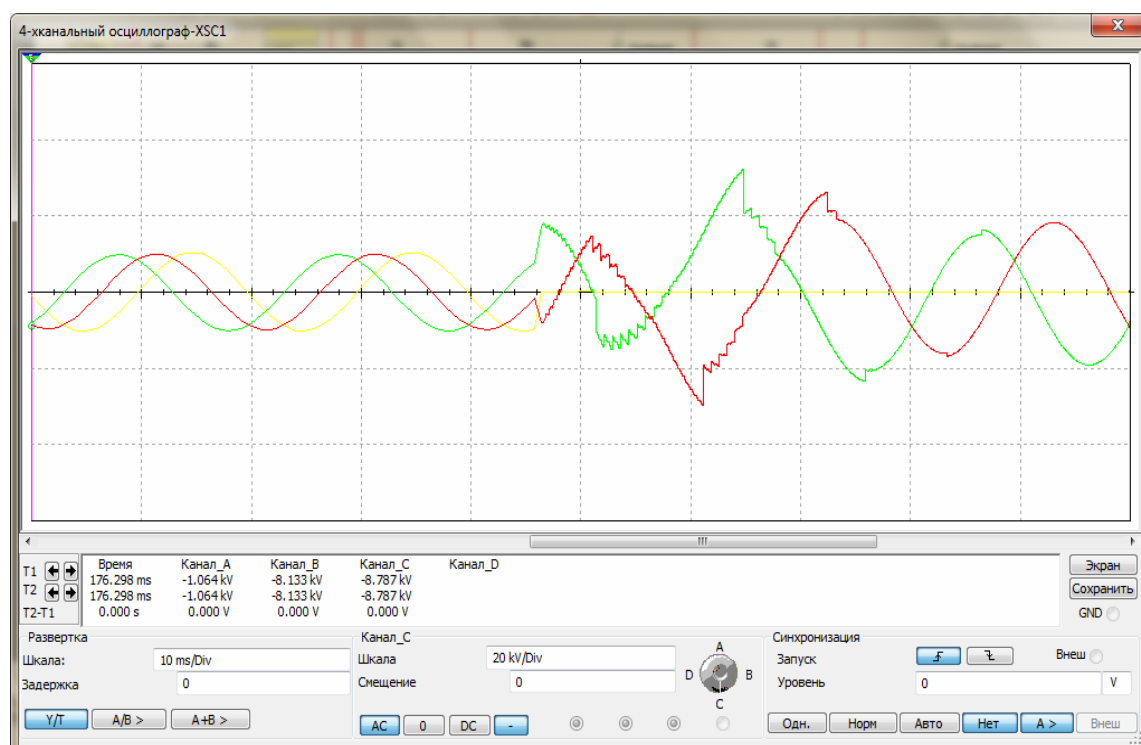


Рис. 7. Осциллограммы фазных напряжений при однофазном замыкании на землю фазы A в сети с заземленной через резистор 2500 Ом нейтралью

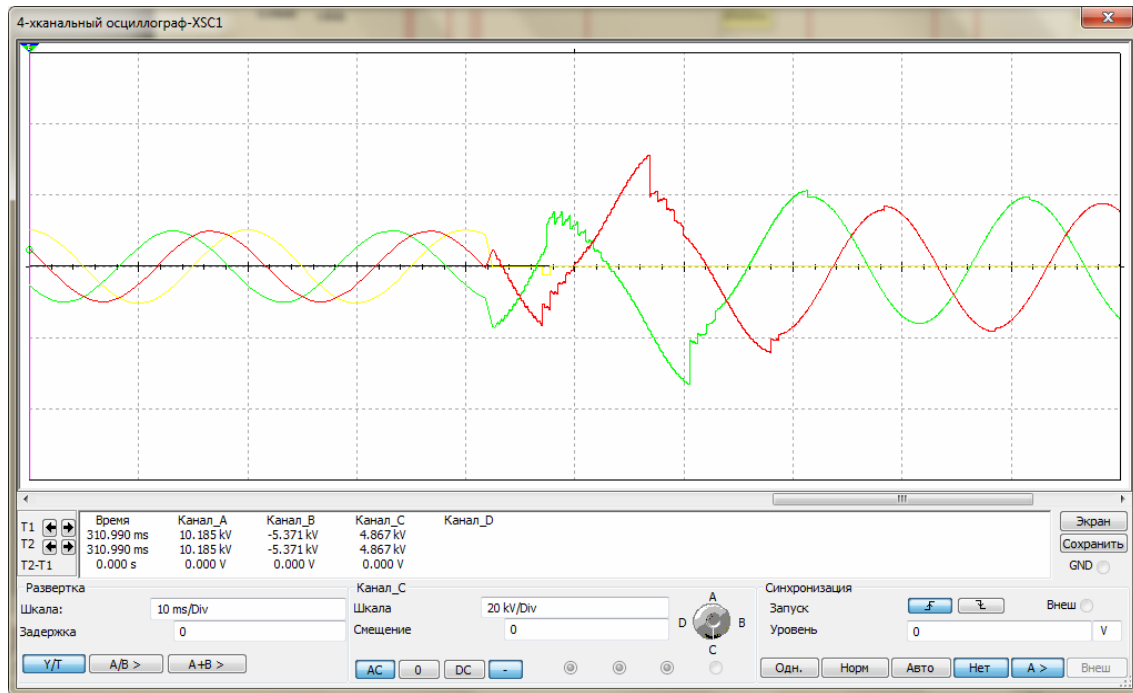


Рис. 8. Осциллограммы фазных напряжений при однофазном замыкании на землю фазы *A* в сети с заземленной через резистор 4000 Ом нейтралью

### Нейтраль заземлена через дугогасящий реактор

Результат моделирования в сети с нейтралью, заземленной через дугогасящий реактор, представлен на рис. 9.

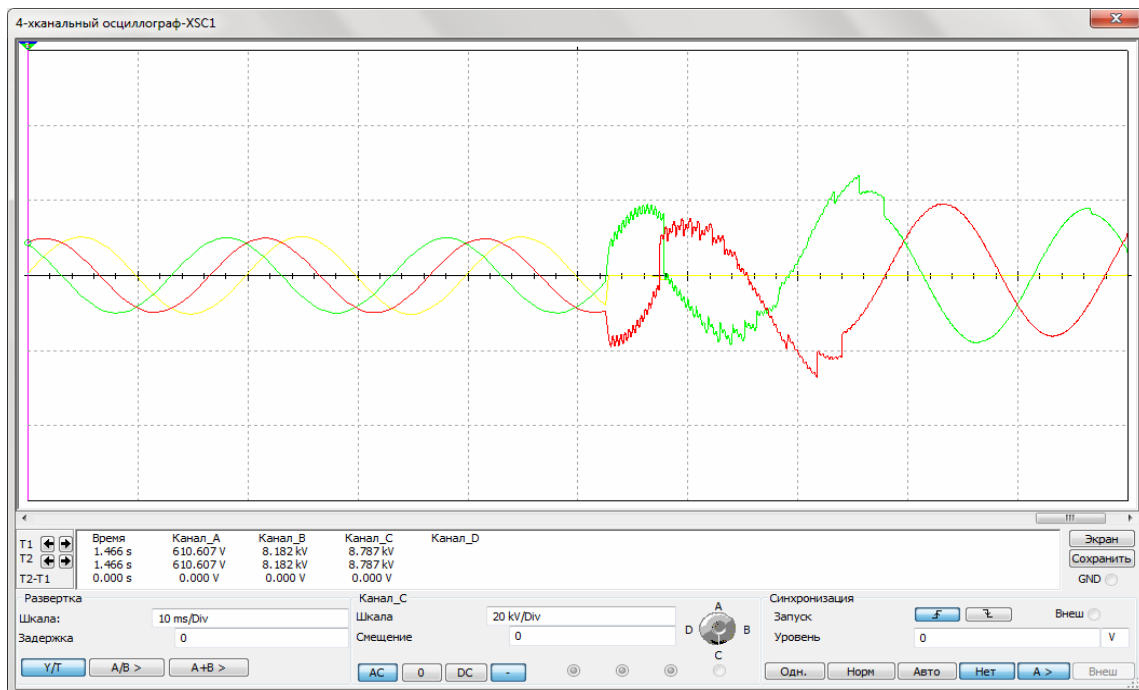


Рис. 9. Осциллограммы фазных напряжений при однофазном замыкании на землю фазы *A* в сети с заземленной через дугогасящий реактор нейтралью

### Комбинированное заземление

Результат моделирования в сети с комбинированным заземлением приведен на рис. 10.

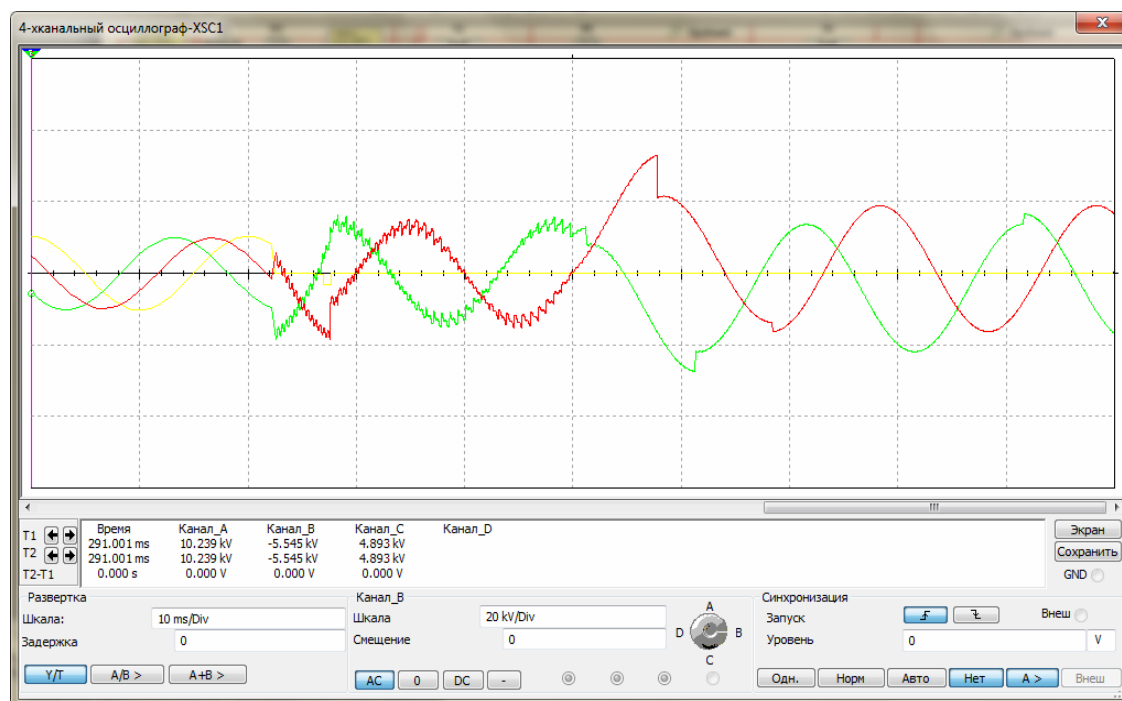


Рис. 10. Осциллограммы фазных напряжений при однофазном замыкании на землю фазы A в сети с заземленной через дугогасящий реактор и резистор 3000 Ом нейтралью

Результаты, полученные в ходе моделирования, сведем в таблицу.

### Результаты моделирования

Параметр	$K_{\Pi}$	$U_{\max}$ , кВ	$U_{\min}$ , кВ	$U_{\max}$ уст., кВ	$U_{\min}$ уст., кВ
Изолированная нейтраль	3,28	20	-34,4	10,5	-10,5
Нейтраль, заземленная через резистор 2500 Ом	3,21	31,48	-29,14	9,8	-9,8
Нейтраль, заземленная через резистор 3000 Ом	2,6	20	-25,98	9,7	-9,7
Нейтраль, заземленная через резистор 4000 Ом	3,16	31,11	-31,11	9,82	-9,82
Нейтраль, заземленная через дугогасящий реактор	2,65	26,4	-26,4	9,98	-9,98
Нейтраль, заземленная через дугогасящий реактор и резистор 3000 Ом	3,33	32,89	-27,32	9,85	-9,85

### Заключение

Выполнено моделирование перенапряжений в сети 10 кВ в программном комплексе Multisim для различных режимов работы нейтрали при различных условиях. Получены осциллограммы фазных напряжений для сетей: с изолированной нейтралью, нейтралью, заземленной через резистор, нейтралью, заземленной через дугога-



сящий реактор, с комбинированным заземлением. Произведен анализ полученных результатов при различных значениях сопротивления резистора заземления и дугогасящего реактора. Осуществлен расчет кратности перенапряжений для исследуемой сети в различных режимах работы. Экспериментально получено, что применение резистора заземления нейтрали, выбранного из стандартного ряда (как наиболее близкого к рассчитанному значению), позволяет снизить кратность перенапряжений до допустимых значений, вследствие чего снижается износ изоляции и уменьшается возможность зарождения частичных разрядов в кабельных линиях.

### Литература

1. Евминов, Л. И. Резистивное заземление нейтрали в распределительных сетях 6–35 кВ / Л. И. Евминов, Т. В. Алферова // Агротехника и энергообеспечение. – 2019. – № 4 (25). – С. 94–109.
2. Правила устройства электроустановок / Изд. 6-е, перераб. и доп. – Минск : Дизайн ПРО, 2007. – 703 с.
3. Правила технической эксплуатации электроустановок потребителей : ТКП 181–2009 (02230). – Минск : Минэнерго, 2009. – 325 с.
4. СТП 09110.20.187-09. Методические указания по заземлению нейтрали сетей 6–35 кВ Белорусской энергосистемы через резистор. – Минск : Белэнергосетьпроект, 2009.
5. Паперный, Л. Е. Учебно-методическое пособие для слушателей курсов повышения квалификации энергетиков и студентов энергетического факультета БНТУ / Л. Е. Паперный, М. В. Алейникова. – Минск : БНТУ, 2016. – 150 с.

*Получено 09.06.2022*