

СОВЕРШЕНСТВОВАНИЕ РАБОТЫ РАСПРЕДЕЛИТЕЛЬНЫХ СЕТЕЙ НАПРЯЖЕНИЕМ 6–10 кВ

Сивокобыленко В.Ф., Дергилев М.П., Левшов А.В.
Донецкий национальный технический университет
Мусяенко А.Г.
Донецкие электрические сети
svf@elf.dgtu.donetsk.ua

It is shown, that one of principal causes of high damageability of an electric equipment in branch circuits a voltage 6 - 10 kV are single-phase earthings. Recommendations are given and circuit decisions which practical realization allows essentially to increase reliability of functioning of an electric equipment of networks with high-scale of a deterioration of the isolation, working in a mode with the insulated neutral are offered.

В условиях постоянного ухудшения технического состояния распределительных сетей из-за отсутствия необходимых средств на своевременную замену изношенного или качественный ремонт поврежденного электрооборудования всё острее становится проблема поддержания на достаточно необходимом уровне надежности работы систем электроснабжения потребителей электрической энергии. Являясь самыми протяженными, распределительные сети зачастую работают в весьма тяжелых условиях загрязнения, увлажнения, частых электродинамических и термических перегрузок, а средняя продолжительность эксплуатации большей части основного электрооборудования этих сетей значительно превышает нормативные сроки службы.

Всё это привело к заметному увеличению повреждаемости электрооборудования сетей по причинам различных дефектов на линиях, в том числе развивающихся под действием эксплуатационного напряжения. Только за последние десять лет средний удельный показатель повреждаемости электрооборудования сетей по электрическим причинам возрос примерно на порядок. Так, по данным опыта эксплуатации Донецких электрических сетей, в настоящее время удельная повреждаемость с учетом поврежденного при испытаниях оборудования, составляет более 130 повреждений на каждые 100 км сети в год. В подавляющем большинстве случаев (до 90 % от общего числа нарушений нормальной работы сети) повреждение начинается с пробоя изоляции на землю, а затем больше половины из них (до 70 %) развивается в междуфазные короткие замыкания или многоместные пробоя изоляции с групповым (две, три и более единицы) выходом из строя электрооборудования. Причинами такого характера развития повреждений являются электрические перегрузки, обусловленные потоком внутренних перенапряжений, воздействующих на изоляцию. Наибольшую опасность представляют дуговые перенапряжения, возникающие в сети при перемежающемся (неустойчивом) характере горения дуги в месте пробоя фазной изоляции на землю. Таким образом, основным направлением борьбы за повышение надежности работы сетей среднего напряжения является предотвращение коммутационных, и особенно, дуговых перенапряжений.

В сложившихся условиях эффективное решение задачи существенного повышения уровня надежности работы распределительных сетей может быть найдено в комплексном подходе к решению этой проблемы. С одной стороны, необходимо идти по пути постепенной замены электрооборудования с изношенной изоляцией на новое, для которого большинство внутренних перенапряжений не будут опасными в такой степени, а с другой – принять меры по предельному снижению всех электрических воздействий на ослабленную изоляцию, создав условия для продления срока эксплуатации состарившегося электрооборудования.

На пути замены изношенного электрооборудования необходимо предусмотреть возможность перевода сети напряжением 6кВ или отдельных, особо перегруженных ее участков, на напряжение 10 кВ. При выборе коммутационной аппаратуры следует отдавать предпочтение вакуумным выключателям, которые, обладая большим коммутационным ресурсом, имеют ряд достоинств перед другими видами коммутационных аппаратов, особенно хорошо проявляются эти преимущества при необходимости проведения частых коммутаций. На секционных выключателях следует предусмотреть устройства АВР, а все отходящие присоединения должны быть оборудованы устройствами АПВ и релейной защитой от однофазных замыканий на землю. При этом большая работа должна быть проделана по совершенствованию защит, основанных на использовании токов и напряжений нулевой последовательности и разработке новых, более совершенных устройств РЗА на микропроцессорной основе, реагирующих на параметры переходных процессов при однофазных замыканиях на землю (ОЗНЗ). Неотложного решения требует также проблема создания аппаратуры сравнительно быстрого и селективного отыскания поврежденного присоединения в сети и определения места повреждения на нем.

Повышение надежности работы распределительных сетей может быть достигнуто путём существенного ограничения внутренних перенапряжений за счёт оптимизации режима заземления нейтрали. Как известно, режим нейтрали электрической сети высокого напряжения является важнейшим фактором, определяющим идеологию эксплуатации оборудования, влияющим на выбор изоляции и организацию релейной защиты. Этот режим определяет переходные электромагнитные процессы и связанные с ними перенапряжения, условия электробезопасности при замыканиях на землю и требования к заземляющим устройствам электроустановок. Распределительные сети 6–10 кВ относятся к сетям с малым током замыкания на землю. В нашей стране такие сети

исторически разрабатывались и строились с изолированной или заземлённой через дугогасящий реактор нейтралью. Основным достоинством сети с изолированной нейтралью является высокая степень надёжности электроснабжения потребителей электрической энергии при относительно малых расходах на резервирование, поскольку в режиме при наиболее частых видах повреждения, однофазных замыканиях на землю, сеть может оставаться в работе длительное время (до четырёх часов), достаточное для отыскания и устранения места повреждения. Однако в условиях слабой гальванической связи такой сети с нулевым потенциалом земли ОЗНЗ неизбежно сопровождается возникновением специфических для этого режима перенапряжений, к основным из которых относятся дуговые перенапряжения. Такие перенапряжения часто существуют в виде переходных процессов при перемежающейся дуге и опасны для электрооборудования высокими кратностями, своей продолжительностью и шириной охвата сети, электрически связанной с местом повреждения.

Возникновение перенапряжений при однофазном дуговом замыкании происходит за счёт смещения напряжения нейтрали сети, что приводит к возрастанию напряжений на здоровых фазах до линейных. Наложённая на установившееся значение напряжения высокочастотная составляющая переходного процесса существенно повышает кратность дуговых перенапряжений.

По результатам большого объёма исследований, проведенных на кафедре "Электрические станции" ДонНТУ с использованием математических и физических моделей для разных по параметрам и режиму заземления нейтрали электрических сетей, установлено, что основными факторами, определяющими характер переходных процессов и величину перенапряжений при ОЗНЗ в сети с изолированной нейтралью, являются ёмкость фаз по отношению к земле и междуфазная ёмкость, индуктивность источника питания и трансформаторов, характер нагрузки, сопротивление в месте замыкания фазы на землю и т.д. Для возникновения предельной кратности перенапряжений в сети с заданными параметрами решающее значение оказывают: величина мгновенного напряжения на поврежденной фазе в момент первичного зажигания дуги, момент погасания дуги и напряжение при повторном и последующих зажиганиях дуги. Ниже для примера представлены расчетные осциллограммы переходных процессов в сети при дуговом замыкании фазы на землю. Первый и последующий пробои изоляции произошли при максимуме напряжения в поврежденной фазе, а гашение дуги в момент перехода тока промышленной частоты через нуль (рис.1) или при переходе через нуль полного тока замыкания (рис.2). Как показали исследования для разных по параметрам электрических сетей, максимум перенапряжений на опережающей фазе после первого пробоя изоляции достигает (2,4 – 2,5) Уф, а при последующих пробоях величина перенапряжений на здоровых фазах возрастает. Эскалация (постепенное нарастание) перенапряжений в сети при горении дуги по второму сценарию (рис.2) обусловлено ростом напряжения на нейтрали в процессе многократного зажигания и гашения дуги тока замыкания на дуговом промежутке. Для распределительных сетей, с характерными для них параметрами, величина дуговых перенапряжений может составлять (3,2 – 3,5) Уф. При наличии в сети несимметрии напряжений по фазам перенапряжения могут существенно возрасти, так как исследованиями установлено, что кратность дуговых перенапряжений растёт примерно пропорционально величине смещения нейтрали в доаварийном режиме.

По данным [1] допустимый коэффициент кратности для кабельных линий и трансформаторов напряжением 6–10 кВ, находящихся в эксплуатации до 5 лет, составляет 4,3, а при эксплуатации свыше 5 лет – (2,8 – 3,0) Уф. Для электродвигателей допустимый коэффициент кратности равен 2,4, если срок эксплуатации не превышает 5 лет, и 1,8 Уф – при эксплуатации свыше 5 лет. Учитывая, что срок эксплуатации электрооборудования современных распределительных сетей в подавляющем большинстве случаев значительно превосходит пятилетний срок, то предельно допустимой кратностью для кабельных линий и трансформаторов в сложившейся обстановке следует считать равной 2,8 Уф, а для электродвигателей до 1,8 Уф. Учитывая вышеизложенный характер переходных процессов, обусловленный многочисленными зажиганиями и гашениями дуги в месте пробоя изоляции и сопровождающийся длительными и многократными перенапряжениями, а также современное состояние изоляции электрооборудования распределительных сетей, можно заключить, что в условиях отсутствия надлежащих мер по ограничению перенапряжений и отсутствия селективной защиты от замыканий на землю становится нецелесообразной длительная работа сети с однофазным замыканием на землю, которая не только не позволяет повысить надёжность её работы, а наоборот, увеличивает размеры аварии, приводя к множественным пробоям изоляции с групповым выходом из строя электрооборудования.

Вместе с тем существуют возможности для повышения надёжности работы всей системы электроснабжения без отключения электропотребителей в условиях сохраняющегося однофазного замыкания в течение некоторого времени, необходимого для поиска и устранения повреждения или включения резервного питания. Однако для этого необходимо выполнение трёх условий, первое из которых требует ограничения тока замыкания в месте повреждения изоляции. Причем этот ток должен быть настолько малым, чтобы по возможности было гарантировано либо самопроизвольное погасание дуги, либо переход её в устойчивое замыкание с весьма малой вероятностью развития повреждения в междуфазное короткое замыкание. Такими допустимыми токами в соответствии с ПТЭ у нас считаются токи не более 30, 20 и 10 А для сетей напряжением 6, 10 и 35 кВ, соответственно. Следует однако заметить, что во многих странах дальнего зарубежья безопасными считаются значительно меньшие по величине токи. Так, например, на основе обобщения длительного опыта эксплуатации распределительных сетей напряжением 4–15 кВ в США предельными для этих сетей приняты токи замыкания не более 7–10 А [2,3]. И это, по-видимому, справедливо, особенно если речь идет о кабелях с алюминиевыми жилами.

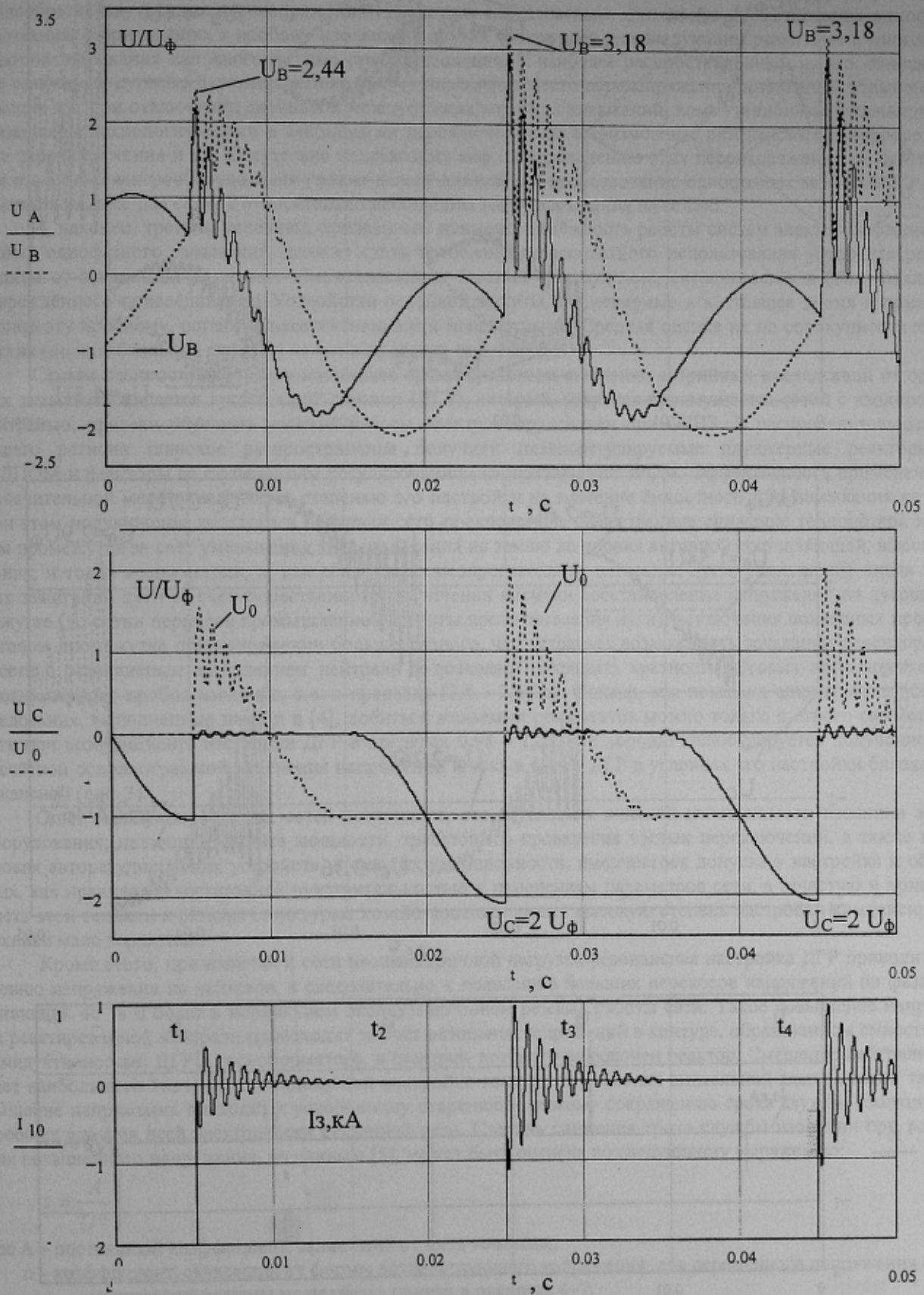


Рисунок 1 – Процессы при дуговом замыкании фазы С на землю в сети с изолированной нейтралью (ток глухого замыкания на землю-30А, гашение дуги при переходе через нуль тока после затухания его высокочастотной составляющей)

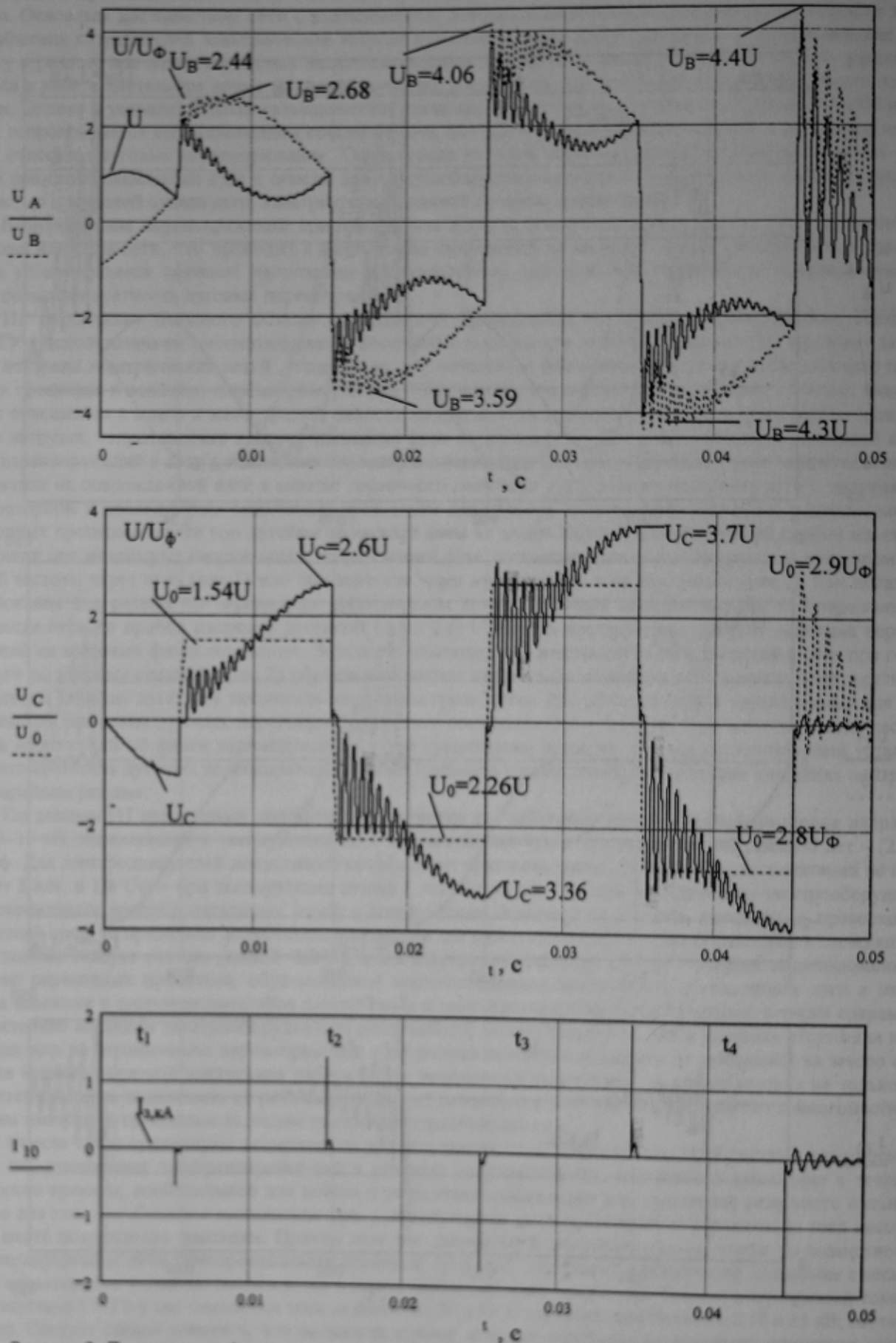


Рисунок 2- Процессы при дуговом замыкании фазы С на землю в сети с изолированной нейтралью (ток дугового замыкания на землю-30 А, гашение дуги при переходе через нуль тока до затухания его высокочастотной составляющей)

Однако не только ограничение тока в месте повреждения даёт гарантию локализации и последующего не-развития этого повреждения. Необходимо выполнение второго условия - принятия надлежащих мер по ограничению внутренних перенапряжений. Как известно, однофазным замыканиям в сети сопутствует большое разнообразие внутренних перенапряжений, делающих небезопасным длительное существование однофазного замыкания, и приводящих к пробоям изоляции в других точках сети с последующим развитием в многофазные короткие замыкания или множественные пробой изоляции. К наиболее распространённым из них относятся ранее описанные дуговые перенапряжения. Кроме них имеют место перенапряжения, вызванные обрывом заземляющих дуг при отключении двойных и междуфазных коротких замыканий; коммутационные перенапряжения, связанные с технологическими и аварийными переключениями; всевозможные резонансные и феррорезонансные перенапряжения и т.д. Отсутствие надлежащих мер по ограничению этих перенапряжений до безопасного для изоляции электрооборудования уровня делает длительное существование однофазных замыканий в сети не безопасным даже для сетей с относительно небольшим током замыкания на землю.

И, наконец, третьим условием, призванным повысить надёжность работы систем электроснабжения в условиях однофазного замыкания, должно стать требование повсеместного использования устройств релейной защиты от замыканий на землю, обеспечивающих быстрое обнаружение, сигнализацию и (или) отключение повреждённого присоединения. Устройства релейной защиты, применяемые в настоящее время и призванные решать эту проблему, остаются неселективными и ненадёжными. Средняя оценка их по совокупности характеристик (по пятибалльной системе) лежит в пределах от 2,2 до 3,0.

Самым распространённым в настоящее время средством снижения аварийных последствий от однофазных замыканий является дугогасящий реактор (ДГР), который, сохраняя преимущества сетей с изолированной нейтралью, призван улучшить условия работы электрооборудования при ОЗНЗ. В распределительных сетях нашего региона широкое распространение получили плавнорегулируемые плунжерные реакторы типа РЗДПОМ и реакторы со ступенчатым регулированием настройки типа ЗРОМ. Эффективность применения ДГР в значительной мере определяется степенью его настройки на значение ёмкостного тока замыкания на землю. При этом подключение реактора к нейтрали сети предполагает: существенное снижение теплотерь на дуговом промежутке за счёт уменьшения тока замыкания на землю до уровня активной составляющей, высших гармоник, и токов несимметрии, и, как следствие, самопроизвольное погасание дуги; уменьшение числа повторных зажиганий дуги за счёт существенного увеличения времени восстановления напряжения на дуговом промежутке (до сотни периодов промышленной частоты после погасания дуги); исключения повторных пробоев на дуговом промежутке при напряжении больше фазного, что устраняет возможность эскалации перенапряжений в сети с резонансным заземлением нейтрали и позволяет сохранить кратность дуговых перенапряжений на уровне первого пробоя изоляции, т.е. в пределах $(2,4 - 2,6)U_{\phi}$. Однако, как показали широкомасштабные исследования, выполненные нами и в [4], добиться желаемых результатов можно только в строго симметричной сети при коэффициенте настройки ДГР в пределах 0,98 - 1,02, что хорошо иллюстрируется полученной нами расчётной осциллограммой изменения напряжений и тока в сети с ДГР в условиях его настройки близкой к резонансной (рис. 3).

Опыт эксплуатации таких сетей показывает, что в условиях сильной изношенности изоляции электрооборудования; наличия дефицита мощности, требующего проведения частых переключений, а также низкого уровня авторегулирующих устройств, в силу их инерционности, имеющегося допуска в настройке и обладающих, как правило, недостаточной чувствительностью к изменениям параметров сети, а зачастую и принадлежность этой техники к разным структурам хозяйствования, делает высокую степень настройки компенсирующей техники мало вероятной.

Кроме этого, при наличии в сети несимметричной нагрузки резонансная настройка ДГР приводит к смещению напряжения на нейтрали, а следовательно к появлению больших перекосов напряжений по фазам, достигающих 40 % и более в нормальном эксплуатационном режиме работы сети. Такое повышение напряжения на реактированной нейтрали происходит за счёт резонанса напряжений в контуре, образованном ёмкостью сети и индуктивностью ДГР и трансформатора, в нейтраль которого подключен реактор. Смещение нейтрали достигает наибольшего значения при идеальной настройке контура. В условиях длительной эксплуатации такое повышение напряжения приводит к ускоренному старению и резкому сокращению срока службы изоляции электрооборудования всей электрически связанной сети. Степень снижения срока службы изоляции при воздействии повышенного напряжения, по данным [5], может быть оценена по следующему выражению:

$$t = \frac{A}{U^n},$$

где A - постоянный коэффициент, зависящий от вида изоляции;

n - коэффициент, зависящий от формы воздействующего напряжения, для переменного напряжения промышленной частоты может быть принят в пределах 4-7;

U - величина воздействующего на изоляцию напряжения.

Отсюда видно, что при увеличении фазного напряжения по отношению к земле всего на 20 % срок службы изоляции (при $n=4$) снижается в два раза.

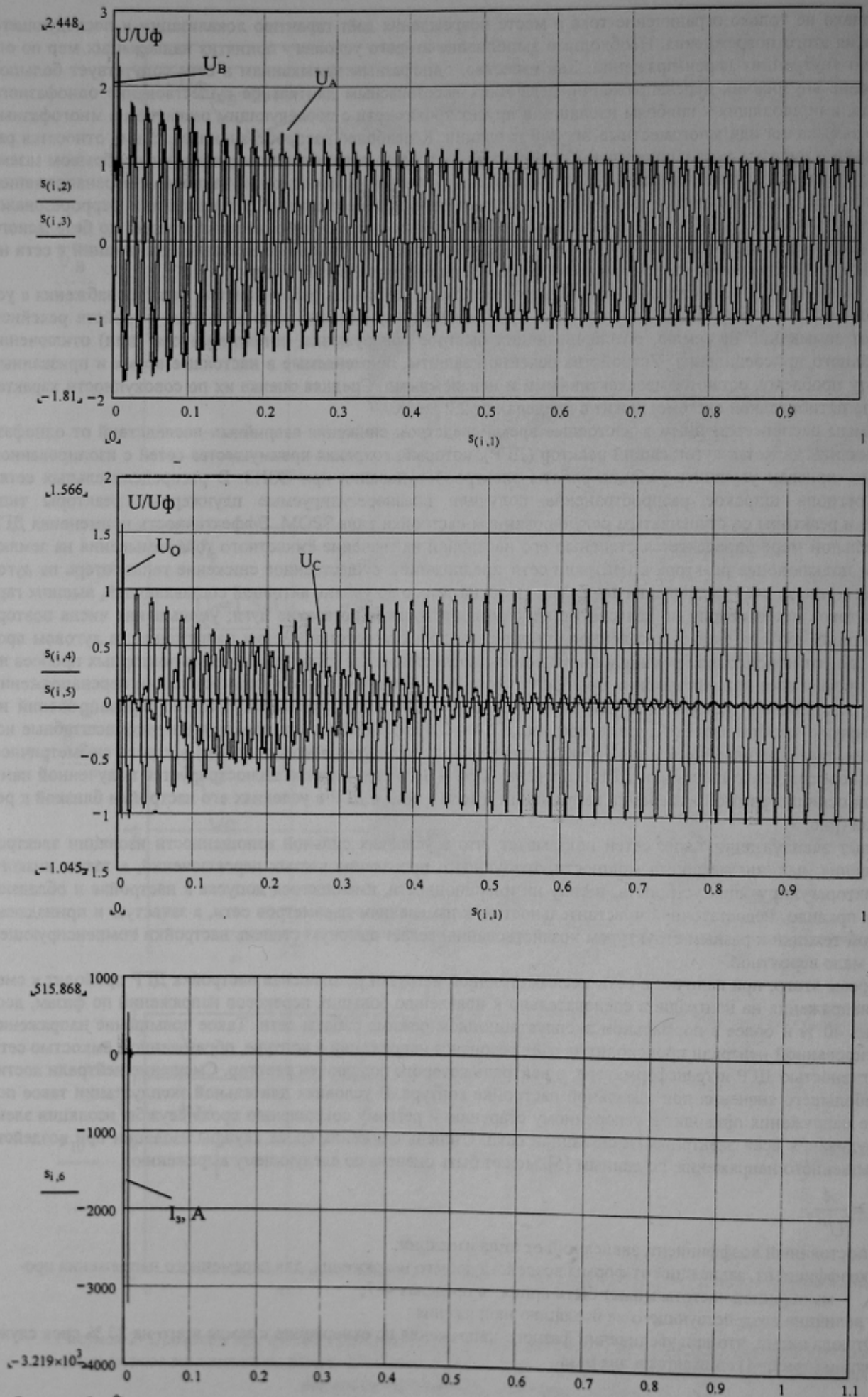


Рисунок 3 — Расчетные осциллограммы фазных напряжений и тока в месте замыкания на землю при пробое изоляции фазы C в условиях настройки ДГР, близкой к резонансной (сеть с током замыкания - 30A)

Расстройка компенсации приводит к существенному снижению эффективности от применения ДГР. Так, например, расстройка компенсации более чем на 5 % ведет к резкому увеличению кратности перенапряжений, а при настройке ДГР в режим перекомпенсации (рекомендуемый ПТЭ) на 25 % кратность перенапряжений в сети с ДГР уже может достигать 3 Uф и более. При наличии в сети несимметрии напряжений по фазам кратность неограниченных перенапряжений может резко возрасти, поскольку здесь, так же как и в сети с изолированной нейтралью, величина перенапряжений растёт пропорционально смещению нейтрали. Росту перенапряжений способствует и тот факт, что при неточной настройке ДГР процесс выравнивания напряжений фаз после погасания дуги носит характер биений (рис.4), амплитуды и частота которых определяются степенью расстройки компенсации и добротностью колебательного контура. При точной настройке ДГР или небольшой перекомпенсации, расстройка и возникновение биений при ОЗНЗ возможны при отключении присоединения с большим ёмкостным током подпитки. Опасность биений состоит в том, что для самовосстанавливающейся бумажно-масляной изоляции кабелей повторное замыкание на поврежденной фазе может произойти при напряжении близком к 2 Uф, что приведёт к максимальным перенапряжениям на здоровых фазах.

Одновременно с этим в сети с ДГР остаётся опасность возникновения больших кратностей перенапряжений при сочетании ОЗНЗ и неполнофазных режимов, возникающих при замедленной работе или отказе фаз выключателя и неточной настройке дугогасящего реактора. Учитывая выше изложенное, а также принимая во внимание то, что в современных распределительных электрических сетях с постоянно изменяющимися параметрами и резко возросшей нескомпенсированной частью тока замыкания, достигающего десятков ампер, эффективность реактора как в части гашения заземляющих дуг, так и в части ограничения перенапряжений резко снизилась, что привело к появлению большого числа сторонников отказа от традиционно применяемого способа резонансного заземления нейтрали сети.

В планах совершенствования условий работы электрооборудования в сетях с большим ёмкостным током замыкания перспективным считается замена существующих реакторов на новые магнитно-вентильные дугогасящие реакторы (МВДГР) типа РУОМ с плавным регулированием тока компенсации реактора и его автоматической настройкой [6] или переход на комбинированный способ заземления путем параллельного подключения к существующим реакторам высокоомных резисторов.

Реактор РУОМ представляет собой статическое электромагнитное устройство трансформаторного типа, плавное регулирование рабочего тока которого осуществляется за счёт подмагничивания участков магнитопровода постоянным током. При возникновении однофазного замыкания МВДГР автоматически и практически мгновенно выходит на режим, близкий к резонансной настройке, компенсируя ёмкостный ток замыкания на землю. Подключение параллельно ДГР высокоомного резистора, приводя к ухудшению добротности резонансного контура, позволяет улучшить условия работы электрооборудования в сети с резонансно - заземленной нейтралью даже в условиях значительной расстройки компенсации, в том числе и при отсутствии автокомпенсации. В этом случае даже при резонансной настройке реактора и наличии значительной несимметрии напряжений в сети можно подобрать такую величину резистора, при которой напряжение на нейтрали не будет превышать значения, нормируемого ПТЭ(0,15 Uф).

В первом приближении величина этого резистора R_N может быть выбрана по следующему соотношению:

$$R_N = \frac{U_{\phi}}{\Delta I_3},$$

где ΔI_3 – ток расстройки компенсирующего реактора.

Выбранный таким образом резистор обеспечит возможность работы сети в режиме однофазного замыкания на землю до полного устранения аварии. Одновременно с этим правильно выбранная величина шунтирующего ДГР резистора позволяет: исключить возможность значительного смещения нейтрали даже при резонансной настройке реактора и наличии в сети несимметрии напряжения по фазам; эффективно ограничить кратность дуговых перенапряжений до уровня, определяемого первым замыканием фазы на землю, т.е. до (2,3 – 2,5) Uф; полностью устранить возможность появления биений напряжения на фазах после погасания дуги даже при значительной расстройке реактора и, как следствие, избежать возможности появления многократных повторных зажиганий дуги на поврежденной фазе при пробивных напряжениях выше фазного; устранить возможность появления резонансных процессов в сети с ДГР и феррорезонансных процессов в трансформаторах напряжения; снизить уровень гармоник в сети, генерируемых несимметричной нагрузкой и ДГР; улучшить селективность и надежность работы защит от замыканий на землю в сетях с компенсированной нейтралью. Однако на этом пути имеют место трудности как с обеспечением термостойкости резисторов, так и с выбором оптимальных условий работы системы в целом.

В сетях с небольшим ёмкостным током замыкания на землю, где установка ДГР не нормируется, в силу высокой кратности дуговых перенапряжений, требующей принятия безотлагательных мер по их ограничению, в настоящее время активно обсуждаются вопросы изменения режима нейтрали и отказа от изолированной нейтрали в этих сетях. При этом предпочтение отдается режиму с резистивным заземлением, т.е. с заземлением нейтрали через ограниченную величину активного сопротивления.

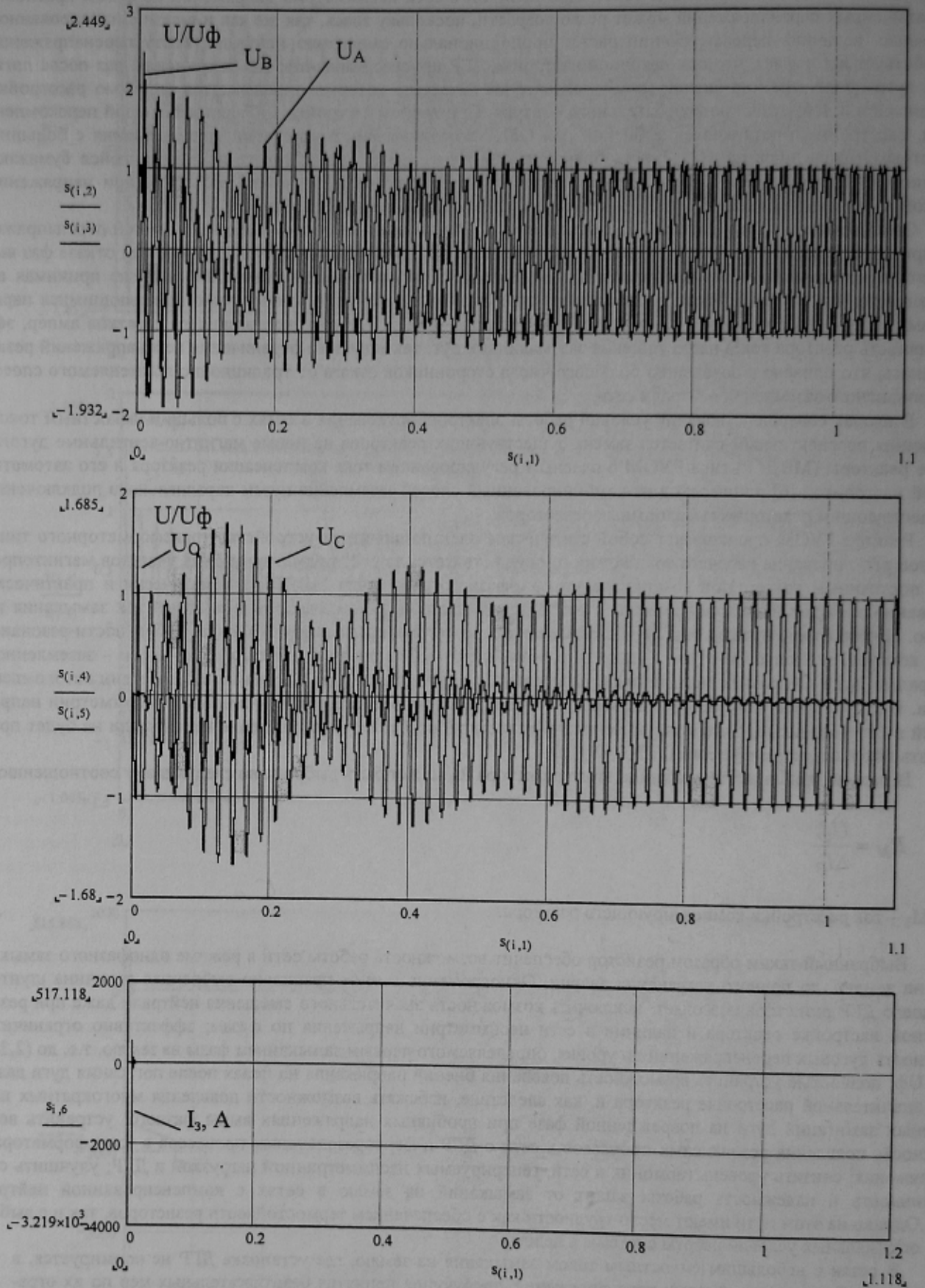


Рисунок 4 – Процессы при замыкании фазы C на землю в сети с ДГР
(сеть с током замыкания - 30А, перекompенсация 10%)

В случае отсутствия свободного доступа к нейтральной точке сети, заземляющий резистор рекомендовано подключать к нейтрали специального трансформатора небольшой мощности со схемой соединения обмотки высшего напряжения в звезду, а низшего – в треугольник. Такой режим заземления нейтрали позволяет эффективно ограничить дуговые перенапряжения до уровня, безопасного для эксплуатации электрических машин, трансформаторов и кабелей с ослабленной изоляцией. Ограничение кратности дуговых перенапряжений при резистивном заземлении нейтрали осуществляется за счет разряда емкости здоровых фаз и снижения напряжения на нейтрали до значения, исключающего эскалацию перенапряжений при последующих пробоях ослабленной изоляции аварийной фазы (рис. 5). Одновременно с этим заземляющие резисторы в нейтрали сети, как правило, эффективно подавляют всевозможные резонансные и феррорезонансные перенапряжения; способствуют ликвидации сверхтоков, обусловленных насыщением магнитопроводов измерительных трансформаторов и трансформаторов контроля изоляции, исключая тем самым термическое разрушение их обмоток и повышают надежность и селективность работы простейших защит от однофазных замыканий на землю.

Готовые рецепты для выбора номинала заземляющего резистора в настоящее время отсутствуют, однако исключить эскалацию напряжения на нейтрали в режиме ОЗНЗ можно только в условиях обеспечения разряда емкости здоровых фаз за время бестоковой паузы, то есть за $t=0,008-0,01$ с. Уменьшение величины сопротивления резистора приводит к увеличению тока ОЗНЗ, что обеспечивает, с одной стороны, быстрый разряд емкости фаз и уменьшение напряжения на нейтрали, а с другой – увеличение тока замыкания приводит к повышению энергии, рассеиваемой резистором. При увеличении номинала заземляющего резистора за время бестоковой паузы напряжения на нейтрали снижается не до нуля, а до какой-то величины ΔU , что приводит к росту величины дуговых перенапряжений. Поэтому в сетях с низким уровнем резервирования потребителей электрической энергии предпочтение следует отдавать высокоомному резистору в нейтрали сети. Высокоомные резисторы, обеспечивая должную защиту от перенапряжений, не ухудшают условий для гашения дуги, и активный ток, создаваемый ими, может быть использован для создания селективной токовой защиты, которая может действовать как на сигнал, так и на отключение в зависимости от условий обеспечения надежности и безопасности электроснабжения. В этом случае мощность заземляющих устройств должна определяться возможной необходимостью длительной работы в режиме однофазного замыкания на землю и обеспечения аperiodического процесса разряда емкости фаз сети.

Если существующая система электроснабжения потребителей достаточно надежна (несколько центров питания, наличие устройств АВР и т. д.), то следует отдавать предпочтение низкоомному резистору в нейтрали. Низкоомное резистивное заземление нейтрали призвано создать ток при однофазном замыкании в десятки и даже сотни ампер и, естественно, сочетается с устройством релейной защиты, действующей на немедленное отключение поврежденного присоединения. Величина тока в месте замыкания выбирается исходя из требуемой чувствительности работы устройств релейной защиты, а рекомендуемое значение номинала заземляющего резистора составляет в пределах 100 – 200 Ом для сетей 6 кВ и 150 – 300 Ом для сетей 10 кВ. Такой режим заземления нейтрали обеспечивает достаточно глубокое (до 2,2 – 2,4 Уф) ограничение перенапряжений и сокращает до минимума время их воздействия, уменьшает дрейф электрической нейтрали при однофазных замыканиях на землю и создает условия, при которых токи замыкания на землю будут иметь вполне определенные значения, не зависящие от оперативных состояний схем секций 6 или 10 кВ.

Резистивное заземление в сочетании с релейной защитой от однофазных замыканий на землю позволяет также существенно повысить надежность работы широко внедряемых в последние годы ограничителей перенапряжений ОПН, которые, как известно, обладают недостаточной термостойкостью при длительных воздействиях дуговых перенапряжений. Снижение энергетических нагрузок на ОПН при ограничении дуговых перенапряжений в сети с резистивно - заземленной нейтралью и сокращение длительности существования этого режима позволяет применять ОПН с уровнем ограничения вплоть до 2 Уф. Для защиты наиболее ответственных объектов с ослабленной изоляцией (двигающиеся машины, трансформаторы и др.) следует предусмотреть возможность установки дополнительных ОПН или R – С ограничителей в непосредственной близости от места присоединения их к питающей линии.

Таким образом, проблема повышения надежности работы распределительных сетей напряжением 6 – 10 кВ складывается из комплекса задач, эффективное решение каждой из которых может быть найдено индивидуально с учетом характерных особенностей каждой электрической системы питания и потребления на основе проведения большого объема научных и экспериментальных исследований, в том числе и в реальных сетях. Получение максимума преимуществ от выбранного способа увязывается со специфическими требованиями, предъявляемыми к сети, основными из которых, как правило, являются надежность системы электроснабжения потребителей и стоимость обеспечения заданного уровня надежности.

По результатам исследования переходных процессов в электрических сетях с различным режимом заземления нейтрали авторами работы предложен ряд схемных решений, практическая реализация которых обеспечит высокий уровень надежности функционирования электрооборудования сетей с высокой степенью изношенности изоляции.

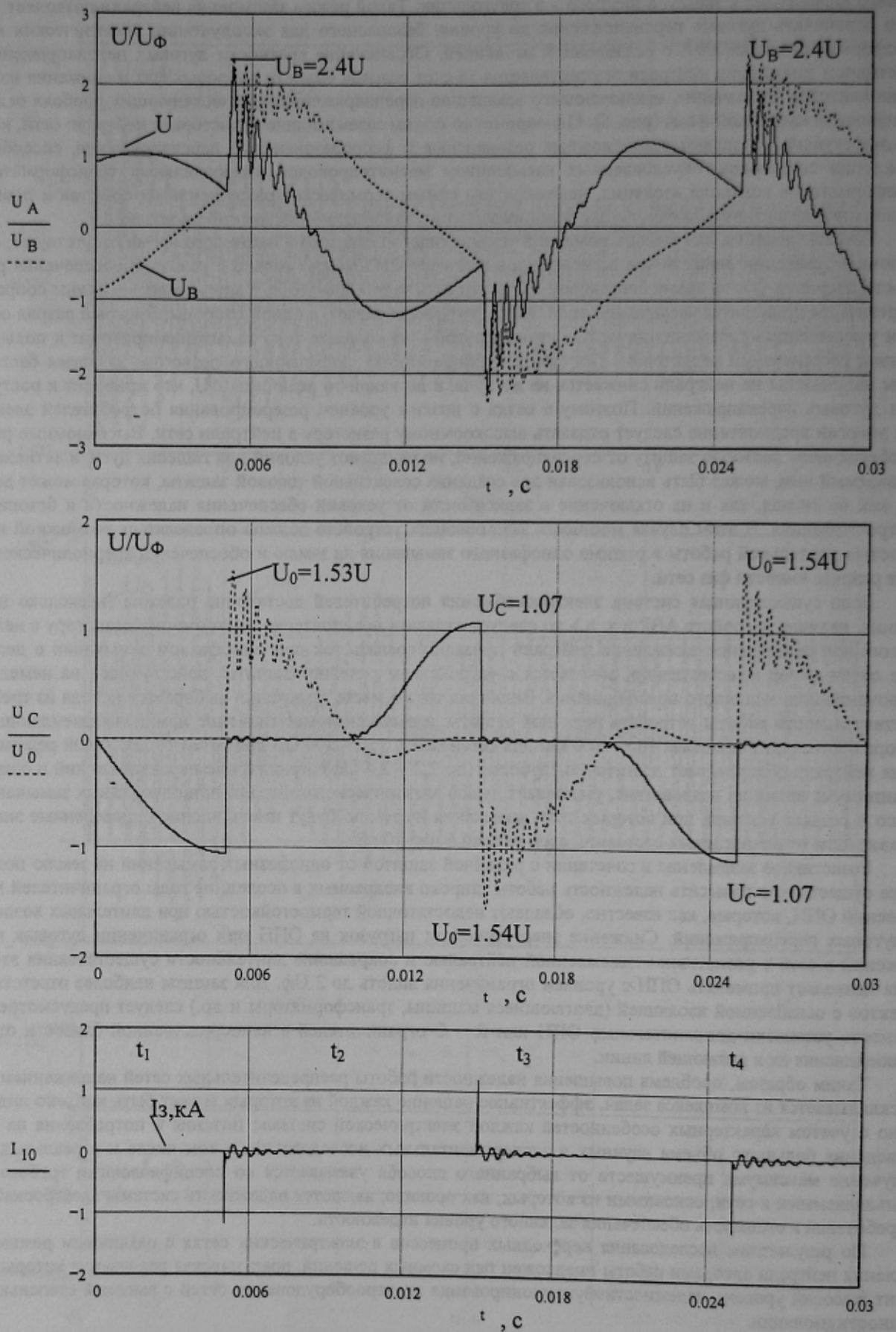


Рисунок 5-Процессы при дуговом замыкании фазы С на землю в сети с резистивно-заземленной нейтралью через 150 Ом

Предлагаемые решения учитывают особенности каждой сети, ее параметры, режимы работы электрооборудования и обеспечивают глубокое ограничение перенапряжений в пределах до $2U_{ф}$. Для каждой конкретной сети это достигается путем комбинированного использования средств релейной защиты, режима заземления нейтрали, применения ограничителей серии ОПН с разными порогами ограничения и системы быстрого и автоматического шунтирования поврежденной фазы. Последняя оборудована устройством автоматического выбора поврежденной фазы, обеспечивающим также относительно быстрое и селективное отыскание поврежденного присоединения в сети с любой конфигурацией. Лабораторные и сетевые испытания предлагаемых решений показали высокую эксплуатационную надежность и позволяют существенно улучшить условия работы электрооборудования с ослабленной изоляцией, сократить повреждаемость электрических машин, а также снизить общее количество однофазных замыканий в сети и в том числе замыканий, переходящих в междуфазные короткие замыкания и множественные пробой изоляции с групповым выходом из строя электрооборудования.

ВЫВОДЫ

1. Основной причиной высокой повреждаемости электрооборудования в сетях среднего класса напряжения являются дуговые перенапряжения, возникающие при перемежающемся характере горения дуги в месте пробоя фазной изоляции на землю.

2. Проблема повышения надежности работы распределительных сетей напряжением 6-10 кВ складывается из комплекса задач, эффективное решение которых может быть найдено для каждой конкретной сети индивидуально с учетом характерных ее особенностей на основе комбинированного использования средств релейной защиты, совершенствования режима заземления нейтрали, применения ограничителей серии ОПН с разными порогами ограничения и системы быстрого и автоматического шунтирования поврежденной фазы.

3. Практическая реализация разработанных на кафедре «Электрические станции» ДонНТУ устройств и схемных решений для каждой конкретной электрической системы питания и потребления позволяет обеспечить требуемый уровень надежности функционирования электрооборудования с высокой степенью изношенности изоляции.

ЛИТЕРАТУРА

1. Гиндулин Ф.А., Гольдштейн В.Г., Дульзон А.А., Халилов Ф.А. Перенапряжения в сетях 6-35 кВ. – М.: Энергоатомиздат, 1989.
2. IEEE Recommended Practise for Grounding of Industrial and Commercial Power Systems (IEEE std 142-1991). Published by the IEEE inc/ - NJ, 1992.
3. Wang G.H., Moffart W.M., Vegh L.J. High-resistance grounding and selective ground fault protection for a major industrial facility // IEEE Trans. On IA. – 1984. – Vol.IA – 20. - №4.
4. Петров О.А. Точность систем автоматической настройки компенсации емкостных токов однофазного замыкания на землю в электрических сетях. Электрические станции. №11, 1989.
5. Дмоховская Л.Ф., Ларионов В.П., Пинталь Ю.С. и др. Техника высоких напряжений. Учебник для студентов электротехнических и электроэнергетических специальностей вузов. Под общей ред. Д.В. Разеви́га. Изд. 2-е, перераб. и доп. – М., «Энергия», 1976.
6. Бики М.Е., Бродовой Е.Н., Брянцева А.М. и др. Электромагнитные процессы в мощных управляемых реакторах. Электричество. №6, 1994.