

Применение резистивного заземления нейтрали сети 35 кВ электроснабжения острова Ольхон

М.В. Ильиных, И.Л. Дрожжина, Л.И. Сарин (ООО «ПНП Болид», Новосибирск)

Развитие инфраструктуры на о.Ольхон (озеро Байкал) потребовало создание надежного электроснабжения данного острова. На стадии проектной проработки было принято решение о создании схемы электроснабжения по сети 35 кВ с использованием существующей ВЛ 110 кВ от подстанции Еланцы 110/35/10 до берега озера Байкал, организацией подводного кабельного перехода 35 кВ по дну Байкала и сооружением ВЛ и подстанции 35 кВ Хужир на о.Ольхон.

Электроснабжение подстанции Еланцы 110/35/10 осуществляется со стороны ВЛ 110 кВ Баяндай-Еланцы через трехобмоточный трансформатор 10 МВА;

ВЛ 35 кВ, находящаяся на материке до пролива Ольхонские ворота, подвешена по одной цепи двухцепных опор и состоит из трёх участков:

- одна цепь длиной 40,15 км на двухцепных железобетонных опорах ПБ110-8;
- одна цепь 11,51 км на двухцепных железобетонных опорах ПБ35-4.1;
- одна цепь 1,25 км на двухцепных металлических опорах ПС110-108ва.

По трассе данной ВЛ выполнена транспозиция проводов фаз.

На тех же опорах вторая цепь запитана на 10 кВ – ВЛ 10 кВ Еланцы-Черноруд 2, протяженностью по магистали 51,77 км. В районе опоры №84 подключена отпайка 10 кВ общей протяженностью 28,9 км на опорах П10-1Д.

Через пролив Ольхонские Ворота прокладываются два параллельных кабеля фирмы Ribok длиной около 2-х километров каждый. Сечение жилы кабеля составляет 70 мм². Удельная ёмкость фазы кабеля относительно земли равна 0,143 мкФ/км. Кабели предполагается проложить в общей трубе по дну озера.

От перехода через пролив по острову Ольхон до подстанции Хужир 35/10 кВ проложена двухцепная воздушная ЛЭП - ЛЭП 2 и ЛЭП 3 длиной 32,12 км на металлических опорах ПС110-10ва.

Сечение проводов ВЛ 35 кВ – 120 мм². Грунт по трассе ЛЭП представлен в основном деревянистыми песками, супесью, щебнем, гранитом.

Режим нейтрали сети 35 кВ электроснабжения о. Ольхон первоначально, как и для подавляющего числа сетей 35 кВ, был принят с изолированной нейтралью. Это позволяет сохранять работоспособность присоединений при длительных однофазных замыканиях (ОЗ) на землю и дает возможность эксплуатационному персоналу определить место повреждения.

Как общеизвестно, работа сети в режиме изолированной нейтрали сопровождается возникновением специфических для этого режима перенапряжений, к основным из которых относятся дуговые перенапряжения. Их доля среди всех видов аварий значительна (до 80%). Такие перенапряжения часто существуют в виде переходных процессов при перемежающейся дуге и опасны для электроустановок высокими кратностями перенапряжений $U_{пер}=(3÷3,8)U_{ф}$, своей продолжительностью и шириной охвата сети, электрически связанной с местом повреждения.

Перенапряжения приводят к перекрытию или пробое дефектной или ослабленной (загрязненной и увлажненной) изоляции оборудования. Кроме того, воздействие перенапряжений на изоляцию способствует накоплению и развитию дефектов, что приводит к снижению уровня изоляции и повышает вероятность ее повреждения при последующих воздействиях перенапряжений.

В данной сети наибольшие опасения вызывает возможное повреждение подводного кабеля 35 кВ под действием перенапряжений при однофазных замыканиях на землю в

сети. Пробой изоляции подводных участков кабелей неизбежно будет сопровождаться огромными финансовыми затратами на ее восстановление.

В связи с этим необходимо максимальным образом исключить воздействие на изоляцию кабелей перенапряжений при однофазных дуговых замыканиях на землю.

Существенное ограничение перенапряжений при ОДЗ может быть достигнуто изменением режима нейтрали сети.

Мировой и отечественный опыт эксплуатации сетей среднего класса напряжения с различным режимом заземления нейтрали показывает, что переход к резистивному заземлению нейтрали позволяет кардинально решить проблемы дуговых и феррорезонансных перенапряжений. Все это дает возможность снизить повреждаемость изоляции оборудования.

В седьмой редакции ПУЭ в главе 1.2 «Электроснабжение и электрические сети» в параграфе 1.2.16 и главе 4.2 «Распределительные устройства и подстанции напряжением выше 1 кВ» в параграфе 4.2.166 определено следующее: «Электрические сети 3-35 кВ должны работать с изолированной, заземленной через резистор или дугогасящий реактор нейтралью».

Резистивное заземление нейтрали сети создает условия для быстрого и надежного определения места повреждения.

В данной работе для анализа перенапряжений при ОДЗ в сети 35 кВ электроснабжения о. Ольхон использован комплекс программ VMAЭС, предназначенный для расчета электромагнитных переходных процессов в электроэнергетических схемах.

На рис.1. приведена упрощенная схема электроснабжения острова Ольхон, для которой выполнялись расчеты перенапряжений.

Кратности возможных перенапряжений при ОДЗ в сети 35 кВ оценивались по формуле: $K_p = U_m / U_{ф.мах}$,

где U_m - максимальное значение напряжения в переходном процессе;

$U_{ф.мах}$ - амплитуда наибольшего рабочего фазного напряжения.

U_m определялось из амплитудных значений перенапряжений на фазах "В" и "С" при ОДЗ на фазе "А".

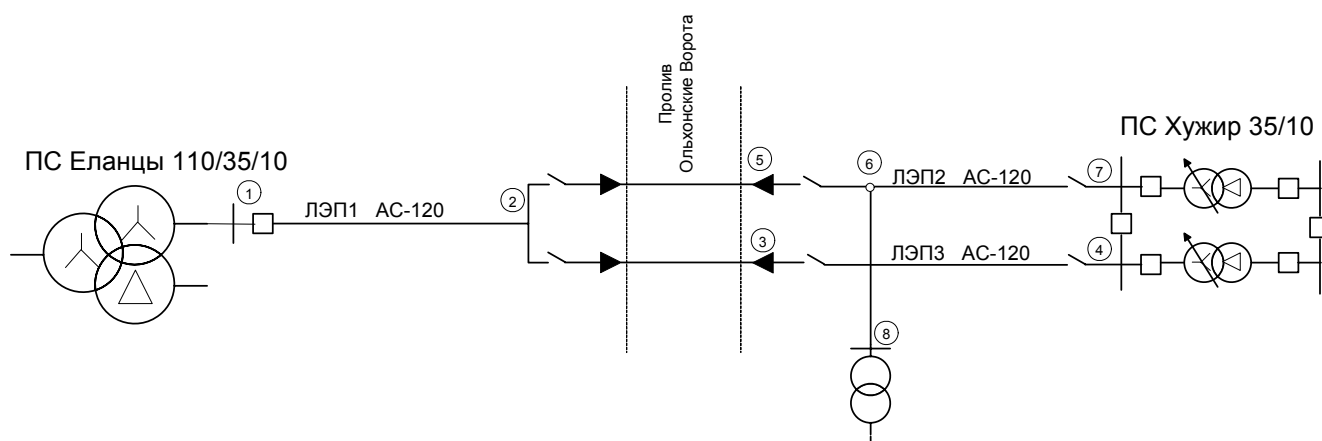


Рис. 1. Упрощенная схема электроснабжения острова Ольхон

Величины перенапряжений, возникающих при дуговых замыканиях, во многом определяются параметрами расчетной схемы. К основным из них необходимо отнести индуктивные и активные эквивалентные сопротивления элементов сети (питающая система, трансформаторы) и величину емкостного тока замыкания на землю секций.

Был выполнен расчет емкостного тока однофазного замыкания на землю для рассматриваемой сети.

Известно, что ёмкость фазы кабеля относительно земли равна 0,143 мкФ/км. Тогда ёмкостный ток одного кабеля можно определить следующим образом:

$$I_{\text{СКАБ}} = 3 \frac{U_{\text{ном}}}{\sqrt{3}} \omega C_{\text{уд}} L_{\text{км}} = 3 \frac{35 \cdot 10^3}{\sqrt{3}} 314 \cdot 0,143 \cdot 10^{-6} \cdot 2 = 5,45 \text{ А}$$

Ёмкостный ток двух кабелей будет равен 10,9 А.

Для проведения расчетных исследований был выполнен уточненный расчет емкостного тока для ВЛ с учетом расположения проводов на реальных опорах. Были рассчитаны значения ёмкостей фаз относительно земли, междуфазные и межцепные ёмкости для каждого из видов опор, используемых в проекте.

Расчетный суммарный емкостный ток сети, с учетом габаритов расположения проводов на опорах, составил 19,2 А.

Параметры различных элементов сети были введены в программу VMAES, с помощью которой проводился расчет собранной модели сети 35 кВ Еланцы-Хужир. В модели сети так же учтены межцепные ёмкости, сеть 10 кВ ПС Еланцы.

Для определения величины возможных перенапряжений при однофазном замыкании на землю в различных местах рассматриваемой сети 35 кВ проведен комплекс расчетов.

Наиболее близкие к реальным условиям горения дуги описываются гипотезой Белякова Н.Н. По этой гипотезе исход гашения дуги в месте однофазного замыкания определяется условиями соревнования напряжения, восстанавливающегося после гашения дуги, и напряжения электрической прочности. В последующих расчетах при моделировании дуги использована эта гипотеза.

В сети с изолированной нейтралью при дуговых замыканиях при быстром погасании дуги происходит заряд ёмкостей здоровых фаз и сдвиг напряжения нейтрали, приводящий к соответствующему возрастанию максимального напряжения на поврежденной фазе. Первое зажигание может возникнуть в любой момент времени, однако наиболее высокие перенапряжения возникают при зажигании дуги в момент максимума напряжения на поврежденной фазе. Величина перенапряжений определяется моментами гашения и зажигания дуги и носит случайный характер. За счет колебательного характера переходного процесса, обусловленного перезарядом фазной ёмкости при зажигании и погасании дуги, максимум перенапряжений после первого зажигания дуги достигает $(2,4 \div 2,5)U_{\text{ф}}$. Последующие зажигания дуги происходят при ненулевом значении напряжения на нейтрали, в результате чего перенапряжения на здоровых фазах могут достигать $(3,0 \div 3,8)U_{\text{ф}}$.

Такие наилучшие условия развития дуговых перенапряжений были приняты в качестве расчетных. Коэффициент успокоения сети, учитывающий активные потери в сети, принимался равным 5%.

Расчет возможных перенапряжения проводился для случаев возникновения однофазных дуговых замыканий в различных местах сети (1 – 8; рис. 1). Расчеты показывают, что учет междуфазных и межцепных ёмкостей двухцепных ВЛ приводит к снижению величин перенапряжений при ОДЗ. При этом эффект учета межцепных ёмкостей оказывается более существенным, чем междуфазных ёмкостей. Приведенные расчеты показывают, что для получения достоверных результатов при ОДЗ в двухцепных ВЛ необходимо принимать во внимание всю систему ёмкостей сети, при этом для учета распределенности параметров сети ВЛ и КЛ моделировались в виде цепочки П-схем замещения.

При однофазном дуговом замыкании на землю в рассматриваемой сети 35 кВ электроснабжения о. Ольхон согласно расчета возможно возникновение опасных для изоляции оборудования перенапряжений.

На рис.2- 4 приведены характерные расчетные осциллограммы перенапряжений при ОДЗ на фазе А (Фаза А – черный, Фаза В – синий, Фаза С – красный; напряжение на нейтрали – зеленый; значения напряжений в В, время в секундах). Под осциллограммами

показаны значения напряжений в момент времени, отмеченные на осциллограммах красной курсорной линией.

При первом пробое максимум перенапряжений на фазе С достигает $U_m = (2,3 \div 2,5)U_{\phi}$. Второй пробой в максимум фазы А приводит к перенапряжениям величиной $(2,98 \div 3,84)U_{\phi}$.

Все применяемые способы ограничения перенапряжений основаны на использовании методов и средств, способствующих стеканию зарядов на землю, появляющихся в трехфазной сети, например, при дуговых замыканиях на землю и приводящих к появлению напряжения смещения нейтрали.

Теоретические исследования и опыт эксплуатации показывают, что уменьшить величину дуговых перенапряжений и число замыканий на землю без значительного увеличения тока замыкания на землю, можно за счет включения в нейтраль сети высокоомного резистора.

Включение в нейтраль сети резисторов имело цель устранить недостатки работы сети с изолированной нейтралью и дало возможность: 1) определения места повреждения и действия защиты на сигнал или отключение в сети с высокоомным заземлением нейтрали; 2) ограничения перенапряжений до допустимого уровня для оборудования, что позволяет предотвратить развитие аварии; 3) исключение опасных феррорезонансных явлений, обусловленных насыщением магнитопроводов трансформаторов напряжения.

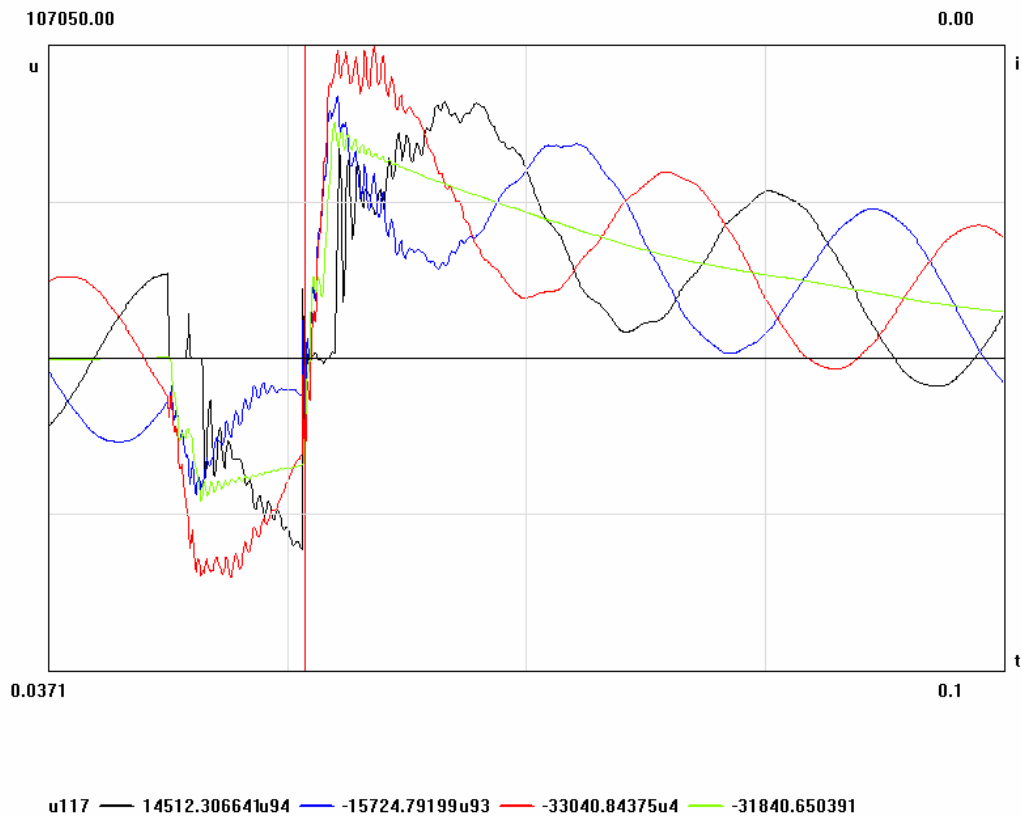


Рис. 2. Осциллограмма перенапряжений в месте ОДЗ в т.4 в конце ВЛ 35 кВ на подходе к ПС Хужир.

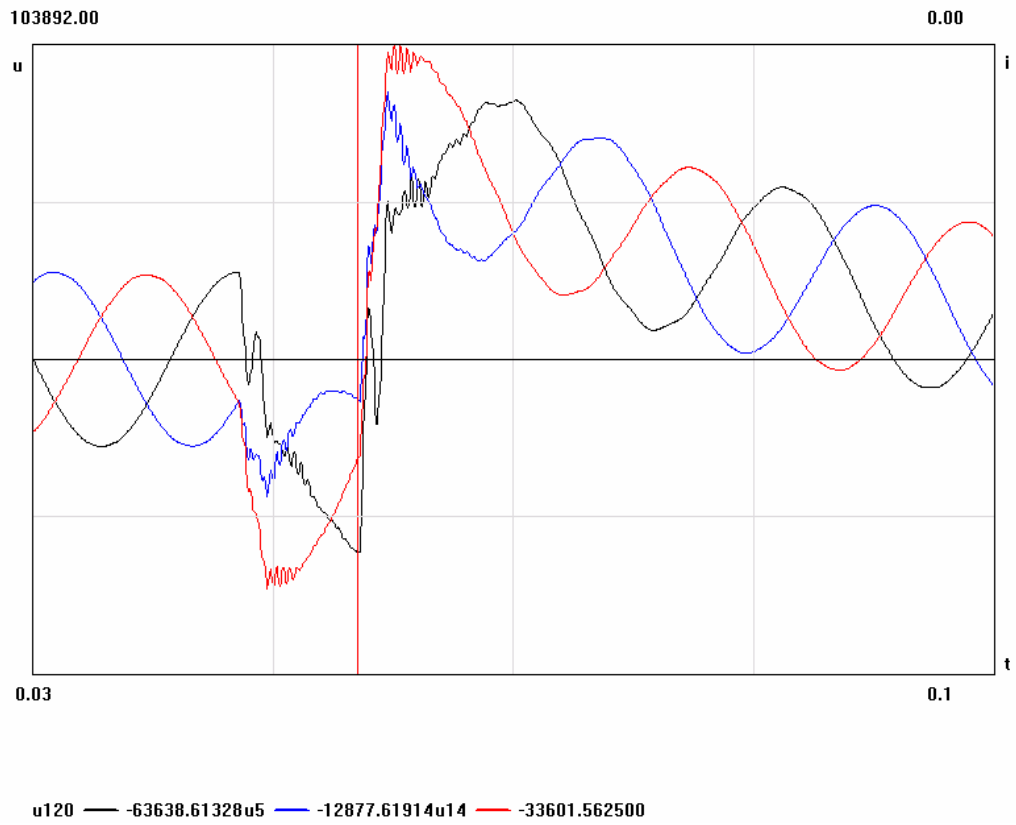


Рис. 3. Осциллограмма перенапряжений в т.1 в начале ЛЭП 1 при ОДЗ в т.4 в конце ВЛ 35 кВ на подходе к ПС Хужир.

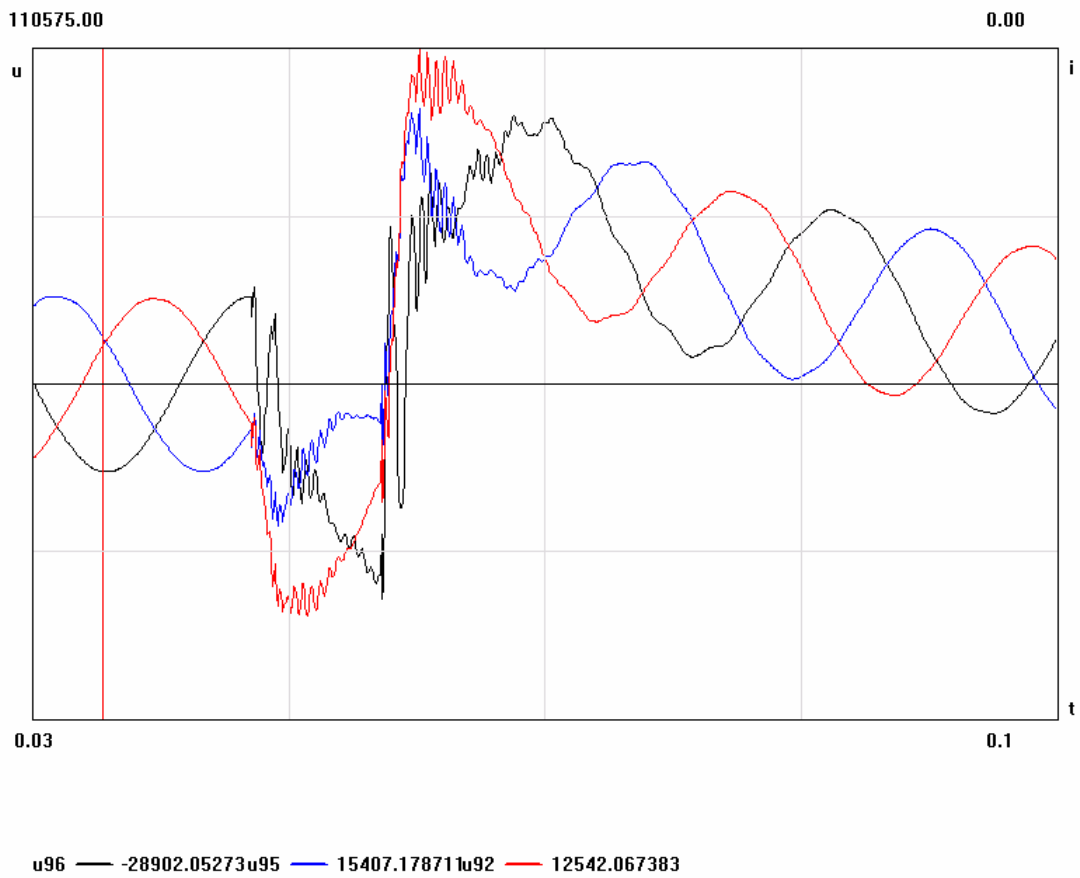


Рис. 4. Осциллограмма перенапряжений в т.7 в конце ЛЭП 3 при ОДЗ в т.4 в конце ЛЭП 2 на подходе к ПС Хужир.

Ограничение перенапряжений при дуговых замыканиях в случае резистивного заземления нейтрали осуществляется за счет уменьшения постоянной времени разряда емкости здоровых фаз за время бестоковой паузы и снижения напряжения на нейтрали до значения, исключающего эскалацию перенапряжений при последующих пробоях ослабленной изоляции аварийной фазы.

Уменьшение номинала резистора приводит к увеличению тока однофазного замыкания на землю, что обеспечивает, с одной стороны, быстрый разряд емкости фаз и уменьшение напряжения на нейтрали, с другой стороны – повышение энергии, рассеиваемой резистором. В зависимости от параметров схемы существует оптимальное значение сопротивления, обеспечивающее эффективное снижение напряжения на нейтрали при минимальном выделении энергии на резисторе. Обоснованный выбор сопротивления заземляющих высокоомных резисторов минимизирует затраты.

Результаты расчетов показывают, что для снижения уровня перенапряжений до величины $2,7U_{ф}$ в сети 35 кВ электроснабжения о. Ольхон необходимо подключение в нейтраль сети защитного резистора номиналом 2000 Ом.

На рис. 5 приведена расчетная осциллограмма процесса при ОДЗ в сети 35 кВ электроснабжения о. Ольхон с нейтралью заземленной через резистор 2000 Ом.

Заземление нейтрали сети через резистор 2000 Ом создаст дополнительный активный ток 10,1 А. При емкостном токе замыкания на землю 20 А, полный ток замыкания на землю увеличится на 2,4 А.

Для улучшения условий ограничения перенапряжений и более надежной работы селективной релейной защиты от замыканий на землю принято решение выполнить заземление сети распределенно путем установки на ПС Еланцы 110/35/10 в нейтраль трансформатора 10 МВА резистора 4000 Ом и на ПС Хужир в нейтраль каждого трансформатора 4 МВА резистор 8000 Ом. Подключение резисторов к нейтрали трансформатора осуществляется через разъединитель.

Проведенные расчеты также показывают за счет наличия межцепной емкости между линиями 35 и 10 кВ, выполненных на одних и тех же опорах, происходит существенное влияние процессов в сети 35 кВ на процессы в сети 10 кВ.

При однофазном замыкании на землю в сети 35 кВ на сеть 10 кВ наводится напряжение, что может привести к значительному смещению напряжения на нейтрали и ложному срабатыванию релейной защиты по $3U_0$ в сети 10 кВ.

На рис. 6а показан процесс при устойчивом замыкании на землю в сети 35 кВ. При этом в сети 10 кВ, имеющей связь через межцепные емкости с сетью 35 кВ, в нормальном режиме работы наводится напряжение, что приводит к значительному смещению нейтрали сети и несимметрии фазных напряжений (рис. 6б). Амплитудные значения по фазам составили $U_a=6238$ В, $U_b=11062$ В, $U_c=9004$ В, на нейтрали $U_0=2887$ В.

Проведенные расчеты показывают, что снизить влияние процессов наведенных в сети 10 кВ от ОДЗ в сети 35 кВ можно реализовав следующие мероприятия:

1. участок ВЛ 10 кВ выполнить на отдельных опорах 10 кВ;
2. выполнить заземление нейтрали сети 35 кВ через резистор 2000 Ом и резистивное заземление нейтрали сети 10 кВ.

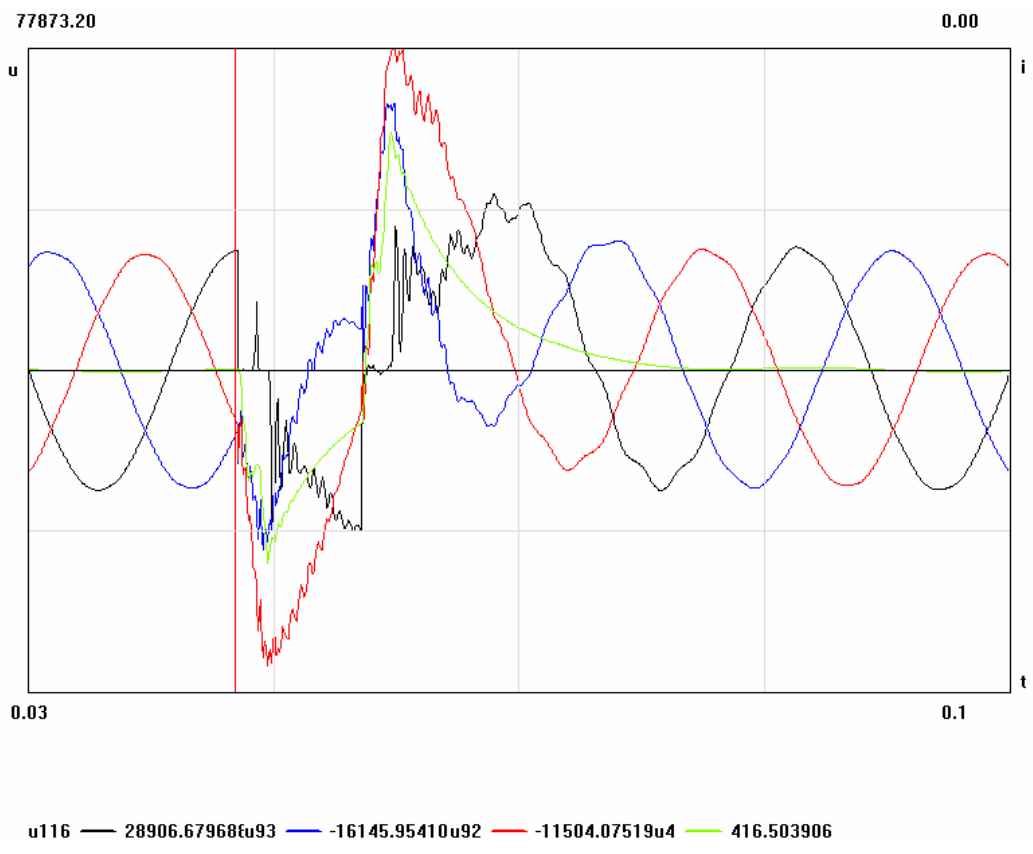
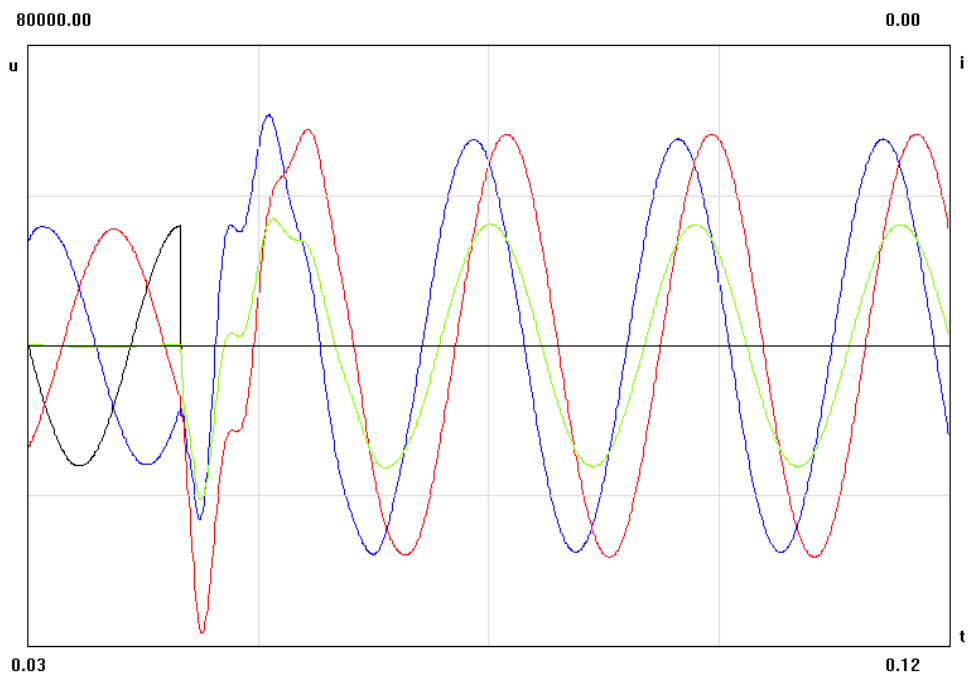
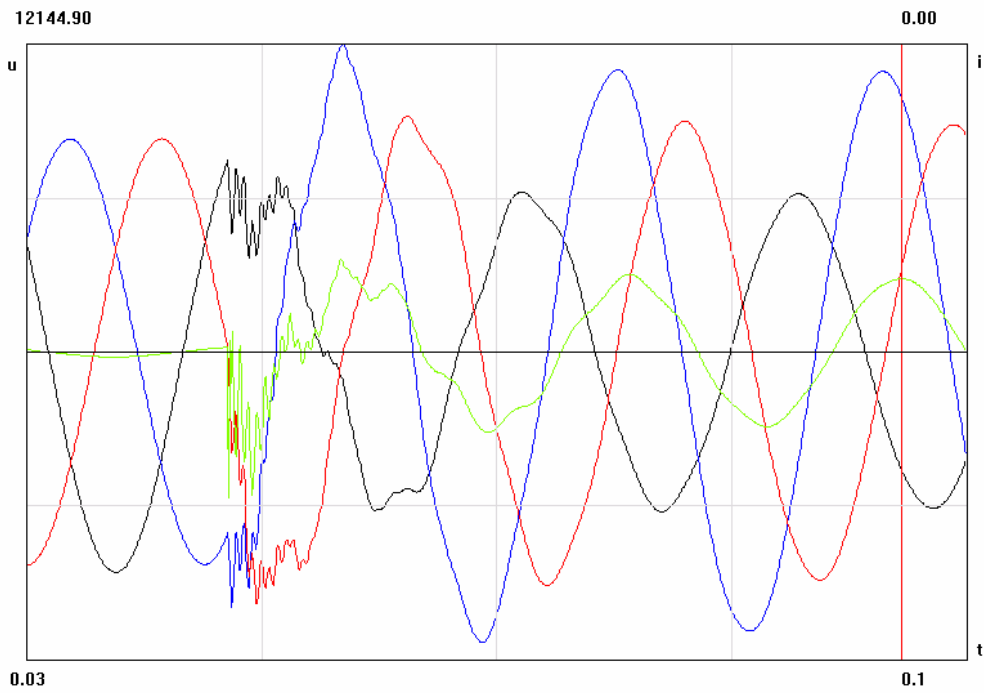


Рис. 5. Осциллограмма перенапряжений в месте ОДЗ в т.4 при заземлении нейтрали сети 35 кВ через резистор 2000 Ом.



а) Устойчивое замыкание на землю в сети 35 кВ



u155 — -4639.985840u119 — 10070.898436u164 — 3262.634033 u132 — 2887.820068

б) Наведенное напряжение в нормальном режиме работы сети 10 кВ

Рис. 6 Напряжения в фазах сети и на нейтрали при ОЗЗ в сети 35 кВ

Система электроснабжения острова Ольхон была введена в эксплуатацию летом 2005 года. На ПС Еланцы и ПС Хужир были установлены и введены в эксплуатацию резисторы типа РЗ номиналами 4000 и 8000 Ом, серийно выпускаемые ООО "ПНП Болид".

На рис.7 приведена фотография резистора РЗ-4000-102-35, установленного на подстанции Еланцы ВЭС «Иркутскэнерго».



Рис. 7 Резистор РЗ-4000-102-35 на ПС Еланцы

Заключение

Считаем необходимым и экономически целесообразным рекомендовать применение для снижения уровня возникающих перенапряжений при дугowych замыканиях на землю в сети 6-35 кВ электроснабжения ответственных потребителей, крупных промышленных предприятий постоянно включенные в нейтраль высокоомные резисторы типа РЗ, рассчитанных на возможность длительной работы в режиме однофазного замыкания на землю.

Резистор типа РЗ, производства ПНП БОЛИД, рассчитан на время воздействия наибольшего фазного напряжения не менее 6 часов, что позволяет обходиться без устройств автоматики и защиты для его отключения

Применение высокоомного резистивного заземления нейтрали позволяет эффективно ограничивать перенапряжения при ОДЗ, не ухудшает условия гашения дуги. Активный ток, создаваемый резистором, как правило, оказывается достаточным для селективной работы токовой защиты, которая может действовать как на сигнал, так и на отключение в зависимости от условий обеспечения надежности и безопасности электроснабжения.