

Ю.Н. ВЕПРИК, д-р. техн. наук, проф. НТУ «ХПИ»

РЕЖИМЫ НЕЙТРАЛИ ЭЛЕКТРИЧЕСКИХ СЕТЕЙ 6-10 кВ

В работе представлены результаты исследований электромагнитных переходных процессов и эффективности применяемых средств ограничения емкостных токов и перенапряжений при однофазных замыканиях на землю в электрических сетях 6-10 кВ с различными режимами нейтрали.

В роботі представлені результати досліджень електромагнітних перехідних процесів та ефективності застосовуваних засобів обмеження ємнісних струмів і перенапруг при однофазних замиканнях на землю в електричних мережах 6-10 кВ з різними режимами нейтралі.

The paper presents the results of studies of electromagnetic transients in power networks 6-10 kV with different modes of neutral and means of limiting the effectiveness of capacitive currents and surge in single-phase ground faults.

Постановка проблемы. В электрических сетях 6–10 кВ принципиально возможны различные способы заземления нейтрали (изолированная, заземленная через дугогасящий реактор (ДГР), низкоомный или высокоомный резисторы). В Украине сети 6–10 кВ работают либо с изолированной нейтралью, либо с компенсацией емкостного тока замыкания на землю. Причем работают в условиях, когда какие-либо средства ограничения токов и напряжений при однофазных замыканиях на землю (ОЗЗ) практически отсутствуют, поэтому высокая аварийность характерна как для тех, так и для других сетей. В России в соответствии с последней редакцией ПУЭ предусмотрена возможность работы сетей 6–35 кВ и с резистивным заземлением нейтрали. И в Украине предлагается внести изменения в соответствующие статьи действующих сегодня ПУЭ, касающиеся режимов работы нейтрали сетей 6–35 кВ.

Однако вопросы о том, какому способу заземления и при каких условиях отдать предпочтение, какие средства ограничения токов ОЗЗ и перенапряжений при этом использовать, как выбирать их параметры и др. активно обсуждаются, предлагаются их различные решения, но эффект от внедрения принятых решений оказывается, как свидетельствуют публикации, далеко не всегда положительным. Необходимый опыт в решении этих вопросов могли бы дать либо широкомасштабные экспериментальные исследования, либо длительная проверка в условиях эксплуатации. Однако возможности проведения экспериментов на действующем оборудовании ограничены, а часто – практически

исключены, а для принятия решений по результатам опыта эксплуатации требуется длительное время.

В то же время при современном уровне развития средств вычислительной техники широкомасштабные исследования могут быть реализованы с применением методов математического моделирования и компьютеров. Для проведения таких исследований необходимо иметь полные и точные модели, учитывающие все основные, важные для рассматриваемой задачи, свойства и характеристики сетей – их реальные схемы и режимы, способы заземления нейтрали, конфигурацию и состав оборудования, емкостные и индуктивные параметры элементов сети, нелинейные характеристики защитных аппаратов и другие факторы. Но такие модели в настоящее время отсутствуют, а имеющиеся ориентированы на учет ограниченного числа факторов и не могут обеспечить решение такого широкого круга задач.

Анализ последних исследований и публикаций. В опубликованных работах, использующих математическое моделирование и вычислительную технику для исследования переходных процессов, происходящих при замыканиях фазы на землю в сетях 6–10 кВ, рассматриваются, как правило, упрощенные эквивалентные схемы замещения сетей, применение которых приводит к тому, что результаты теоретических исследований, выполненных разными авторами и организациями, противоречивы. Так, например, по поводу применения резисторов в одних работах говорится о «...необходимости перевода электрических сетей 6-35 кВ различного конструктивного исполнения и назначения на режим резистивного заземления нейтрали» [3], в других, наоборот, столь же категорично утверждается, что «...включение высокоомных резисторов для защиты от перенапряжений совершенно нецелесообразно» [4]. Та же ситуация и с другими средствами ограничения емкостных токов и перенапряжений.

Опыт же практического использования предлагаемых средств показывает, что в зависимости от конкретных условий реализации эффект от применения каждого из них оказывается либо положительным, либо отрицательным. Такую ситуацию следует рассматривать как свидетельство того, что принципиальная возможность применения соответствующих средств имеется (при наличии положительных результатов), но необходима работа по выявлению и уточнению условий, при которых применение того или иного способа может дать положительный эффект.

А отрицательный опыт применения тех или иных средств можно рассматривать и как результат неправильного их использования или неудачной технической реализации, и как свидетельство того, что вопросы выбора средств ограничения и режима нейтрали еще недостаточно изучены. Поэтому сообщения о том, что для настройки ДГР

«перепробованы все известные принципы регулирования (амплитудный, фазовый, ШИМ-модуляции, непромышленной частоты и др.), однако ни один не дал искомого результатов» [1] можно рассматривать как подтверждение необходимости в разработке более точных и адекватных моделей для определения области применения различных способов заземления нейтрали и поиска эффективных средств ограничения токов и перенапряжений при ОЗЗ в электрических сетях 6–10 кВ.

Цель, задачи исследования. Для определения путей повышения эффективности средств ограничения перенапряжений и токов при ОЗЗ в кабельных сетях 6–10 кВ необходимо сначала выяснить причины низкой эффективности тех средств, которые применяются. Упрощенными моделями на основе однофазных эквивалентов, не отражающими целый ряд особенностей как самих сетей, так и протекающих в них переходных процессов, эта задача не решается. Базовая модель [2], основанная на представлении элементов сети не однофазными эквивалентами, а трехфазными многополюсниками и уравнениями в фазных координатах, позволяет учитывать реальную конфигурацию сети, параметры элементов сети (активные сопротивления, собственные и взаимные индуктивности и емкости фаз) и параметры ее режима (токи, напряжения, мощности фаз), способ заземления нейтрали и воспроизводить электромагнитные переходные процессы при симметричных и несимметричных повреждениях в электрических сетях произвольной конфигурации. Поэтому с целью выявления факторов, снижающих эффективность применяемых средств ограничения емкостных токов и перенапряжений, исследования режимов работы кабельных сетей 6-10 кВ выполнены с применением этой модели.

Основной материал исследований. Емкостные токи и перенапряжения при однофазных замыканиях на землю в распределительных электрических сетях, количественные характеристики и характер электромагнитных переходных процессов зависят от схемы и режима сети, параметров и суммарной длины линий, от способа заземления нейтрали, от параметров индуктивных (ДГР) или резистивных (R) элементов в нейтрали трансформаторов. Для определения основных влияющих факторов, степени их влияния и оценки возможности повышения эффективности применяемых средств, а также для иллюстрации возможностей разработанных программных средств ниже в качестве расчетных рассмотрены четыре характерных схемы, различающихся суммарной длиной кабельных линий (табл. 1).

Таблица 1 – Характеристика расчетных схем

Номер схемы	Суммарная длина, км	Эквивалентное сопротивление, Ом	Ток ОЗЗ, А	Количество узлов
1	21,5	$5,0 - j637,0$	$j15^0 +$	21
2	41,6	$8,1 - j220,2$	$j45^3 +$	54
3	62,5	$8,8 - j140,1$	$j72^9 +$	76
4	85,3	$8,9 - j103,9$	$j96^{15} +$	93

Суммарные длины кабельных сетей в рассмотренных схемах (от 20 до 80 км) охватывают диапазон изменения протяженности реальных сетей. В каждой из схем кроме основного силового трансформатора имеется дополнительный трансформатор со схемой соединения обмоток Y/Δ, нейтраль которого может быть изолирована, заземлена через реактор (резонансное заземление) или резистор (резистивное заземление).

Для каждой из схем с учетом ее реальной конфигурации с применением разработанной математической модели выполнены расчеты электромагнитных переходных процессов при ОЗЗ. Моделирование переходных процессов выполнено путем численного интегрирования систем дифференциальных уравнений неявными методами, порядок решаемых систем дифференциальных уравнений равен утроенному количеству трехфазных узлов сети, в процессе численного интегрирования определяются мгновенные значения напряжений и токов (в виде цифrogramм) во всех узлах и ветвях сети, шаг интегрирования $h = 0,05-0,1$ мс. В расчетах варьировались: режим нейтрали (изолированная, заземленная), способ заземления (через реактор, через резистор, смешанное), величины сопротивлений реактора и резистора, сопротивление в точке замыкания, место точки замыкания и ее удаленность от шин источника питания – для исследования влияния этих факторов на токи ОЗЗ, уровни перенапряжений, эквивалентное сопротивление сети, напряжение смещения нейтрали. Значения сопротивлений реактора или резистора в нейтрали изменялись от нуля до бесконечности, чем охватывается весь возможный диапазон способов заземления нейтрали – глухозаземленная (при $Z_n = 0$), компенсированная (при $I_3 = 0$), с низкоомным и высокоомным заземлением (при $R_n = 100-1000$ Ом), изолированная (при $Z_n = \infty$).

Электромагнитные переходные процессы при замыканиях на землю в сетях с изолированной нейтралью В сетях с изолированной нейтралью и

при их небольшой протяженности (до 10-20 км) ток однофазного замыкания составляет всего несколько ампер, замыкание фазы на землю в одной точке не является аварийным режимом, не требует немедленного отключения, и при емкостных токах до 10–30 А допускается ПУЭ в течение некоторого времени, достаточного для принятия мер по его устранению. Однако по мере развития электрических сетей их протяженность увеличивается и исторически сложившаяся ситуация состоит в том, что с изолированной нейтралью продолжают работать сети с суммарной протяженностью до 80-90 км. Поэтому для выявления условий работы оборудования при ОЗЗ в исследованиях электромагнитных переходных процессов в сетях с изолированной нейтралью также принят диапазон длин от 20 до 80 км.

В расчетах электромагнитных переходных процессов при однофазных замыканиях на землю в сетях с изолированной нейтралью варьировались удаленность места повреждения от источника питания, сопротивление в месте замыкания, вид замыкания (металлическое, через сопротивление, дуговые). Некоторые из полученных цифrogramм для иллюстрации представлены на рис. 1 и 2. При отсутствии экспериментальных данных, осциллограмм [1], математическое моделирование является практически единственной реальной возможностью восполнить этот пробел.

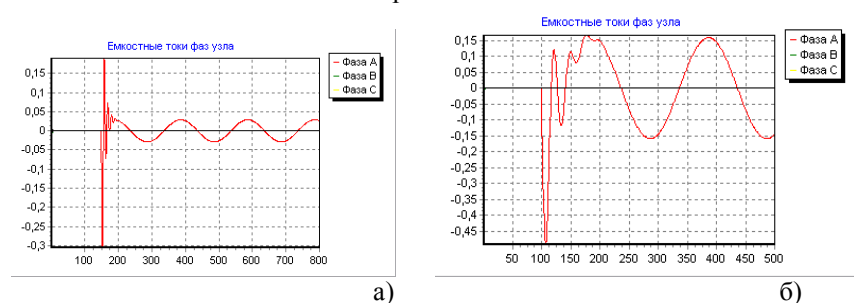


Рис. 1 – Токи ОЗЗ в схемах №1 (а), и № 4 (б)

По оси абсцисс на цифrogramмах откладывается номер шага интегрирования h , по оси ординат – токи (кА) и напряжения (кВ). Поврежденной принята фаза А.

Токи замыканий на землю в установившихся режимах ОЗЗ зависят от протяженности сети и достигают значений: для некомпенсированной сети протяженностью 23,1 км – 25 А, длиной 41,3 км – 70 А, длиной 60,6 км – 100 А, длиной 81,5 км – 160 А. Протяженность сети и начальная фаза замыканий на землю существенно влияют и на величину начальных импульсов тока в момент замыкания: в зависимости от фазы напряжения в момент возникновения однофазного замыкания начальные импульсы тока с увеличением протяженности сети изменяются от 200А до 1100А.

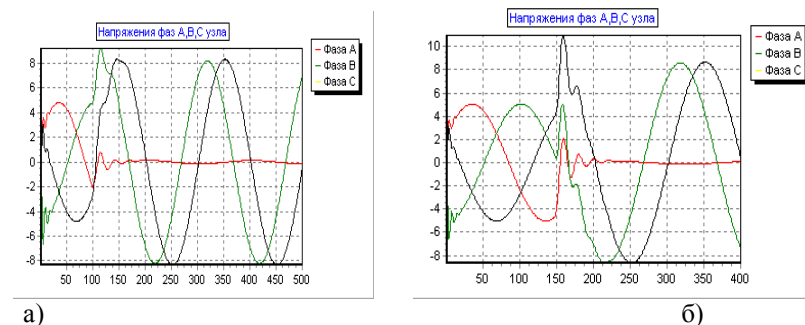


Рис. 2 – Перенапряжения на шинах ПС при ОЗЗ в схеме № 3(а) и № 4 (б)

Перенапряжения в сети (рис. 2) при возникновении замыкания при вариациях степени удаленности точек замыкания, начальных моментов коммутаций, и с увеличением суммарной длины кабельных линий (от 23,1 км до 81,5 км) достигают величины порядка 9–11 кВ (до 2,5 U_{ϕ}).

К дополнительному утяжелению условий работы изоляции приводит возникновение перемежающихся дуг, так как при этом в сети с R-, L-, C-элементами на фазное напряжение промышленной частоты накладываются кроме напряжения смещения нейтрали кратковременные составляющие свободных колебаний с частотами выше 50 Гц (рис. 3). При моделировании перемежающихся ОЗЗ в расчетах варьировались сопротивление дуги от 0,01 Ом до 10 Ом, начальная фаза замыканий, сопротивление изоляции, количество повторных зажиганий, промежутки между повторными зажиганиями и длительности замыканий

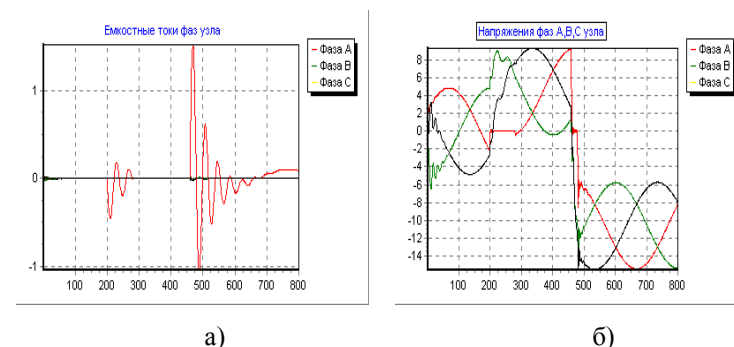


Рис. 3 – Повторное гашение дуги. Токи (а) и напряжения фаз (б) в узле ОЗЗ

При повторных зажиганиях дуги перенапряжения с каждым новым замыканием сначала увеличиваются, затем, после 3-4 зажиганиях (рис. 3.б) стабилизируются. Импульс тока при изменении удаленности от источника питания изменяется от 1,1 кА до 3,2 кА, напряжение фаз после гашения дуги – от 12,1 кВ до 16 кВ (до $4,6 U_{\phi}$).

Важно отметить также следующий фактор, отражаемый моделью: при повторных гашениях дуги треугольник фазных напряжений смещается, и это смещение сохраняется длительное время, так как перераспределение зарядов, оставшихся на фазных емкостях, через изоляцию происходит очень медленно. Скорость разряда фазных и междуфазных емкостей тем медленнее, чем выше сопротивление изоляции (рис. 4) и больше емкость (суммарная длина) сети. Вследствие этого перенапряжения, имеющие значительные кратности, воздействуют на изоляцию длительное время (и длительное тем более, чем длиннее сеть), что также является дополнительным утяжеляющим фактором.

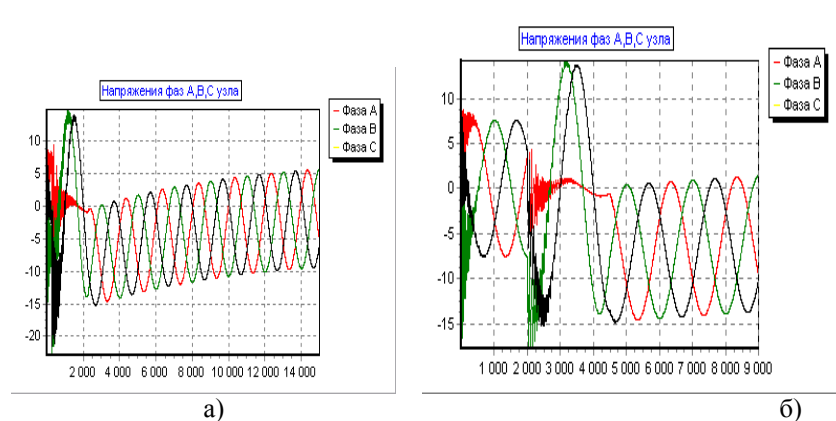


Рис. 4 – Напряжения фаз в точке ОЗЗ при сопротивлении изоляции: а – $R_{из}=10^4$; б – 10^6 Ом

По данным статистического анализа, выполненного для энергосистем России фирмой ОРГРЭС [1] на конец 2004 – начало 2005 г.г., с изолированной нейтралью работают практически 90 % сетей 6–35 кВ, причем в значительной части из них (имеющих большую протяженность) емкостные токи ОЗЗ превышают допустимые значения. Так как формирование и развитие электрических систем Украины и России длительное время происходило в рамках единой энергосистемы, такую статистику можно считать справедливой и для Украины. Представленные результаты отражают реальные условия работы этих сетей и совпадают с количественными характеристиками переходных процессов, полученными другими авторами и другими средствами (эксперимент,

мониторинг, регистрация). Это является свидетельством того, что, во-первых, модель достаточно точно отражает как физическую картину переходных процессов, так и их количественные характеристики, а, во-вторых, представленные цифrogramмы отражают те факторы, которые являются причиной высокой аварийности протяженных кабельных электрических сетей с изолированной нейтралью.

Как приведенные выше, так и известные по другим публикациям результаты исследований режимов работы протяженных кабельных сетей с изолированной нейтралью можно резюмировать следующим образом:

- замыкания фазы на землю, а также другие коммутации в условиях текущей эксплуатации неизбежно сопровождаются при наличии индуктивных и емкостных элементов перенапряжениями, причем кратности перенапряжений тем выше, чем протяженнее сеть;

- органическая изоляция кабелей в отличие, например, от изоляции воздушных линий, обладает свойством накапливать дефекты, поэтому даже умеренные перенапряжения при высокой частоте следования (текущие переключения в условиях эксплуатации) вследствие кумулятивного эффекта представляют опасность для изоляции и являются причиной высокой аварийности этих сетей;

- принципиально возможных путей снижения кумулятивного эффекта и улучшения показателей функционирования этих сетей два: необходимо либо ограничивать величину емкостных токов и перенапряжений (применением резонансного заземления нейтрали), либо ограничивать продолжительность их воздействия (применением низкоомного резистивного заземления нейтрали).

Электромагнитные переходные процессы при замыканиях на землю в сетях с резонансно-заземленной нейтралью. Отрицательные последствия ОЗЗ в электрических сетях с изолированной нейтралью тем значительнее, чем протяженнее сеть и, соответственно, чем больше значения емкостных токов, протекающих по сети и в месте повреждения. Поэтому одним из средств предотвращения или хотя бы снижения этих последствий является компенсация емкостных токов замыкания.

В схеме № 4 при изолированной нейтрали эквивалентное сопротивление равно 104 Ом (табл. 1) и ток ОЗЗ – 100 А (действующее значение). При изменении сопротивления реактора в нейтрали от 0 до 1000 Ом (рис. 5) ток по мере приближения к резонансу снижается и при дальнейшем увеличении $X_p > 104$ Ом стремится к значению 100 А.

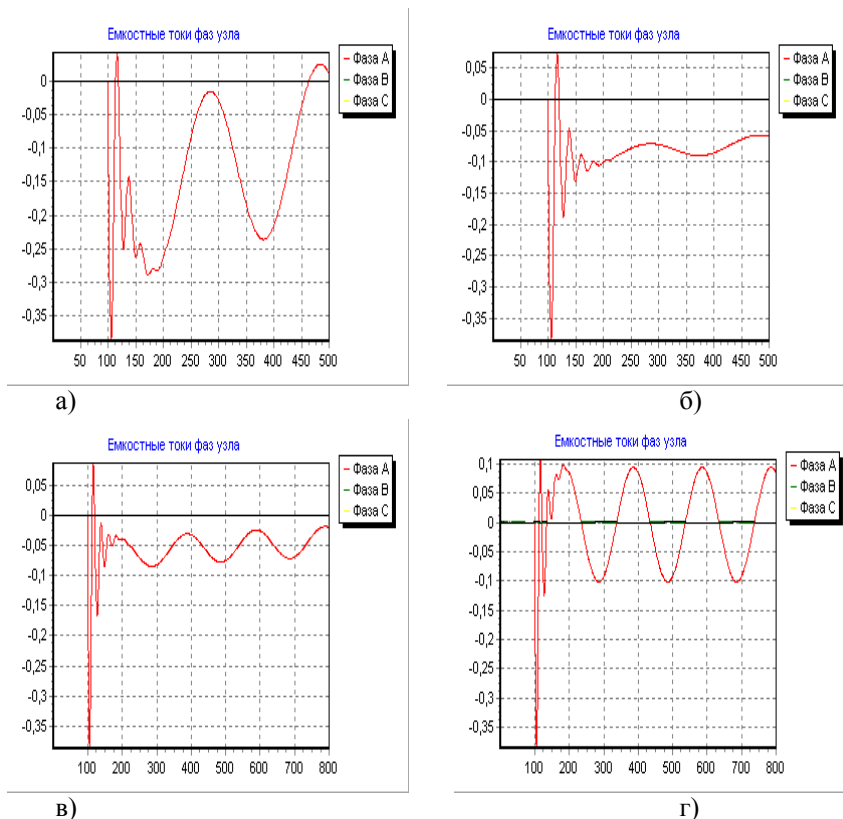


Рис. 5 – Переходные процессы в сети № 4 с ДГР: а– $X_p = 20 \text{ Ом}$; б– $X_p = 40 \text{ Ом}$; в– $X_p = 60 \text{ Ом}$; г– $X_p = 300 \text{ Ом}$

Представленные цифрограммы приведены для иллюстрации того, что заземление нейтрали трансформатора через ДГР и его резонансная настройка обеспечивают теоретическую возможность уменьшения емкостного тока через место повреждения и перенапряжений в сети.

Для выяснения причин, по которым эта теоретическая возможность не всегда реализуется в условиях реальной эксплуатации, для каждой из 4 принятых расчетных схем выполнены расчеты режимов ОЗЗ, определены эквивалентные сопротивления сети, токи в месте замыкания и в нейтрали, напряжения нейтрали при изменении сопротивления ДГР от 0 до 1000 Ом. Результаты расчетов в виде графиков основных зависимостей представлены на рис. 6–7.

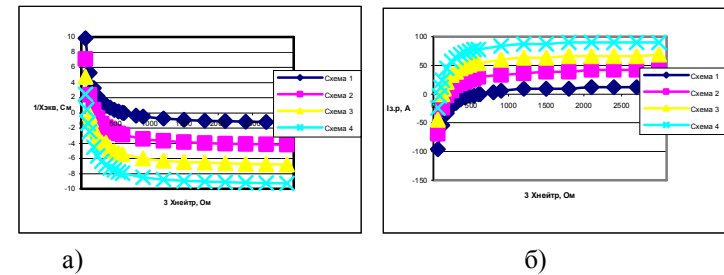


Рис. 6 – Зависимость $1/X_{\text{ЭКВ}}^{(0)}$ (а) и реактивной составляющей тока в месте замыкания (б) от реактивного сопротивления в нейтрали

При включении в нейтраль реактора и увеличении его сопротивления емкостный ток и эквивалентная проводимость сети по мере увеличения X_p снижаются до нуля (эквивалентное сопротивление увеличивается до ∞) и при наступлении резонанса при условии $3X_p = X_{\text{ЭКВ}}^{(0)}$ меняют знак (рис. 6. а, б).

Ток в нейтрали по мере увеличения X_p снижается до нуля, напряжение нейтрали (рис. 7) возрастает до фазного, причем при изменении протяженности сети эти зависимости практически не изменяются.

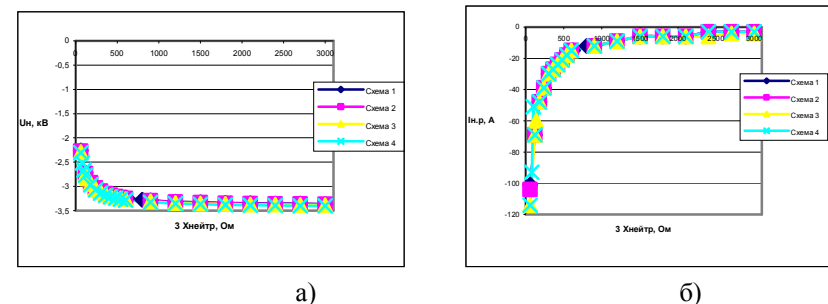


Рис. 7 – Зависимость напряжения смещения нейтрали (а) и реактивной составляющей тока в нейтрали (б) от реактивного сопротивления в нейтрали

Представленные результаты, кроме того, что подтверждают еще раз – по более полной модели и для схем произвольной конфигурации – возможность обеспечения резонансной настройки, позволяют выяснить факторы, которые снижают эффективность ее практической реализации и являются причиной того, что реализация этого способа заземления нейтрали не дает желаемого эффекта.

Во-первых, следует отметить, что кривые на рис. 6 в окрестности резонансных значений X_p тем круче, чем более протяженной является сеть (в протяженной сети малые изменения значений X_p приводят к значительным изменениям эквивалентного сопротивления сети и тока через реактор). Это означает, что требования к точности обеспечения резонанса и, соответственно, к устройствам автоматической настройки ДГР с увеличением суммарной емкости сети также возрастают. Это может служить причиной того, что ДГР и регуляторы, которые в сетях небольшой протяженности еще обеспечивают настройку на резонанс, в протяженных сетях становятся мало эффективными, и для обеспечения резонанса необходимо разрабатывать более совершенные средства.

Во-вторых, важно отметить также и то, что напряжение нейтрали в окрестности резонансных значений X_p (рис. 7а) отличается от фазного, и отличие напряжения нейтрали от фазного тем значительнее, чем меньше эквивалентное сопротивление сети (опять же – чем протяженнее сеть). При определении емкостного тока ОЗЗ методом искусственного смещения нейтрали от дополнительного источника напряжения [9] отличие напряжения от фазного не учитывается – емкостный ток замыкания на землю определяется по формуле

$$I_{\text{озз}} = I_{\text{изм}} \frac{U_{\phi}}{U_{\text{ист}}}, \quad (1)$$

где $I_{\text{изм}}$ – ток, измеренный амперметром; U_{ϕ} – фазное напряжение сети; $U_{\text{ист}}$ – напряжение источника, поданное в нейтраль заземляющего трансформатора при измерениях. Пересчет измеренного тока по формуле (1) в предположении, что напряжение в нейтрали трансформатора в режиме ОЗЗ будет равно фазному напряжению сети, дает неверный результат, причем погрешность тем выше, чем более протяженной является сеть. При настройке ДГР по току в соответствии с (1) резонанс не может быть обеспечен (а если еще учесть зависимость рис. 6, то тем более). Поэтому представляется, что изложенные в [9] методики определения емкостных токов и настройки дугогасящих реакторов требуют доработки и уточнения.

В сложившейся ситуации следует считать, что недостатки и аварийность электрических сетей с резонансным заземлением обусловлены, скорее всего, не тем, что не эффективна компенсация емкостных токов как метод улучшения показателей функционирования электрических сетей, а не эффективны средства его технической реализации, и решение проблем нужно искать на пути совершенствования этих средств.

Разработка, изготовление и эксплуатация новых средств требуют значительных затрат. Однако, решая вопрос о том, насколько и какие затраты оправданы, следует иметь в виду, что среди потребителей первой

категории имеется достаточно большое число предприятий и технологических процессов (в нефтедобыче, химии, горно-обогатительных производствах, металлургии, целлюлозно-бумажной промышленности и др.), настолько чувствительных к перерывам электроснабжения, что даже кратковременные перерывы питания (на десятки доли секунды) могут приводить к тяжелым последствиям – нарушению непрерывного технологического процесса, остановке производства, повреждению оборудования, риску для жизни и здоровья людей, угрозе для окружающей среды. В таких ситуациях только сети с резонансным заземлением нейтрали дают возможность сохранить нормальную работу на время, необходимое, например, для того, чтобы обеспечить безаварийную остановку технологического процесса. Если исходить из того, что областью применения электрических сетей с резонансным заземлением нейтрали является электроснабжение таких потребителей, то средства ограничения нужно совершенствовать, и затраты, даже самые дорогостоящие (по сравнению с ущербами от перерывов) экономически оправданы.

Электромагнитные переходные процессы при замыканиях на землю в сетях с резистивно-заземленной нейтралью.

Следствием отрицательного опыта применения резонансного заземления нейтрали и ДГР является то, что в работах ряда отечественных и зарубежных авторов как альтернатива режиму изолированной и резонансно-заземленной нейтрали рассматривается резистивное заземление нейтрали. Однако границы применимости данного способа заземления нейтрали еще не определены, практический опыт эксплуатации таких сетей отсутствует, отмечаются [1] факты «бездумного проектирования резисторов только ради внедрения резисторов как нового веяния». Поэтому необходимы исследования для выяснения количественных характеристик переходных процессов в сетях с резистивным заземлением нейтрали и для определения границ их применимости.

Для получения полного представления о влиянии резистивного заземления нейтрали на параметры режима электрических сетей во всем диапазоне изменения параметров схем и сопротивлений резисторов, как и в предыдущем случае, расчеты выполнены для четырех принятых схем при изменении сопротивления резистора в нейтрали от 0 до 1000 Ом, чем охватывается диапазон параметров, относящихся как к низкоомному, так и высокоомному заземлению нейтралей.

Влияние сопротивлений резистора на параметры режима сети иллюстрируют зависимости, представленные на рис. 8-9.

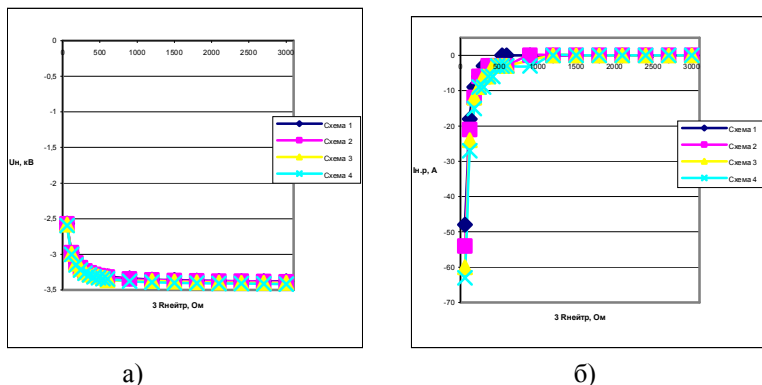


Рис. 8 – Зависимость напряжения смещения нейтрали (а) и реактивной составляющей тока в нейтрали (б) от активного сопротивления в нейтрали

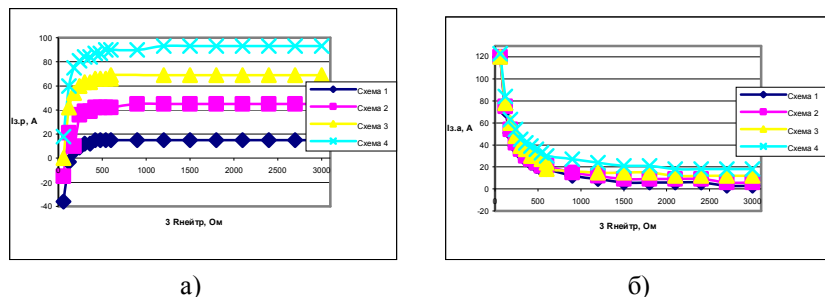


Рис. 9 – Зависимость реактивной (а) и активной (б) составляющей тока в месте замыкания от активного сопротивления в нейтрали

Реактивные составляющие токов в точке ОЗЗ возрастают (рис. 9), активные составляющие уменьшаются, причем при малых значениях сопротивлений резистора $0 < R_n < 200-300$ Ом (в низкоомной части) изменяются существенно, при больших сопротивлениях $R_n > 300$ Ом (в высокоомной части) изменения незначительны. Изменения тока и напряжения нейтрали зависят практически только от величины R_n и не зависят от суммарной емкости сети (рис. 8), причем влияние R_n на ток и напряжение существенно только в низкоомной части – при малых R_n . При малых значениях R_n сеть по своим характеристикам близка к сети с глухозаземленной нейтралью, по мере увеличения R_n параметры режима сети приближаются к параметрам сети с изолированной нейтралью.

Для сопоставления с дальнейшими результатами на рис. 10 представлены цифrogramмы переходного процесса при ОЗЗ в схеме № 4 при изолированной нейтрали. Амплитудное значение тока ОЗЗ – около

160 А, токи фаз в питающем кабеле (токи нагрузки) в режиме ОЗЗ сохраняются практически одинаковыми (200 А).

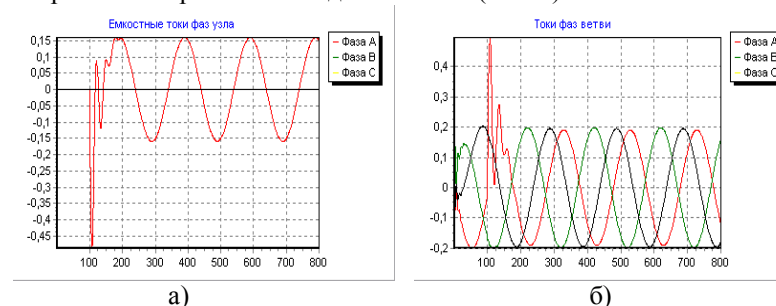


Рис. 10 – Переходный процесс при ОЗЗ в схеме № 4 при изолированной нейтрали: а– ток в месте повреждения; б– токи фаз в питающем кабеле

При включении в нейтраль резистора сеть с резистором уже при сопротивлении в нейтрали $R_n = 100$ Ом (эквивалентное сопротивление сети при суммарной длине 85 км тоже имеет порядок 100 Ом, табл. 1) становится близкой по своим характеристикам к сети с изолированной нейтралью (рис. 11. а-б). При значениях $R_n = 100$ Ом и более (назовем значение $R_n = 100$ Ом граничным $R_{гр}$) ток ОЗЗ и токи фаз питающего кабеля имеют те же значения, что и при изолированной нейтрали. При $R_n < R_{гр}$ сеть тем ближе к сети с глухозаземленной нейтралью, чем меньше R_n . Значение $R_{гр}$ разделяет области высокоомного и низкоомного заземления и зависит от протяженности и загрузки сети – с увеличением протяженности и загрузки сети $R_{гр}$ становится меньше.

Основное назначение сети с низкоомным резистором – обеспечение селективного отключения поврежденного ответвления – может быть реализовано только при условии

$$R_n < R_{гр} . \quad (2)$$

или, что равносильно, при условии, когда ток в поврежденной фазе выше тока нагрузки в нормальном режиме

$$I_{п.ф} > I_{н.р} . \quad (3)$$

При включении в нейтраль резистора с сопротивлением меньше граничного ($R_n = 40$ Ом, рис. 10, в-г), ток ОЗЗ равен 200 А, ток поврежденной фазы увеличивается по сравнению с токами неповрежденных фаз, и селективное отключение может быть обеспечено. Следует, правда, отметить, что при $R_n = 40$ Ом сеть уже близка к глухозаземленной, так как при включении в нейтраль резистора $R_n = 20$ Ом ток ОЗЗ равен 260 А, и практически равен току КЗ в этой сети при глухо заземленной нейтрали.

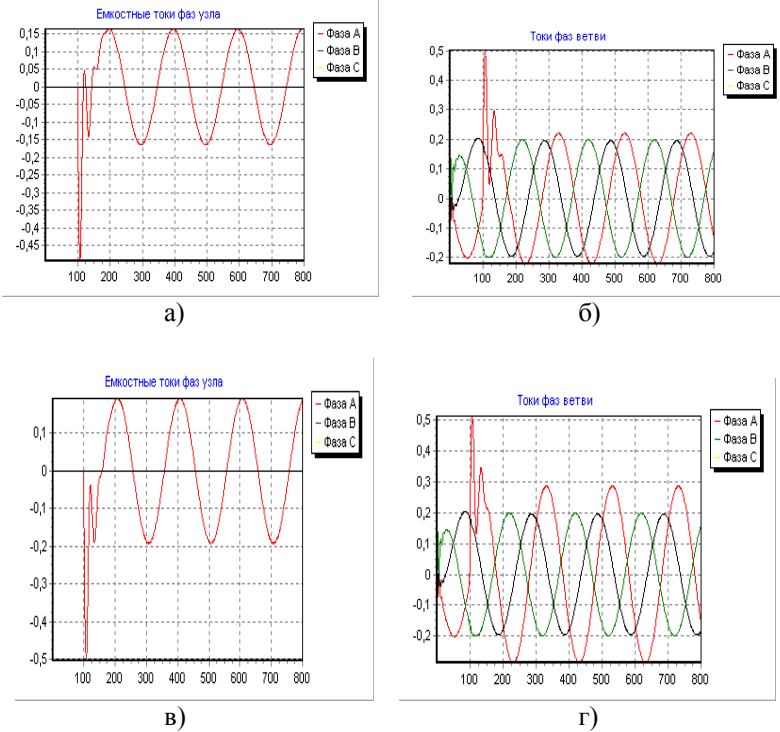


Рис. 11–Переходные процессы в сети № 4 с резистором в нейтрали: а,б – $R_n=100 \text{ Ом}$; в,г – $R_n=40 \text{ Ом}$

Представленные результаты исследований электрических сетей с резистивным заземлением нейтрали по полной модели:

- определяют количественные характеристики переходных процессов, которые необходимы для принятия и обоснования решений по определению области применения резистивного заземления,

- позволяют уточнить методику выбора резистора в нейтрали, при котором обеспечивается селективное отключение поврежденного ответвления,

- показывают, что в сетях с большой протяженностью и загруженных селективность не может быть обеспечена «при относительно низких значениях токов в месте повреждения» [5] – при обеспечении условий (2)-(3) ток ОЗЗ практически равен току КЗ в этой сети при глухо заземленной нейтрали.

К факторам, ограничивающим область применения резистивного заземления, можно отнести:

- невозможность обеспечения бесперебойной эксплуатации сети при наличии ОЗЗ и действии РЗ на отключение;

- увеличение тока ОЗЗ по сравнению с режимами изолированной и резонансно заземленной нейтрали – ток в месте повреждения может составлять сотни ампер, причем как в протяженных, так и в коротких сетях (значение $R_{гр}$ определяется с учетом наиболее загруженного ответвления);

- реализация резистивного заземления требует существенных затрат (добавление новых ячеек для резисторов, установка резисторов, обеспечение термической стойкости как резистора, так и трансформатора [6]), которые могут оказаться выше эффекта от внедрения резистора [1].

При высокоомном заземлении $R_{нейтр} > R_{гр}$ переходные процессы при ОЗЗ протекают практически так же, как в сети с изолированной нейтралью, снижение емкостного тока (в отличие от резонансного заземления) в месте повреждения и гашение дуги не обеспечивается – речь идет только об ограничении перенапряжений [5-8]. Однако ограничение только перенапряжений при сохранении больших емкостных токов, особенно в протяженных сетях, вряд ли можно рассматривать как решение проблемы. Поэтому высокоомные резисторы можно рассматривать лишь как средство улучшения характеристик переходных процессов в сетях с изолированной и резонансно-заземленной нейтралью (при включении резистора параллельно с ДГР).

Выводы.

1. Результаты теоретических исследований, выполненных разными авторами, с применением различных методов моделирования, включая и результаты, полученные выше на основе моделирования в фазных координатах, свидетельствуют о том, что каждым из способов заземления нейтрали обеспечивается принципиальная возможность ограничения отрицательных последствий ОЗЗ. В сетях с изолированной нейтралью снижение емкостных токов и перенапряжений обеспечивается ограничением протяженности этих сетей. В сетях с резонансным заземлением нейтрали – настройкой ДГР в резонанс с емкостью сети. В сетях с низкоомным резистором в нейтрали – ограничением времени существования режима ОЗЗ за счет селективного отключения поврежденного элемента.

2. В зависимости от конструктивного исполнения, протяженности, условий безопасности, требуемой надежности, допустимых перенапряжений и других факторов к сетям предъявляются различные требования. Ни один из способов заземления всем возможным требованиям удовлетворить не может, а лишь какому-либо набору из них.

Поэтому усилия по решению проблемы выбора режима нейтрали сетей напряжением 6–10 кВ должны быть направлены не на то, чтобы решить ее однозначно в пользу какого-либо одного способа, а на то, чтобы определить области наиболее эффективного применения для каждого из них.

3. Область применения каждого из способов заземления нейтрали определяется прежде всего требованиями к надежности электроснабжения: резонансное – в сетях с электроприемниками, не допускающими даже кратковременных перерывов электроснабжения (по технологическим причинам, по требованиям безопасности), резистивное – в сетях, допускающих отключения электроприемников, с изолированной нейтралью – в сетях малой протяженности.

4. Соответствующий уровень надежности электроснабжения любой из выбранных вариантов заземления нейтрали может обеспечить, но только при правильном выборе параметров требуемого для его реализации оборудования. Поэтому принятие правильных решений, направленных на повышение эффективности применяемых средств возможно только на пути разработки и применения полных моделей, позволяющих повысить точность определения свойств и характеристик сетей и выбора параметров оборудования.

Список литературы: 1. *Миронов И.А.* Проблемы выбора режимов заземления нейтрали в сетях 6–35 кВ / *И.А. Миронов* // Электро. – 2006. – № 5. – С. 32-36. 2. *Веприк Ю.Н.* Базовая модель электромагнитных переходных процессов в электрических системах с несимметрией. / *Ю.Н. Веприк* // Восточно- Европейский журнал передовых технологий. 2010, №2, с.37-42. 3. *Виштинбеков А.В.* О необходимости перевода электрических сетей 6–35 кВ на режим резистивного заземления нейтрали / *А.В. Виштинбеков* // Проблемы энергетики. – 2002. – № 3. 4. *Дергилев М.П.* Неснижаемые кратности перенапряжений с сети 6-35 кВ с резистивным заземлением нейтрали / *М.П. Дергилев, В.К. Обабков* // Электротехника – 2010 год. Перспективные виды электротехнического оборудования для передачи и распределения электроэнергии: VIII симпозиум, Моск. обл., 24–26 мая 2005 г.: сб. докл. – М.: ВЕИ, 2005. – Доклад 1.14. 5. *Евдокунин Г.А.* Выбор способа заземления нейтрали в сетях 6–10 кВ / *Г.А. Евдокунин, С.В. Гудилин, А.А. Корепанов* // Электричество. – 1998. – № 12. – С. 8–22. 6. *Коновалов Е.Ф.* Работа сетей напряжением 6–35 кВ с различными способами заземления нейтрали / *Е.Ф. Коновалов, Н.В. Дроздов, Т.В. Захарова* // Энергетик. – 2005. – № 4. – С. 40–41. 7. *Миронов И.А.* Дугогасящие реакторы в сетях 6–35 кВ. Автоматическая компенсация емкостного тока / *И.А. Миронов* // Новости ЭлектроТехники. – 2007. – №5(47). 8. *Целебровский Ю.* Области применения различных систем заземления нейтрали. / *Ю. Целебровский* // Новости электротехники, № 5 (29), 2004. 9. Типовая инструкция по компенсации емкостного тока замыкания на землю в электрических сетях 6–35 кВ. – К.: НИИ Энергетики, 1998. – 64 с. 10. *Гуревич Ю.Е.* Неотложные задачи надежности электроснабжения промышленных потребителей. / *Гуревич Ю.Е., Кабиков К.В., Кучеров Ю.Н.* // Электричество, 2005. – № 1. – С. 2-9.

Поступила в редколлегию 26.03.2012