

КОМПЛЕКСНЫЙ ПОДХОД К ВЫБОРУ СРЕДСТВ ОГРАНИЧЕНИЯ ПЕРЕНАПРЯЖЕНИЙ В СЕТЯХ 6–10 кВ КРУПНЫХ ПРОМЫШЛЕННЫХ ПРЕДПРИЯТИЙ ЦЕЛЛЮЛОЗНО-БУМАЖНОЙ И МЕТАЛЛУРГИЧЕСКОЙ ПРОМЫШЛЕННОСТИ

М.В. Ильных, Л.И. Сарин, инженеры,
ООО "ПНП БОЛИД"

Крупные современные промышленные предприятия питаются от районных электрических сетей на ВЛ 110–220 кВ, а в ряде случаев имеют в своем составе одну или несколько собственных ТЭЦ. Связь системы электроснабжения предприятий с энергетической системой осуществляется через главную понизительную подстанцию (ГПП).

У данных предприятий имеется собственная большая разветвленная распределительная сеть 6–35 кВ протяженностью 100 и более километров, зачастую обеспечивающая энергоснабжение более мелких предприятий.

Распределительные сети 6–10 кВ – в основном радиальные и выполняются практически всегда кабельными линиями.

Состав потребителей электроэнергии на крупных предприятиях имеет достаточно широкий спектр. Из основных – это мощные двигатели 6–10 кВ приводов технологических механизмов производства и собственных нужд ТЭЦ 6–10 кВ, вентильные преобразователи для питания проводов картонно- и бумагоделательных машин, листовых и сортовых станков, в электроплавильных цехах – печи ДСП, руднотермические печи.

Кроме того, как видно из состава оборудования, ряд потребителей электроэнергии имеет нелинейную характеристику и является источниками высших гармоник.

Наличие мощного дорогостоящего оборудования, обеспечивающего непрерывность производственного цикла, выдвигает особые требования к бесперебойности электроснабжения и надежности работы электрооборудования.

Основные виды перенапряжений, характерных для сетей 6–35 кВ крупных промышленных предприятий целлюлозно-бумажной и металлургической промышленности

В большинстве случаев величина емкостного тока однофазного замыкания на землю для секций подстанций крупного предприятия находится в пределах 20–80 А, но в то же время существуют отдельные секции с малыми величинами емкостных токов от 1 до 5 А. В связи с этим сети данных классов напряжений работают в режиме компенсированной нейтрали (нейтраль сети заземлена через дугогасящий реактор) либо изолированной нейтрали.

К наибольшим перенапряжениям в сети с изолированной и компенсированной нейтралью приводит коммутация индуктивных элементов и дуговые перенапряжения.

Наличие в сети элементов с нелинейными характеристиками и источников высших гармоник способствует возникновению опасных для изоляции электрооборудования резонансных и феррорезонансных процессов.

При наличии ВЛ 6–10 кВ, связывающих ГПП с подстанциями сторонних потребителей, на сеть воздействуют и атмосферные перенапряжения. Грозовые перенапряжения могут также трансформироваться через силовые трансформаторы со стороны ВЛ 110–220 кВ. Защита от грозовых перенапряжений в данном докладе не рассматривается.

Перенапряжения при ОДЗ

Наибольшая доля среди всех аварийных повреждений (до 80%) связана с возникновением дуговых перенапряжений при однофазных замыканиях на землю. Такие перенапряжения часто существуют в виде переходных процессов при перемежающейся дуге и опасны для электроустановок высокими кратностями перенапряжений $U_{пер} = 3-3,5U_{ф}$, своей продолжительностью и шириной охвата сети, электрически связанной с местом повреждения.

Дуговые перенапряжения приводят к перекрытию или пробоем 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.

Перенапряжения при коммутации выключателями индуктивных элементов (электрических двигателей, трансформаторов)

Опасные перенапряжения для изоляции оборудования, особенно электрических двигателей, могут возникать в период включения и отключения выключателей.

В процессе выполнения технических операций производятся включения и отключения отдельных присоединений с помощью выключателей, коммутирующих электродвигатели вместе с соответствующими питающими кабелями. Кроме того, возможны коммутации электродвигателей в процессе АВР, отключения заторможенных электродвигателей и др. Все эти коммутационные операции сопровождаются перенапряжениями разной кратности и частоты.

Источником, создающим перенапряжения в сети, может являться сам выключатель. Уровень и вероятность появления этих перенапряжений существенно зависят от типа и качества настройки коммутационной аппаратуры.

Опасные коммутационные перенапряжения могут возникнуть как при включении, так и его отключении даже в том случае, если выключатель работает идеально, т.е. замыкание контактов происходит мгновенно (без предпробоев), а размыкание – в нуле тока промышленной частоты (без повторных зажиганий и гашений дуги).

При включении электродвигателей перенапряжения в большинстве случаев не превосходят двукратных за счет удвоения перенапряжения волны, распространяющейся по обмоткам двигателя при включении первой фазы. Однако в отдельных случаях при включении второй фазы возникает волна, перезаряжающая емкость обмотки третьей фазы от $2U_{ф}$ до $-U_{ф}$ с максимальным всплеском до $-3,5U_{ф}$ на третьей разомкнутой фазе.

При включении двигателя в процессах АПВ и АВР на зажимах двигателя остается остаточное напряжение, обусловленное затухающими токами в обмотках (массива) ротора. Это напряжение может находиться в противофазе с ЭДС шин секции в момент включения двигателей. При включении фаз выключателя с разбросом во времени возможно возникновение перенапряжений кратностью до $5U_{фм}$. Включения второй и третьей фаз вызывают высокочастотные импульсы перенапряжений противоположной полярности и крутые срезы напряжений (с фронтом порядка 1 мкс до 7,0 $U_{фм}$). Эти срезы напряжения воздействуют на витковую изоляцию первых катушек электродвигателя. Регулирование разброса в моментах замыкания отдельных фаз для снижения перенапряжений должно иметь возможность регулирования в пределах хотя бы четверти периода свободных колебаний, т.е. 0,05...0,08 мс, что практически нереально.

При включении двигателя при ОЗЗ в сети возможно возникновение перенапряжений кратностью $3,5U_{фм}$.

При отключении выпавших из синхронизма (синхронных) двигателей на их изоляцию могут воздействовать перенапряжения кратностью до $5U_{фм}$.

В реальных условиях работа выключателя может существенно отличаться от идеальной, когда могут возникнуть следующие явления:

- срез тока до его нулевого значения;
- пробой межконтактного промежутка в процессе включения и отключения;
- гашение дуги высокочастотного тока переходного процесса.

Срез тока – внезапное снижение тока к нулю до его естественного нулевого значения. Это связано с нестабильностью дуговой плазмы, высокочастотными колебаниями тока и возможностью восстановления диэлектрической прочности после прерывания тока. Все выключатели обнаруживают эти характеристики в различной степени (масляные, воздушные, элегазовые, вакуумные). Особенно это присуще вакуумным выключателям. Вакуумные выключатели создают нестабильную дугу при высокочастотном характере изменения тока с последующим очень быстрым его прерыванием.

Срез тока зависит от многих факторов, таких как: величина отключаемого тока, характеристики цепи, сосредоточенная емкость параллельно выключателю, момент отделения контактов, конструкция аппарата и имеет статистическую природу.

Перенапряжения на зажимах двигателя могут достигать (6–7)UФМ и даже более.

Эскалация перенапряжений возможна как при коротких, так и при длинных кабельных присоединениях, при отключении как маломощных, так и мощных двигателей. Возможность эскалации определяется сочетанием характеристик вакуумной камеры и присоединения с двигателем.

Частота высокочастотной составляющей такая:

$$f = \frac{1}{2\pi\sqrt{L_k \cdot C_\phi}},$$

где L_k – индуктивность кабеля; C_ϕ – суммарная емкость на землю фазы кабеля и двигателя.

Увеличение длины кабеля уменьшает частоту восстанавливающегося напряжения и при прочих равных условиях увеличивает вероятность отключения без повторных зажиганий (или при меньшем их количестве).

Увеличение мощности электродвигателя (при той же длине кабеля) увеличивает частоту свободных колебаний процесса и скорость восстановления напряжения на контактах ВВ.

С увеличением мощности двигателя и уменьшением длины кабеля растет количество повторных зажиганий дуги в выключателе, что приводит к увеличению перенапряжений на двигателе. Большая мощность двигателя и меньшая длина кабеля соответствуют меньшим значениям индуктивности двигателя и емкости кабеля на землю. Это приводит к увеличению частоты собствен-

ных колебаний схемы, большей скорости роста ПВН и возрастанию количества повторных зажиганий. Рост же количества повторных зажиганий дуги в камере определяет рост перенапряжений на двигателе. Таким образом, максимальные перенапряжения будут наблюдаться на присоединениях с малыми длинами кабеля и мощными двигателями.

Высокие частоты собственных колебаний, сопровождающие процессы при отключении двигателей ВВ, могут привести к повреждению витковой изоляции двигателей. Неравномерность распределения напряжения по обмотке приводит к появлению на отдельных частях обмотки значительных перенапряжений, которые могут привести к ее повреждению или ускорению процесса старения изоляции обмотки. Наибольшие витковые перенапряжения возникают в начале и конце обмотки. Следует отметить, что в практике эксплуатации при отключении двигателя вакуумными выключателями достаточно часто наблюдается повреждение именно витковой изоляции статора.

Перенапряжения в сети 6 кВ при феррорезонансных явлениях

На секциях шин, работающих в режиме разземленной нейтрали, достаточно часто создаются условия возникновения феррорезонанса. Толчком для феррорезонанса может являться любое аварийное и коммутационное перенапряжение. На напряжении 6 кВ таким толчком может быть кратковременное ОЗ, в результате которого происходит смещение нейтрали и повышение напряжения здоровых фаз до линейного. В сетях с изолированной или заземленной через дугогасящий реактор нейтралью феррорезонанс может развиваться при наличии индуктивности с насыщающимся сердечником, включенной параллельно фазной емкости сети на землю. Такой индуктивностью может служить обмотка трансформатора напряжения, режее обмотка силового трансформатора блока или трансформатора собственных нужд.

Устойчивый феррорезонанс возможен при выполнении условий равенства реактивных параметров схемы на конкретном уровне перенапряжений и выполнении условий по балансу энергии. При попадании значения емкости шин в диапазон Срез феррорезонансные перенапряжения имеют максимальное значение и достигают величин $U_{\max} \geq 3U_\phi$.

Перенапряжения при резонансных явлениях в сети с ДГР

При установке ДГР схема сети представляет собой резонансный контур, в котором возможны значительные повышения напряжения на индуктивности катушки.

Повышение напряжения на реактированной нейтрали в нормальном режиме происходит за счет резонанса напряжений в контуре: емкость линии – индуктивность ДГР. В цепь протекания токов входит индуктивность трансформатора, в нейтраль которого подключен ДГР.

При резонансном заземлении и большой добротности реактора $q = X_p / R_p$ напряжение на нейтрали может быть определено упрощенно по выражению $U_N \approx q \cdot U_{NXX}$.

Поскольку добротность ДГР весьма велика (50–100), то даже при небольшой несимметрии сети при точной настройке катушки (или при попадании настройки катушки в резонанс), на нейтрали и, следовательно, на фазах могут возникнуть опасные перенапряжения.

В нормальном режиме эксплуатации смещение нейтрали может возникнуть в основном из-за различия емкости фаз ВЛ.

Значительное смещение нейтрали может возникнуть при попадании схемы в резонанс в случаях возникновения неполнофазных режимов подключения всей емкости сети, например, неполнофазном включении и отключении фаз выключателя линии.

Перенапряжения при ультрагармоническом резонансе

Существование высших гармоник в электрической сети в сочетании с возникновением однофазного дугового замыкания (ОДЗЗ) или неполнофазного режима в электрической сети 6–10 кВ может привести к появлению ультрагармонического резонанса, сопровождающегося значительным повышением напряжения в ряде случаев до (4–5)UФМ и более, с последующим пробоем изоляции.

Защита от внутренних перенапряжений

Ограничение внутренних перенапряжений можно проводить различными способами: использовать заземляющие дугогасящие реакторы, резистивное заземление нейтрали, ОПН и разрядники вентильные (РВ), резисторы, шунтирующие дугогасящие промежутки выключателей, RC-цепочки, ограничивающие коммутационные перенапряже-

ния при отключении вакуумными выключателями ненагруженных трансформаторов и электродвигателей, управление моментом замыкания контактов выключателя при включении и отключении и т.д.

В табл.1 приведены уровни коммутационных перенапряжений в сетях 6–35 кВ при коммутациях и однофазных дуговых замыканиях на землю устройства для их ограничения.

При рассмотрении вопросов защиты от перенапряжений при ОДЗ следует отметить, что традиционное применение в отечественных сетях 6–35 кВ исключительно схем с изолированной и компенсированной нейтралью не во всех случаях является оправданным. Мировой практикой накоплен большой опыт эксплуатации сетей среднего класса напряжения с различным режимом заземления нейтрали. Активно-индуктивное заземление нейтрали позволяет сохранить преимущества схем с компенсированной нейтралью, связанные с ограничением токов однофазного замыкания на землю. Вместе с тем кардинально решается проблема дуговых и феррорезонансных перенапряжений. Все это дает возможность сократить значительную часть повреждений изоляции оборудования.

В седьмой редакции ПУЭ (глава 1.2.16) разрешается применять заземление нейтрали сети через резистор, что позволяет кардинально решить проблемы дуговых и феррорезонансных перенапряжений, сокращая повреждения изоляции высоковольтного оборудования.

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

В качестве мер защиты оборудования от коммутационных перенапряжений могут быть использованы нелинейные ограничители перенапряжений и RC-цепочки.

Для надежной защиты изоляции двигателей от перенапряжений и ОПН и RC-цепочку необходимо устанавливать непосредственно на выводах двигателя.

В случае больших длин кабеля установка ограничительных аппаратов непосредственно за выключателем присоединения (в начале кабеля) может оказаться неэффективной, так как за счет волновых процессов в протяженном кабеле напряжение на двигателе превышает напряжение в месте установки ограничительного аппарата на 20–30%.

Осциллограмма процесса при установке на присоединении ОПН показывает, что ОПН ограничил перенапряжения на кор-

Уровни коммутационных перенапряжений в сетях 6–35 кВ при коммутациях и однофазных дуговых замыканиях на землю и устройства для их ограничения

№ п/п	Вид коммутации	Максимальная кратность неограниченных перенапряжений	Рекомендуемый уровень ограничения	Устройство для ограничения перенапряжений
1	Включение ВЛ и КЛ в нормальном симметричном режиме	2,0	–	резисторы, шунтирующие дугогасящие промежутки выключателей
2	Включение ВЛ и КЛ при наличии в сети ОЗЗ	3,0–3,5	2,6–2,8	ДГР Резистор в нейтрали ОПН
3	Отключение ненагруженных ВЛ и КЛ	4,0–4,3	2,6–2,8	ДГР Резистор в нейтрали ОПН
4	Отключение ненагруженных трансформаторов	5,0–6,0	3,0–4,3	ДГР Резистор в нейтрали ОПН
5	Отключение двойного замыкания на землю	3,3	2,6–3,0	Релейная защита ОПН
6	Включение электродвигателей при нормальном режиме сети 6–10 кВ	3,0–3,1	2,6–2,8	ОПН + Резистор в нейтрали
7	Включение электродвигателей при наличии в сети 6–10 кВ ОЗЗ	3,4	2,6–2,8	ДГР Резистор в нейтрали РВ RC-цепочка
8	Включение электродвигателей в процессе АВР и АПВ в сети 6–10 кВ	4,2	2,6–2,8	ОПН + Резистор в нейтрали
9	Отключение вращающихся электродвигателей 6–10 кВ	4,0–5,0	2,6–2,8	ОПН + Резистор в нейтрали
10	Отключение заторможенных электродвигателей 6–10 кВ	5,0–6,0	2,6–2,8	ОПН + Резистор в нейтрали
11	Коммутации вакуумными выключателями индуктивных токов в сети 6–10 кВ: а) срез тока при отключении заторможенного электродвигателя в конце кабеля; б) тоже, но при больших мощности электродвигателя и длине кабеля; в) эскалация напряжения; г) виртуальный срез тока	5,0–8,0	2,6–2,8	ОПН + Резистор в нейтрали RC-цепочка
12		2,6–2,9		
13		6,0–8,0		
14		крайне высокие кратности, но очень малая вероятность реализации		
15	ОДЗ в сетях с изолированной нейтралью	3,0–3,5	2,4–2,6	Резистор в нейтрали
16	ОДЗ в сетях с резонансно заземленной нейтралью	2,7–3,5	2,4–2,6	Резистор в нейтрали

пусной изоляции двигателя до допустимого значения. Однако, поскольку ОПН «подключается» лишь при определенном повышении напряжения на двигателе, он практически не сказывается на начальной

стадии процесса, характеризующейся достаточно высокими частотами, а следовательно, и возможными значительными перенапряжениями на витковой изоляции двигателя.

Применение же *RC*-цепочки существенно влияет на изменение частоты собственных колебаний процесса при отключении тока промышленной частоты. Поэтому вероятность повторных зажиганий дуги в ВДК при оснащении двигателя *RC*-цепочкой снижается.

Конденсаторы снижают волновое сопротивление цепи, ограничивая перенапряжения, вызванные срезом тока. Резисторы способствуют затуханию высокочастотного тока, уменьшают вероятность повторных зажиганий, ограничивают воздействие на другие фазы.

Если же при относительно низкой скорости восстановления электрической прочности в ВДК даже при установке *RC*-цепочки произойдет повторное зажигание дуги, то на дальнейший характер процесса, характеризующийся весьма высокими частотами собственных колебаний, *RC*-цепочка практически не оказывает влияния.

В связи с этим параметры *RC*-цепочки выбираются исходя из условия отсутствия повторного зажигания дуги в ВДК.

ОПН или *RC*-цепочки, установленные непосредственно у зажимов двигателя, позволяют избежать возможных опасных перенапряжений, возникающих как при отключениях, так и включениях присоединений с двигателями.

RC-цепочка, в отличие от ОПН, позволяет существенно ограничить крутизну импульса, а, следовательно, и возможные значительные перенапряжения на витковой изоляции двигателя.

Режим заземления нейтрали 6 кВ практически не сказывается на уровнях высокочастотных коммутационных перенапряжений.

Следует также отметить, что повсеместный переход от разрядников к нелинейным ограничителям перенапряжений (ОПН) породил проблему повышенной аварийности ОПН в сетях 6–35 кВ при дуговых замыканиях на землю. Длительные воздействия дуговых перенапряжений при отсутствии средств их подавления приводят к необходимости применения ОПН с высоким уровнем ограничения, что снижает их эффективность при коммутационных перенапряжениях. В противном случае, при неквалифицированном подходе к выбору ОПН, они не выдерживают режима ОДЗ и выходят из строя, зачастую с развитием аварии.

Опыт эксплуатации ограничителей в сетях с разземленной нейтралью показывает случаи повреждения ОПН в режиме дли-

тельного однофазного замыкания. Такие случаи приведены в информационных материалах Башкирэнерго, Челябинскэнерго, Саратовэнерго, Кузбассэнерго, Новосибирскэнерго.

В сетях, работающих в режиме разземленной нейтрали, режимы длительного дугового замыкания могут привести к тепловой нестабильности ОПН. В этом случае использование ОПН возможно только при совместном подключении к нейтрали резисторов для ограничения дуговых перенапряжений.

Общие положения по комплексному подходу к выбору средств ограничения перенапряжений в сетях крупных промышленных предприятий

Эффективная система защиты электрических сетей 6–10 кВ, содержащих электрические двигатели, может быть выполнена с помощью следующих мероприятий взаимно дополняющих друг друга:

- оснащение нулевой точки сети высокоомным резистором для исключения опасных перенапряжений при ОДЗ, охватывающих все оборудование сетей, а также эффективного подавления различных резонансных и феррорезонансных процессов (при больших величинах емкостных токов однофазного замыкания на землю резистор устанавливается параллельно ДГР);

- оснащение присоединений с двигателями защитными аппаратами (ОПН или *RC*-цепочками), устанавливаемыми преимущественно непосредственно у двигателей для обеспечения надежной эксплуатации корпусной и витковой изоляции статора двигателей при их коммутациях.

Исходя из изложенного выше при выборе аппаратов для защиты от перенапряжений в сети 6 кВ, содержащих электрические двигатели, может быть принят следующий ряд уровней ограничения перенапряжений (в долях амплитуды наибольшего фазного рабочего напряжения $U_{\text{фм ампл}} = 6,3 \cdot \sqrt{2} / \sqrt{3} = 5,14$ кВ):

- ограничение перенапряжений при ОДЗ за счет оснащения нулевой точки сети высокоомным резистором – 2,4–2,6 о.е. (12,33–13,34 кВ);

- ограничение перенапряжений при коммутации электрических двигателей за счет установки ОПН или *RC*-цепочек – корпусной изоляции на уровне 2,7–2,8 о.е. (13,8–14,4 кВ) и витковой на уровне 4,3–5,6 о.е. (22,1–28,8 кВ).

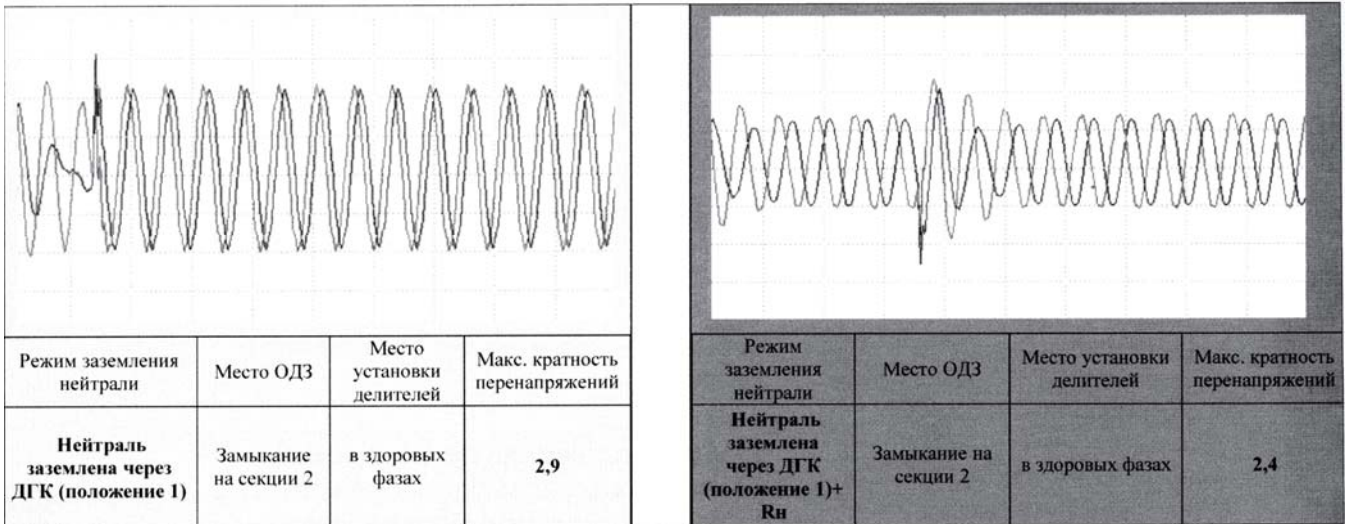
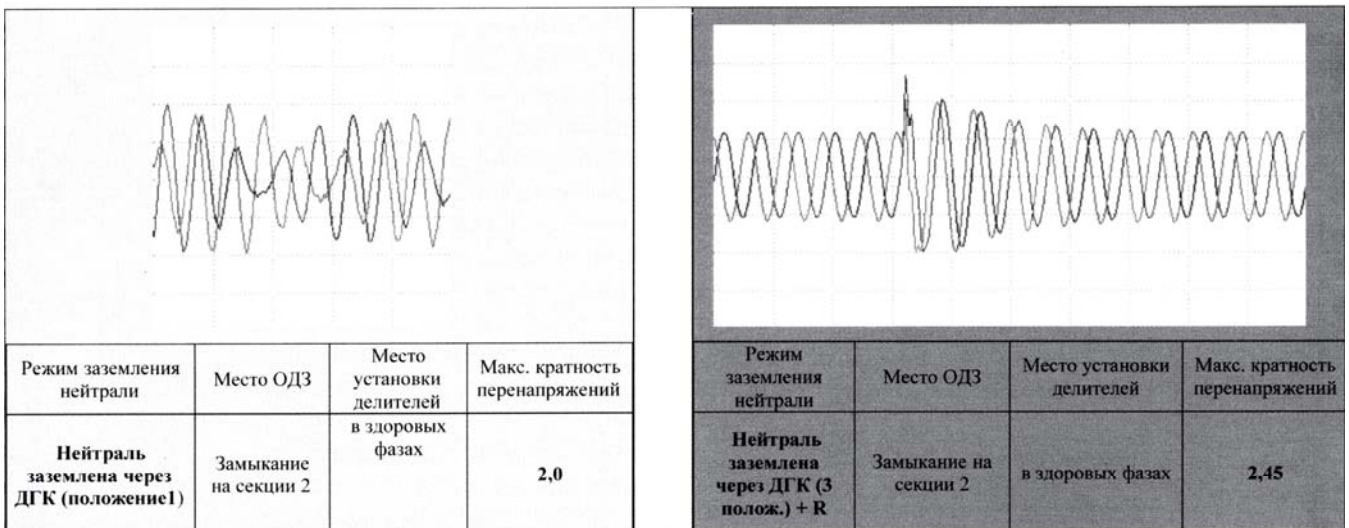


Рис. 1. Характерные экспериментальные осциллограммы перенапряжений в фазах А и С при искусственном ОДЗ в сети 35 кВ ПС Тисульская



процесс восстановления фазных напряжений происходит через биения

процесс восстановления фазных напряжений происходит без биений

Рис. 2. Характерные экспериментальные осциллограммы перенапряжений в фазах А и С при искусственном ОДЗ в сети 35 кВ ПС Тисульская

При резистивном заземлении нейтрали в случае возникновения дуговых замыканий резистор обеспечивает быстрый разряд емкости здоровых фаз и тем самым устраняет эскалацию роста напряжения нейтрали и фаз. Резистор должен выбираться из условия снижения напряжения на нейтрали между дуговыми пробоями до значения, исключая эскалацию перенапряжений при последующих пробоях ослабленной изоляции аварийной фазы.

Для вывода нейтральной точки сети 6 кВ секции предлагается использовать ФМЗО-40/6.

В случае установки на двигателях RC-цепочек емкостный ток однофазного замыка-

ния на землю существенно увеличится, что соответственно приведет к уменьшению требуемого номинала резистора для заземления нейтрали сети.

Номинал резистора должен также выбираться с учетом обеспечения подавления резонансных и феррорезонансных процессов.

Номинал резистора может быть выбран не только по условию ограничения дуговых перенапряжений, но и условию устойчивого срабатывания защит от однофазных замыканий на землю.

Измерение перенапряжений при опытных коммутациях в реальных сетях и моделирование процессов возникновения и рас-

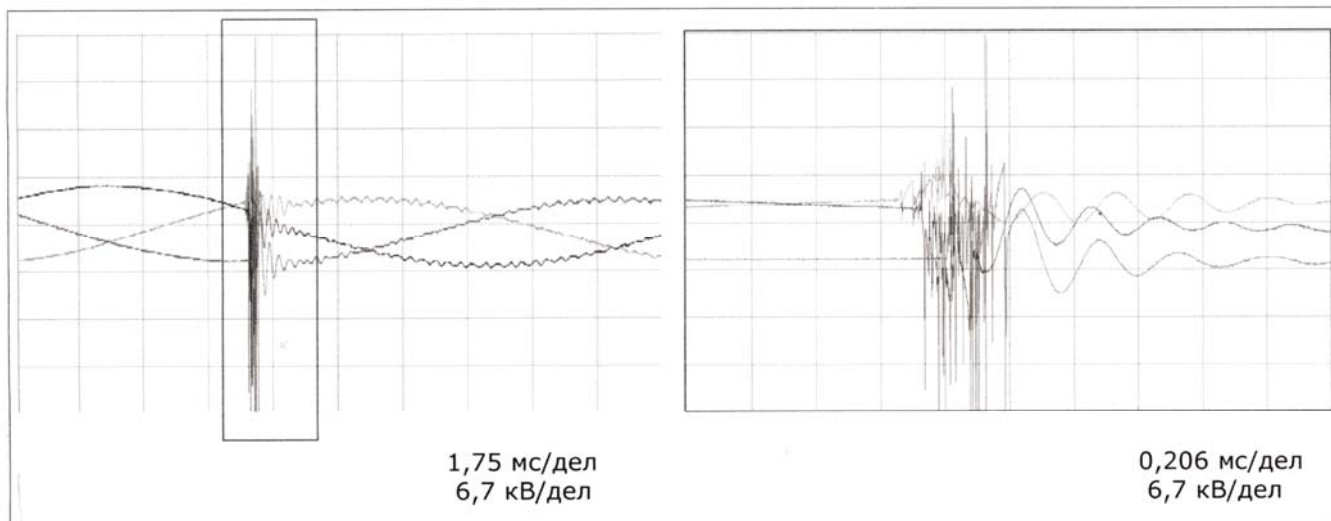


Рис.3. Осциллограмма переходного процесса при отключении двигателя КН-2А (максимальная кратность перенапряжения 5,2Uф)

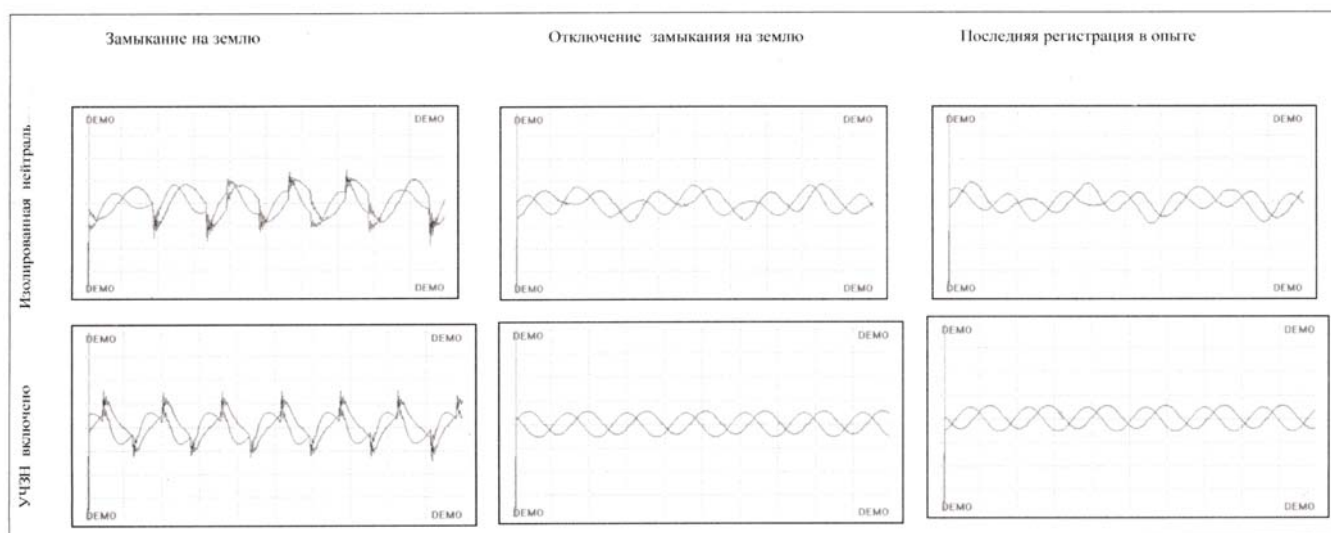


Рис.4. Феррорезонанс ТН

пространения перенапряжений позволяют выявить причины их возникновения и выбрать мероприятия по их ограничению.

Работы с использованием комплексного подхода к выбору средств ограничения перенапряжений были выполнены для ОАО «Сеgezского ЦБК» и ОАО «Металлургический завод им. А.К. Серова».

Для данных предприятий был выполнен анализ сети для различных нормальных и ремонтных режимов, определены расчетным путем, а также с помощью экспериментальных замеров величины емкостных токов однофазного замыкания на землю, выданы рекомендации по ведению компенсации емкостного тока однофазного замыкания на землю, разработаны рекомендации и мероприятия для ограничения перенапряжений.

Проведенный анализ переходных процессов в сети ГРУ и СН 6 кВ ОАО «Сеgezского ЦБК», сети 6 кВ ГПП-1 и ГПП-2 ОАО «Металлургический завод им. А.К. Серова» показал, что в процессе эксплуатации возможно возникновение опасных для изоляции электрических машин перенапряжений при ОДЗ и коммутации вакуумных выключателей. В связи с этим необходима разработка и реализация специальных мероприятий для ограничения опасных перенапряжений.

Результаты экспериментальных замеров токов ОЗЗ показали наличие в токе значительной доли высших гармоник.

При наличии в токе значительной доли высших гармоник:

- величины тока, полученные с помощью стрелочных и цифровых амперметров, недо-

Результаты измерений напряжений на нейтрали ПС Макаракская

Схема включения	Подключение резистора к Т-2-10	U ₀ , В				
		Положение переключателя ДГР, ток				
		5 I=12,2 А	4 I=10,6 А	3 I=9,2 А	2 I=7,7 А	1 I=6,2 А
МСВ-35 откл. ЛЭП-Т-8 вкл. ЛЭП-Т-Б вкл. ЛЭП-Т-К вкл. ЛЭП-Б-К откл.	отключен	760	1000	2200	18000 (сигнал "земля")	2200
	подключен	700	820	1100	1200	1050
МСВ-35 откл. ЛЭП-Т-8 вкл. ЛЭП-Т-Б + + ЛЭП-Б-К вкл. ЛЭП-Т-К вкл.	отключен	1400	2600	22000 (сигнал "земля")	2300	1200
	подключен	900	1100	1300	1200	900
Т-1-10 35 кВ откл. МСВ-35 вкл. ЛЭП-Т-8 вкл. ЛЭП-Т-Б + + ЛЭП-Б-К вкл. ЛЭП-Т-К вкл.	отключен	2800 (сигнал "земля")	15000 (сигнал "земля")	3400	1600	1100
	подключен	1400	1500	1400	1100	870
Т-1-10 35 кВ откл. МСВ-35 вкл. ЛЭП-Т-8 вкл. ЛЭП-Т-Б вкл. ЛЭП-Т-К вкл. ЛЭП-Б-К откл.	отключен	1300	2300	15000 (сигнал "земля")	3200	1500
	подключен	950	1200	1400	1300	1000

стоверны и не могут быть использованы для настройки тока компенсации ДГР;

- определение емкостного тока ОЗЗ (тока компенсации ДГР) необходимо производить на основании осциллограмм с выделением гармоники 50 Гц и вычисления ее значения;

- величины емкостного тока ОЗЗ, полученные на основании замеров напряжения смещения нейтрали с сети с ДГР, являются достаточно достоверными.

Настройка тока компенсации ДГР может быть проведена с достаточной степенью точности по величинам емкостных токов, полученных расчетным путем с учетом реального состояния сети.

Для четырех контрольных точек в нормальном режиме работы сети 6 кВ ОАО «Сегежского ЦБК» качество электроэнергии соответствует требованиям ГОСТ 13109–97 по коэффициенту искажения синусоидальности кривой напряжения и по коэффициентам *n*-й гармонической составляющей, отклонениям частоты и коэффициенту несимметрии напряжения по обратной последовательности. По отклонению напряжения КЭ соответствует требованиям ГОСТ 13109–97 для контрольных точек 17Ш, 18Ш, 1ШЛ, не соответствует – для 4ШЛ.

Коэффициенты *n*-х гармонических составляющих напряжения для средних значений не превышают 1,2 %, а для максимальных значений 1,9 %. Наиболее существенные

гармоники напряжения ($KU_{i\max}$) – 3-я (до 1,637 %), 5-я (до 0,59 %), 7-я (до 0,672 %), 9-я (до 0,938), 11-я (до 1,891), 13-я (до 1,473).

В результате выполненной работы по исследованию перенапряжения и выбору параметров устройств для ограничения перенапряжений были предложены следующие меры ограничения перенапряжений в сети 6 кВ ОАО «Сегежского ЦБК»:

1. Для защиты секций шин 6 кВ от перенапряжений при однофазных дуговых замыканиях на землю и резонансных явлениях рекомендуется для их эффективного ограничения выполнить резистивное заземление нейтрали сети с помощью резисторов номиналом 300 Ом, устанавливаемых параллельно ДГР.

Проведенный анализ повышения селективности определения аварийного фидера существующими вариантами защит показал, что установка заземляющего резистора 300 Ом повышает эффективность функционирования защит от ОЗЗ.

2. Применение ОПН для защиты изоляции ЭД не снижает вероятности возникновения повторных зажиганий дуги и не исключает возможности падения на обмотку двигателя волны напряжения с крутым фронтом. Установка же демпфирующей RC-цепочки приводит как к более глубокому ограничению уровней перенапряжений, так и к существенному снижению количества повторных зажиганий дуги, облегчая тем самым нагруз-

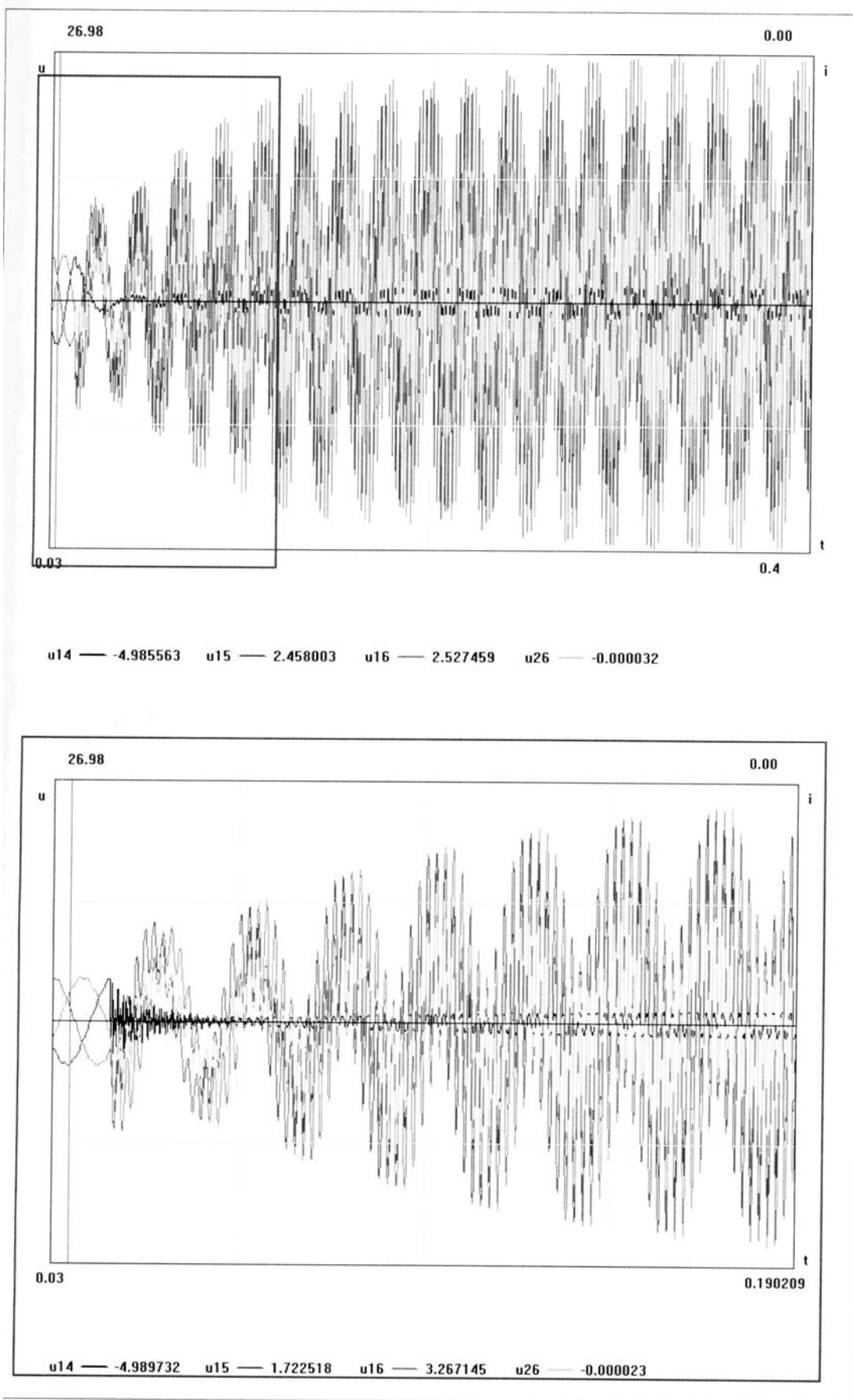


Рис. 5. Расчетная осциллограмма развития резонансного процесса на 11-й гармонике вследствие возникновения в электрической сети 6 кВ металлического замыкания на землю (амплитуда гармоники 5% основного напряжения)

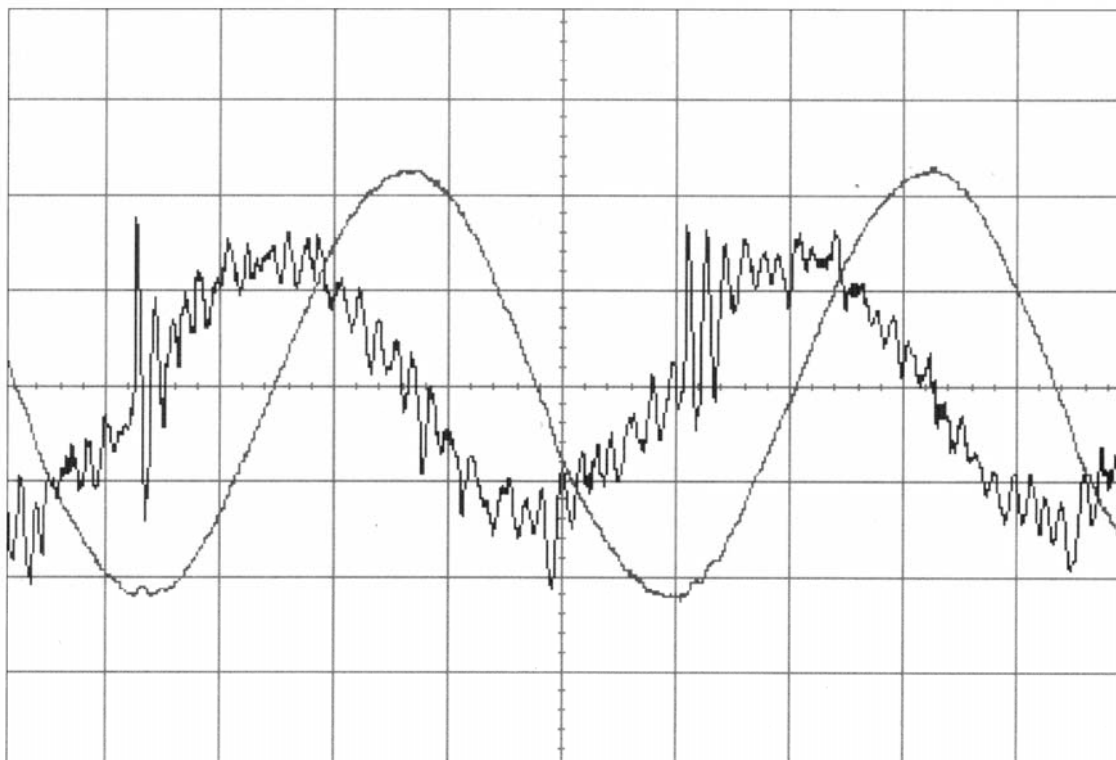


Рис. 6. Ток ОЗЗ и ЗУО ОАО «Металлургический завод им. А.К. Серова»

ку на витковую изоляцию ЭД и снижая интенсивность её старения.

3. Установить на зажимах ответственных двигателей защитные *RC*-цепочки.

4. Установить по возможности на зажимах всех остальных двигателей ОПН. Надежная защита изоляции ЭД достигается при установке ОПН непосредственно у двигателя, например, аппаратов фирмы «ФЕНИКС-88» ОПН-6/6,5-10(1) УХЛ1, продукция которой отличается высоким качеством и надёжностью.

5. Надежная эксплуатация витковой изоляции ЭД может быть достигнута лишь при отсутствии повторных заиганий дуги в ВДК, т.е. при использовании камер с высокой начальной скоростью восстановления электрической прочности межконтактного промежутка (порядка 60–80 кВ/мс). В связи с этим может быть рекомендовано в дальнейшем при замене выключателей приобретать аппараты с гарантированной высокой начальной скоростью восстановления электрической прочности межконтактного промежутка ВДК.