

## СНИЖЕНИЕ ПЕРЕНАПРЯЖЕНИЙ ПРИ ДУГОВЫХ ЗАМЫКАНИЯХ НА ЗЕМЛЮ В СЕТЯХ 6-10 КВ

**А.Н. БОХАН, В.В. КРОТЕНОК**

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

Причиной значительной доли отказов в сетях 6-10 кВ являются внутренние перенапряжения, которые возникают при таких видах электромагнитных переходных процессов, как дуговые, феррорезонансные и коммутационные.

Высоковольтные электродвигатели, работающие в системе собственных нужд электростанций, а также в системах электроснабжения промышленных предприятий оказывают взаимное влияние на систему электроснабжения. Переходные процессы, возникающие при коммутациях электродвигателей, а также при различных видах замыканий на землю могут быть причиной значительных перенапряжений.

Величины перенапряжений и характер их протекания зависят от многочисленных факторов: режима заземления нейтрали, эквивалентной емкости сети на землю, типа коммутационного аппарата, характера замыкания на землю и т. п.

Ресурс работы высоковольтных электродвигателей зависит не только от тепловых режимов электродвигателей, количества и условий пуска, но и характера переходных процессов, которые могут быть причиной значительных перенапряжений.

Анализ выполненных исследований показывает, что наибольшие уровни внутренних перенапряжений наблюдаются в сетях с малыми емкостными токами замыкания на землю [1-3]. К таким сетям относятся собственные нужды блочных электростанций, системы электроснабжения нефтеперекачивающих станций и систем водоснабжения. Характерной особенностью приведенных выше сетей является то, что основную нагрузку составляют высоковольтные электродвигатели (как правило, 6 кВ).

В настоящее время для снижения перенапряжений в подобных сетях находит применение резистивное заземление нейтрали. Это позволяет, при оптимальных параметрах заземляющего резистора, обеспечивать высокую чувствительность защиты от замыканий на землю и уменьшить возникающие перенапряжения.

Установка высокоомного резистора  $R_N$  в нейтрали системы (как правило в нейтрали специального вспомогательного трансформатора мощностью не менее  $S = U_{ном}^2 / (3 \cdot R_N)$ ) обеспечивает стекание заряда нулевой последовательности за время  $T$  между ближайшими замыканиями, составляющее полупериод промышленной частоты ( $T = 0,01$  с). Исходя из выражения постоянной времени  $T = R_N \cdot 3C$  и, полагая практически полное стекание заряда, за время  $t = 3T$  с, получаем выражение для сопротивления

$$R_N = \frac{0,01}{9 \cdot C} . \quad (1)$$

На практике для заземления нейтрали находят применение резисторы сопротивлением 100-150 Ом. При этих условиях для обеспечения термической стойкости резисторов, отключение замыканий на землю должно происходить без значительной выдержки времени. Эффективное снижение перенапряжений при резистивном заземлении нейтрали зависит не только от величины, но и места заземления и в отдельных случаях может привести к противоположному эффекту [4].

Для исследования внутренних перенапряжений в сети с различным способом заземления нейтрали предлагается схема рис. 1. Здесь  $R_T, X_T$  – активное, индуктивное сопротивление трансформатора,  $R_T, X_T$  – параметры вспомогательного трансформатора,  $R_L, X_L$  – активное, индуктивное сопротивление кабельной линии,  $C_\phi$  – емкость между жилами кабеля,  $C_3, G$  – емкостная и активная проводимости на землю,  $Q$  – выключатель,  $K$  – ключ моделирующий короткое замыкание фазы  $A$  на землю. Расчеты переходных процессов для этой схемы замещения выполнялись с помощью программного комплекса Matlab 6.0.

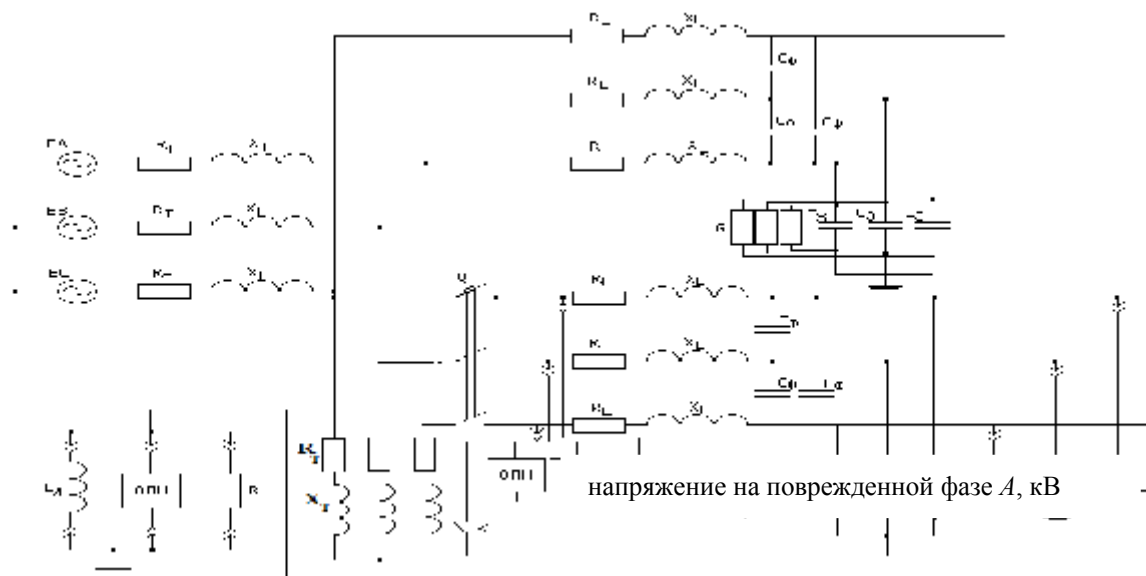


Рис. 1. Расчетная схема сети для анализа дуговых и коммутационных перенапряжений

Выполнен расчет переходного процесса в цепи собственных нужд энергоблока 200 МВт с емкостным током замыкания на землю 2,3 А. На рис. 2 приведена расчетная осциллограмма изменения напряжений, где момент первого замыкания на землю происходит при максимуме фазного напряжения. Как видно из рис. 2, максимальные перенапряжения на неповрежденных фазах составляют 2,28 о. е. Значения максимальных перенапряжений, которые могут возникать каждый полупериод промышленной частоты, зависит от пробивного напряжения ослабленного места, которое, в свою очередь, зависит от прочности промежутка и длительности горения дуги. Замыкание и гашение дуги приводит к появлению напряжения смещения нейтрали, в данном расчете амплитуда перенапряжения в нейтрали вследствие переходного процесса составила 1,387 о.е.

На рис. 3 приведены расчетные кривые зависимости максимальной кратности перенапряжения от сопротивления заземляющего резистора при неизменной емкости сети (1) и от емкости сети при  $R_N = \text{const}$  (2). Кривая 1 показывает, что в сети с базовой емкостью  $C_0 = 2,73$  мкФ наличие резистора существенно снижает напряжения. Кривые 2-4 отражают закономерность увеличения перенапряжений с уменьшением емкости сети. При малых значениях емкости сети, для конкретного расчетного эксперимента, наблюдаются более значительное снижение перенапряжений при резистивном заземлении нейтрали. В целом, полученные результаты исследований, при сопоставимых условиях, близки результатам вычислительного эксперимента представленного в работе [2].

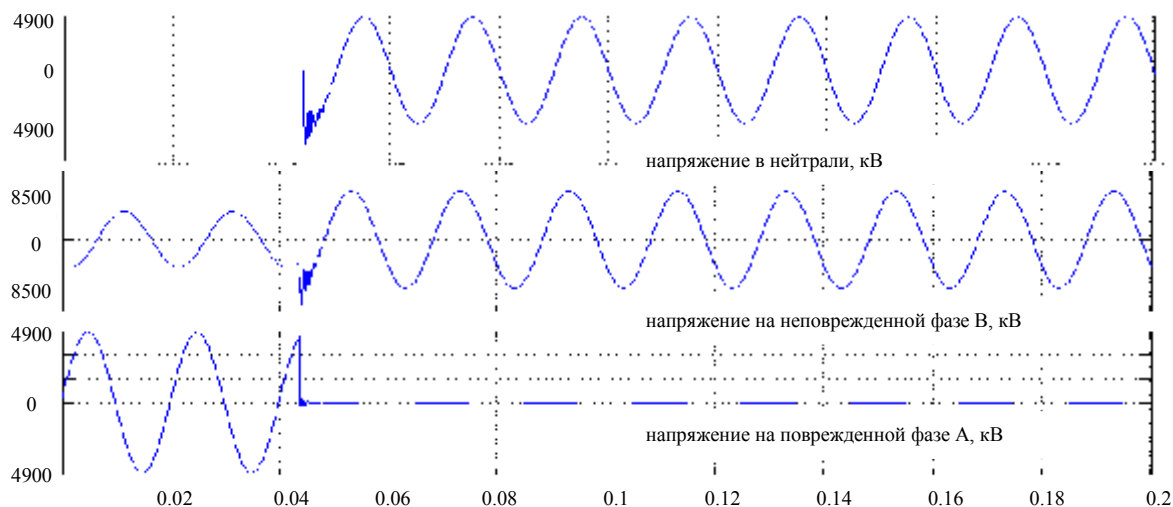


Рис. 2. Дуговое замыкание в сети 6 кВ с емкостным током замыкания 2,3 А: (изолированная нейтраль)

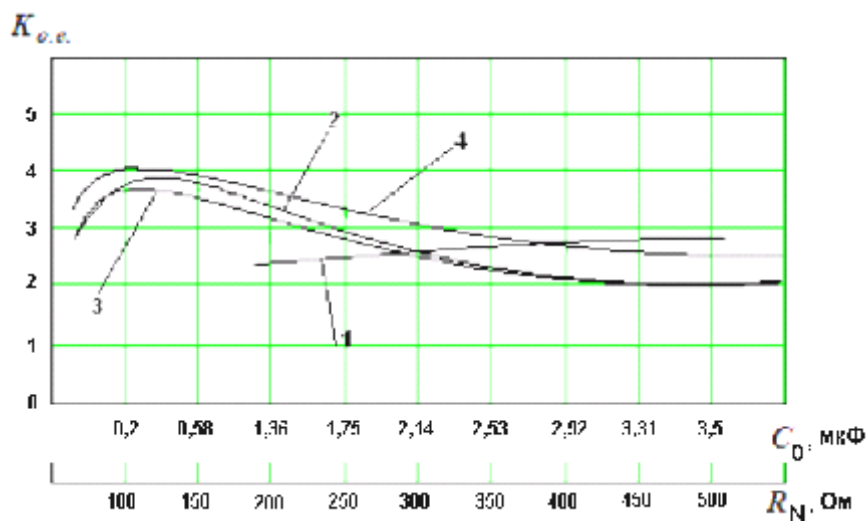


Рис. 3. Расчетные зависимости кратности перенапряжения от сопротивления заземляющего резистора и емкости сети: 1- $K = f(R_N)$  при  $C_0 = 2,73 \cdot 10^{-6}$  Ф; 2- $K = f(C_0)$  при  $R_N = 400$  Ом; 3- $K = f(C_0)$  при  $R_N = 150$  Ом; 4- $K = f(C_0)$  при изолированной нейтрали

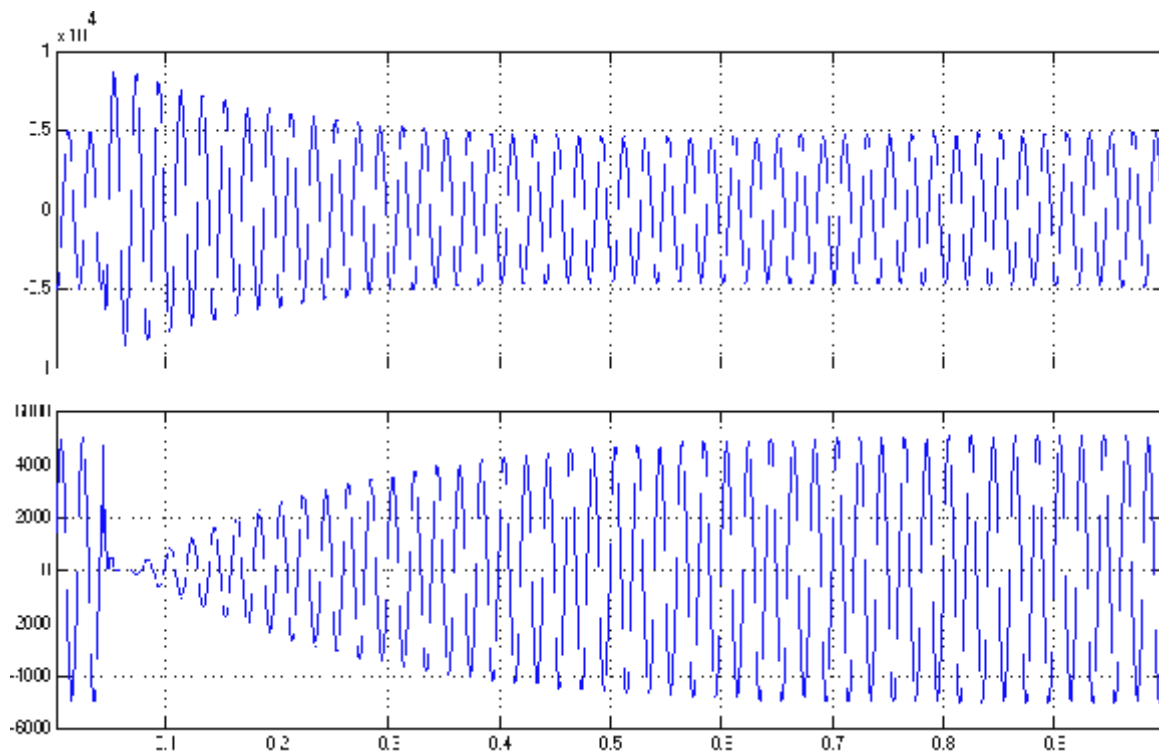
В сетях с большими значениями емкостей фаз на землю, как правило, применяется их компенсация с помощью дугогасительного реактора. При этом характер протекания переходных процессов имеет существенные отличия. Отклонение параметров реактора от резонансной настройки приводит не только к увеличению в месте замыкания составляющей тока промышленной частоты, но она также ухудшает картину возникающих перенапряжений при замыкании на землю.

Выполнено исследование переходных процессов для системы собственных нужд Мозырской ТЭЦ. Исследован переходный процесс на 2-й секции ГРУ, где емкостные токи замыкания на землю составляют 68 А, а емкость на землю  $5,14 \cdot 10^{-6}$  Ф. приведены расчетные кривые на рис. 4. Компенсация емкостных токов 2-й секции осуществлялась двумя реакторами. Компенсационные токи реакторов составляют, соответственно, 20 и 48 А. Установленная мощность вспомогательного трансформатора – 160 кВА.

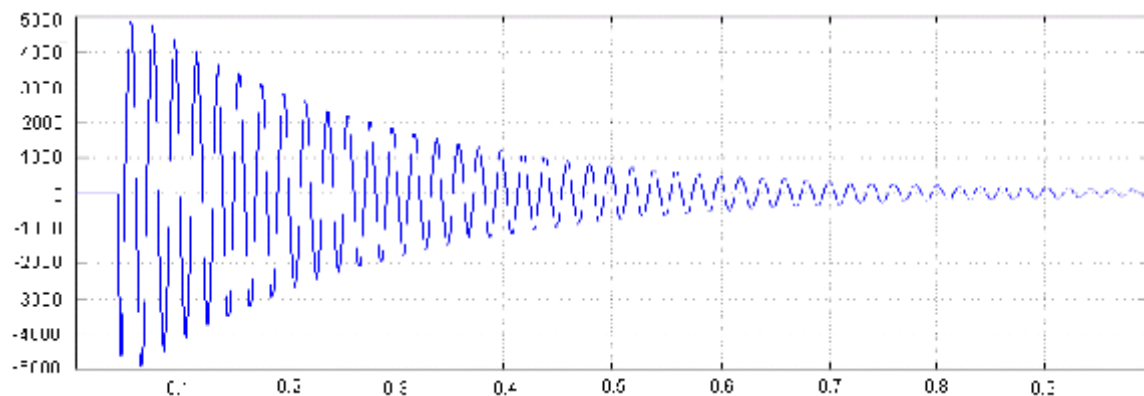
Как видно из рис. 4, пробой изоляции приводит к возникновению биений (низкочастотных колебаний), сопровождающихся перенапряжениями. Значения максимальных перенапряжений, которые могут возникать каждый полупериод промышленной частоты, зависит от пробивного напряжения ослабленного места, которое, в

свою очередь зависит от прочности промежутка и длительности горения дуги. Затухание колебаний определяется значениями активных сопротивлений (постоянной времени) расчетной схемы замещения.

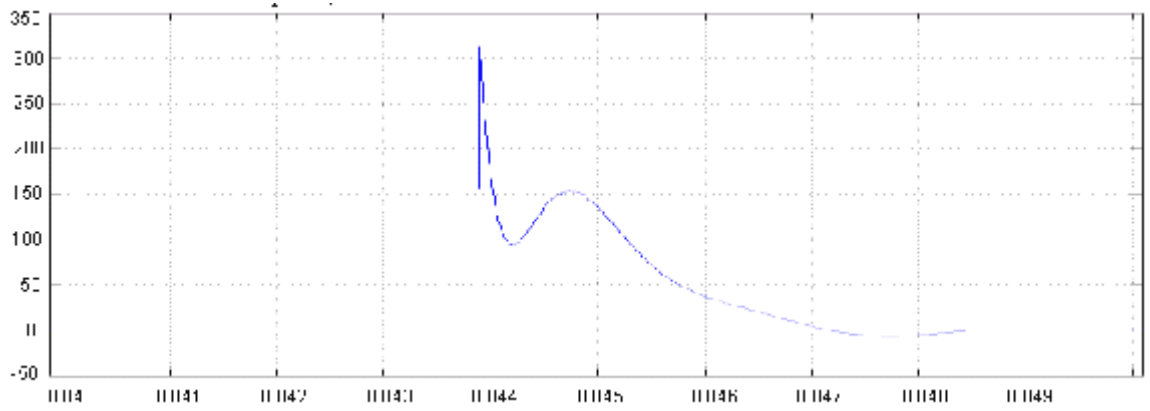
При расстройке дугогасительного реактора (рис. 5) амплитуда биений увеличивается, и перенапряжения могут достигать таких же значений, как и в системе собственных нужд блочных электростанций, с относительно малыми емкостными токами замыкания на землю.



а) соответственно напряжение на неповрежденной и поврежденной фазах;

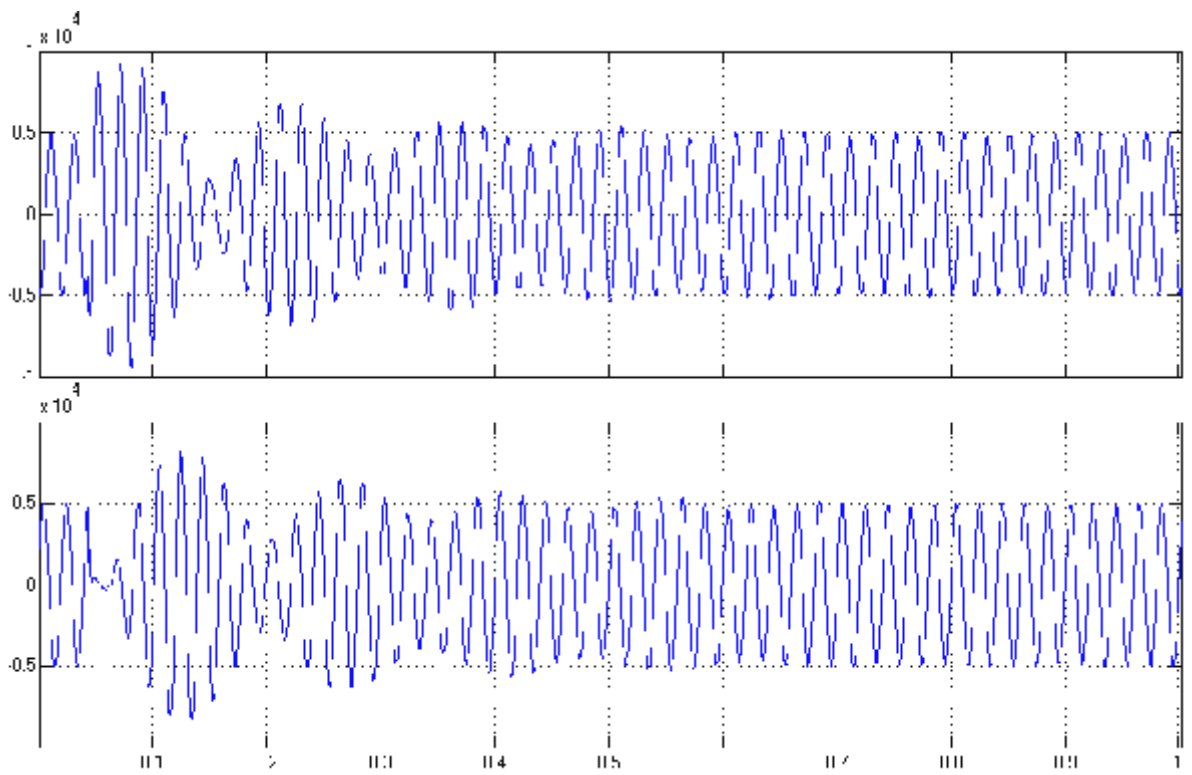


б) напряжение в нейтрали;

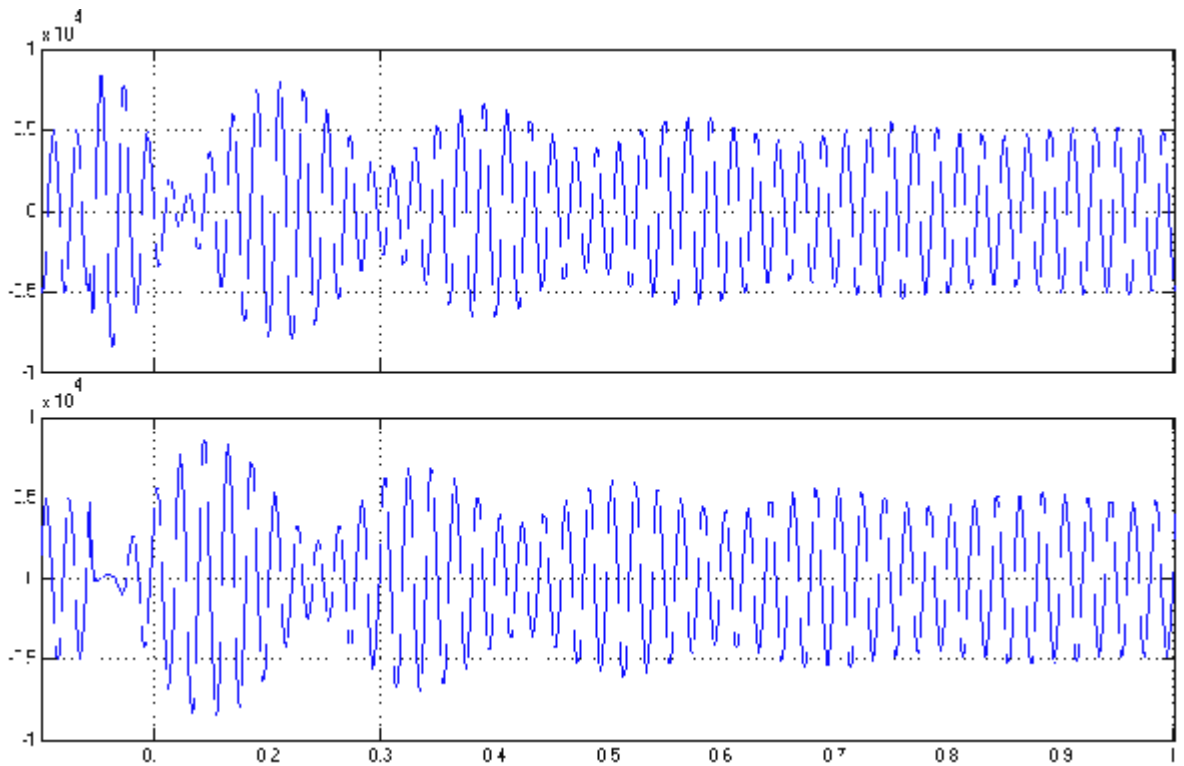


в) ток в месте замыкания

Рис. 4. Расчетная осциллограмма переходного процесса в сети с компенсированной нейтралью ( $I_s = 68$  А) при однократном замыкании на землю



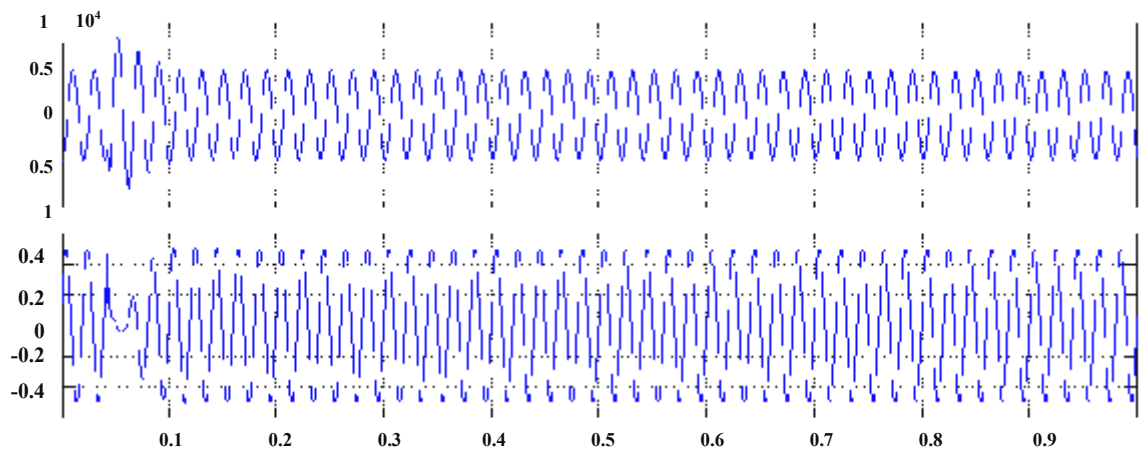
а) напряжение на фазах В и А (ток компенсации 75 %)



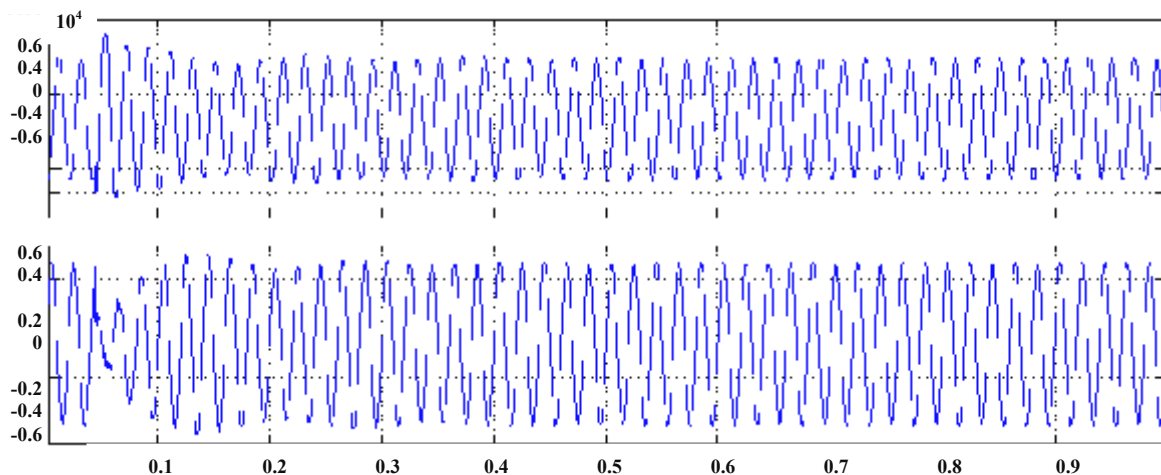
б) напряжение на фазах В и А (ток компенсации составляет 125 %)

Рис. 5. Переходный процесс в сети при расстройке дугогасительной катушки

Снижение перенапряжений в сети при расстройке дугогасящего реактора (а также при несимметричных режимах, сопровождающихся резонансным перенапряжением) может быть достигнуто путем применения высокоомного резистора, включенного параллельно дугогасящему реактору [1]. Рекомендуемое сопротивление резистора определяется величиной нескомпенсированного тока замыкания на землю. При большой емкости сети уменьшается сопротивление резистора, тем самым труднее обеспечить его термическую стойкость в момент переходного процесса. Переходный процесс при включении высокоомного резистора представлен на рис. 6а. Применение резистора приводит к уменьшению перенапряжений, но увеличивает ток в месте замыкания и создает условия для развития повреждения.



а) параллельно реактору включен резистор  $\Delta I_3 = 17 \text{ A}$ ,  $R_N = 203 \text{ Ом}$



б) параллельно реактору установлен ОПН

*Рис. 6.* Переходный процесс в компенсированной сети при расстройке ДГК (ток компенсации составляет 75 %): а) параллельно реактору включен резистор; б) параллельно реактору включен ОПН

Эффективным средством снижения перенапряжений в распределительных сетях являются ограничители перенапряжений нелинейные (ОПН). Выбор ОПН в сетях с изолированной или заземленной через дугогасящий реактор нейтралью, где не предусмотрено отключение релейной защитой однофазных повреждений, сводится в основном к обеспечению его работоспособности в условиях возможных длительных однофазных замыканий в сети. Особую опасность представляют многократные дуговые замыкания на землю. Должны быть исключены резонансные перенапряжения, которые могут вывести ОПН из строя.

Сохранить свойства изолированной нейтрали сети, а также обеспечить эффективное ограничение возникающих перенапряжений переходного процесса, можно установкой ОПН в нейтраль, через вспомогательный трансформатор. Целесообразна установка ОПН параллельно включаемому в нейтраль резистору ДГР. На рис. 6б приведена расчетная осциллограмма переходного процесса при включении ОПН, рассчитанного на фазное напряжение, параллельно дугогасительному реактору.

При моделировании переходных процессов в сети с ОПН должны учитываться его динамические параметры, определяемые на основании коммутационного испытательного импульса и статической вольтамперной характеристики. Сравнительный анализ результатов экспериментальных исследований перенапряжений в распределительных сетях с ОПН и при компьютерном моделировании показывает, что уровень максимальных перенапряжений на практике и в экспериментах выше, чем при численном моделировании [3]. Объяснить это можно не только различными условиями проведения натурального и вычислительного эксперимента, но и не полным учетом динамических параметров ОПН.

### **Выводы**

1. Разработанная компьютерная модель распределительной сети с ОПН позволяет исследовать перенапряжения в сети при замыканиях на землю. Результаты моделирования переходных процессов сопоставимы с исследованиями, представленными в работах [1, 2, 4].

2. Включение в нейтраль сети, параллельно дугогасительному реактору, ОПН позволяет уменьшить перенапряжения. При этом возникают более благоприятные условия для погасания дуги в месте замыкания, а также увеличивается возможная длительность однофазных замыканий в сети.

### Список литературы

1. Евдокунин Г.А., Тилер Г. Современная вакуумная коммутационная техника для сетей среднего напряжения (технические преимущества и эксплуатационные характеристики). – СПб: Издательство Сизова М.П., 2000. – 114 с.: ил.
2. Дударев Л.Е., Волошек И.В. Выбор сопротивления резистора в нейтрали сетей 6-10 кВ //Промышленная энергетика. – 1989. – № 6.
3. Беляков Н.Н., Кузьмичева К.И., Ивановски А. Ограничение перенапряжений при замыканиях на землю в сети 6 кВ собственных нужд с помощью ОПН. ВНИИЭ. – Институт энергетики Варшавы, ПНР.
4. Сивокобыленко В.Ф., Дергилев М.П., Иванов С.А., Балашов В.М. Ограничение перенапряжений в системе собственных нужд электростанций. – Донецкий государственный технический университет. – Кураховская ГРЭС.

*Получено 13.02.2004 г.*