

М.П. Дергилёв, /к.т.н./, С.Н. Ткаченко /к.т.н./  
 ГОУ ВПО «Донецкий национальный технический университет» (Донецк)

## СОВЕРШЕНСТВОВАНИЕ УСЛОВИЙ РАБОТЫ ЭЛЕКТРООБОРУДОВАНИЯ В ЭЛЕКТРИЧЕСКИХ СЕТЯХ С ИЗОЛИРОВАННОЙ И РЕЗОНАНСНО-КОМПЕНСИРОВАННОЙ НЕЙТРАЛЬЮ В УСЛОВИЯХ СИЛЬНОЙ ИЗНОШЕННОСТИ ИЗОЛЯЦИИ

*В работе представлены результаты исследования перенапряжений при дуговых замыканиях фазы на землю в электрических сетях с изолированной и резонансно-компенсированной нейтралью. Показано, что по мере ухудшения технического состояния изоляции в сети появляются большие перекосы напряжения по фазам, что приводит к существенному увеличению кратности этих перенапряжений. Предложено схемное решение, практическая реализация которого позволит симметризовать сеть, снизить величину перенапряжений и продлить таким образом срок службы изношенного электрооборудования.*

**Ключевые слова:** электрическая сеть, смещение нейтрали, кратность перенапряжений, ограничение.

### Постановка проблемы

В настоящее время в условиях постоянно ухудшающегося технического состояния распределительных сетей среднего класса напряжения и отсутствия средств на замену или качественный ремонт изношенного электрооборудования все сильнее обостряется проблема надежности электроснабжения потребителей электрической энергии. Как отмечалось в [1-7], в сложившейся обстановке эффективное решение проблемы надежности работы распределительных сетей с изолированной и резонансно-компенсированной нейтралью, работающих, как известно, в весьма сложных эксплуатационных условиях, следует искать в комплексном подходе к решению этой сложной задачи. С одной стороны, следует по возможности осуществлять замену полностью исчерпавшего свой ресурс электрооборудования, а с другой – необходимо создать условия для продления срока службы электрооборудования с ослабленной изоляцией за счет снижения всех негативно воздействующих факторов, обусловленных потоком внутренних перенапряжений и, прежде всего, перенапряжений, связанных с однофазными замыканиями на землю.

### Анализ последних исследований и публикаций

Для оценки влияния указанных факторов на параметры схемы замещения изоляции в работе был проведен анализ результатов измерения

емкости  $C_x$ ,  $tg\delta$  и  $R$  различных по мощности двадцати четырех силовых трансформаторов напряжением 110 кВ и их высоковольтных вводов типа ГБМТ-110 с бумажно-масляной изоляцией. Измерение указанных параметров, как известно, производится при вводе трансформаторов в эксплуатацию после выполнения всевозможных ремонтов, а также периодически в эксплуатации в соответствии с существующими нормативными документами. Исследуемые трансформаторы находились в длительной эксплуатации (в пределах от 23 до 38 лет) семи подстанций 110 кВ ОАО «Донецкоблэнерго» и ОРУ – 110 кВ Углегорской ТЭС. Поскольку параметры анализируемых величин в значительной мере зависят от температуры исследуемых объектов, а в условиях эксплуатации измерения производились при варьировании в широких пределах температуры объектов, то при выполнении анализа параметры исследуемых величин в соответствии с существующими методиками приводились к температуре +20°C.

Одновременно с этим были произведены измерения геометрической емкости трех кабелей с бумажно-пропитанной изоляцией напряжением 6 кВ. Кабели длиной от 540 до 1160 м были проложены в земле с сечением алюминиевых жил 240 мм<sup>2</sup>, срок эксплуатации которых на предприятии «Донецкие электрические сети» составил от 25 до 43 лет. Поскольку при прокладке силовых кабелей измерение емкости  $C_x$  не нормируется, то для проведения сравнительного

анализа динамики изменения параметров исследуемых кабелей АСБ-3х240 за исходную была принята справочная величина этой емкости. Измерение  $C_x$  производилось мостовым методом с использованием моста переменного тока типа Р-595.

По результатам проведенного анализа можно заключить, что величина диэлектрических потерь в изоляции даже силовых трансформаторов за время длительной эксплуатации возрастает более чем на порядок, с 0,15-0,2 % до 2,7 %, а в отдельных случаях до 3,6 %. В динамике изменения во времени геометрической емкости силовых трансформаторов и кабелей прослеживается достаточно стабильное ее уменьшение, однако в условиях длительной эксплуатации появляется большая несимметрия емкости по фазам. Причем у кабелей эта несимметрия значительно больше, чем у трансформаторов. Так, если при примерно одинаковом сроке эксплуатации несимметрия емкости у трансформаторов составила в пределах 6-7 % и только в отдельных случаях достигла 12 %, то у кабелей она изменялась в пределах 14-17 %. За длительный период наблюдений при выполнении профилактических испытаний кабельных линий сетей коммунального назначения установлено, что предельное значение сопротивления сквозной проводимости через изоляцию, при которой наступает пробой или перекрытие, колеблется в весьма широких пределах – от десятков килоом до мегаом.

Таким образом, результаты проведенных исследований показали, что вследствие неидентичности процессов в изоляции каждой из фаз распределительной сети при ее длительной эксплуатации развивается несимметрия емкостной и активной проводимостей через изоляцию.

### Цель (задачи) исследования

В связи с изложенным в рассматриваемой работе была поставлена задача провести исследования по оценке влияния процессов старения изоляции как на нормальные эксплуатационные режимы работы электрооборудования, так и на качественные и количественные параметры переходных процессов при дуговых замыканиях фазы на землю в электрических сетях с изолированной нейтралью и компенсацией емкостных токов на землю.

По установившейся практике сети напряжением до 35 кВ включительно имеют изолированную нейтраль. Если в такой сети произойдет дуговое замыкание на землю, то через дугу будет протекать емкостный ток, величина которого определяется емкостью трех фаз сети. Устойчивая дуга однофазного замыкания на землю ведет

к термическому разрушению изоляции, перегоранию провода и обычно перебрасывается на междуфазные промежутки, т.е. ведет к междуфазным коротким замыканиям с автоматическим отключением участка сети. По этой причине дуговые замыкания на землю стремятся погасить в начале их возникновения. Для этой цели служит дугогасящая катушка (ДГК), включаемая в нейтраль трехфазной сети. Катушка настраивается в резонанс на суммарную емкость сети на землю ( $3 C_{\phi}$ ).

Действие катушки основано на двух факторах. Во-первых, катушка компенсирует ток замыкания на землю до остаточного значения  $I_{ост}$  малого по сравнению с током  $I_z$  без катушки. Во-вторых, катушка резко снижает скорость восстановления напряжения на дуге, благодаря чему сокращается число повторных зажиганий. Но, как показывает практика, в сложившихся условиях повреждаемость электрооборудования при установке ДГК практически не уменьшается.

### Основной материал исследования

Однофазные замыкания на землю, являясь самым распространенным видом повреждения (до 75-90 % от общего числа нарушений нормальной работы сети), в последние годы, по данным опыта эксплуатации электроустановок горнорудного, промышленного и коммунально-бытового назначения, почти каждое из них сопровождается групповым отключением присоединений и множественными пробоями изоляции на поврежденной фазе. Повреждаются в основном электродвигатели, кабели и в меньшей мере другое электрооборудование. Обследованиями установлено, что основной причиной повреждений являются дуговые перенапряжения, характеризующиеся, как известно, достаточно большой продолжительностью, высокой кратностью и шириной охвата всей электрически связанной сети.

За многолетний опыт эксплуатации этих сетей и большой объем выполненных исследований накоплен большой научный и экспериментальный материал по электрофизическим основам генерации этих перенапряжений. Показано, что качественные и количественные параметры их в значительной мере определяются емкостью фаз по отношению к земле и междуфазной емкостью, индуктивностью источника питания и трансформаторов, характера нагрузки, сопротивления в месте замыкания фазы на землю и т.д. Для возникновения предельной кратности перенапряжений в сети с заданными параметрами решающее значение имеют: величина мгновенного значения напряжения на поврежденной

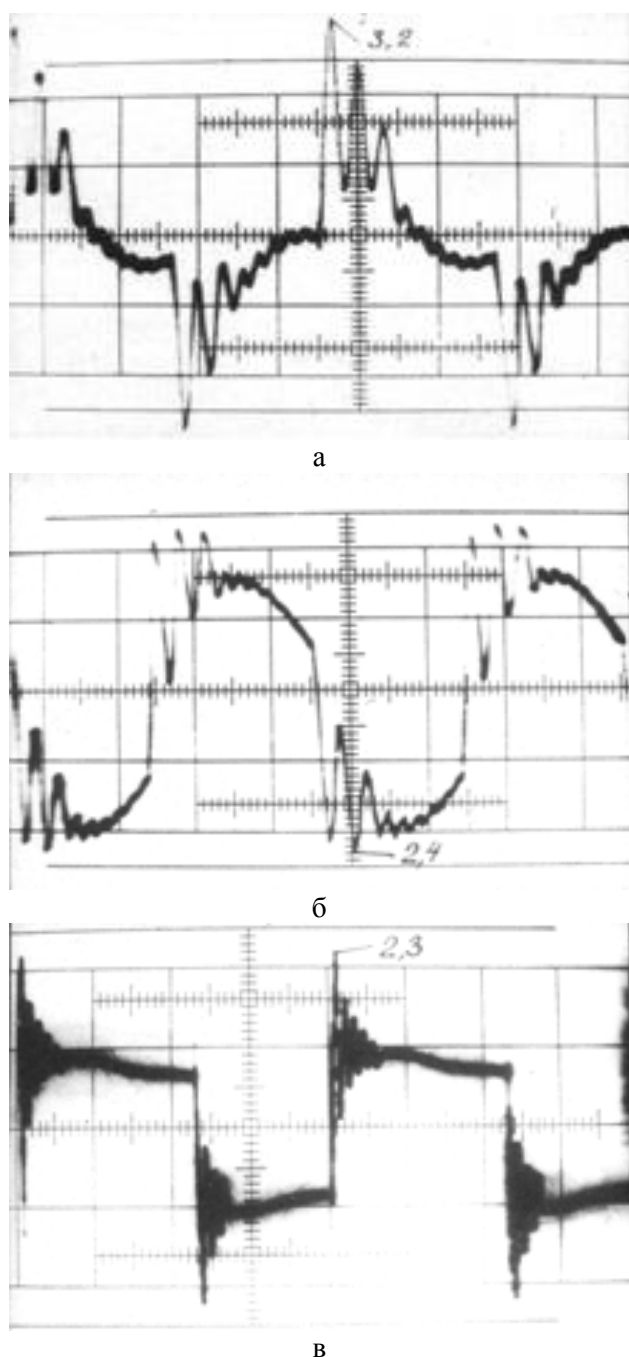


Рис. 1. Осциллограммы перенапряжений:  
 а, б – на двух неповрежденных фазах;  
 в – в нейтрали электрической сети  
 с изолированной нейтралью при дуговом  
 замыкании на землю

фазе в момент первичного зажигания дуги, момент погасания дуги и напряжения при повторном и последующих зажиганиях дуги, а также характер процесса восстановления электрической прочности дугового промежутка после гашения дуги.

Характерная осциллограмма этих перенапряжений, полученная на физической модели кабельной сети с двигательной нагрузкой, разработанной и сооруженной в лаборатории ТЭВН

кафедры электростанций ДонНТУ, представлена на рис. 1.

Важно подчеркнуть, что при проведении этих исследований с использованием физических и математических моделей за исходное всегда принималось, что сеть транспонирована, симметрична, смещения нейтрали, а значит, перекосов напряжения по фазам нет [1,3-10]. Однако следует заметить, что такой подход вступает в противоречия даже с нормативными документами по эксплуатации электроустановок. Так, согласно ПУЭ при эксплуатации сетей рассматриваемых классов напряжения допускаются смещения нейтрали: 15 % – длительно, 30 % – в течение одного часа и 100 % – в течение четырех часов.

Кроме этого, в процессе длительной эксплуатации на изоляцию электрооборудования постоянно оказывают влияние электрические, механические, тепловые и химические воздействия, приводящие к образованию в ней газовых включений. При появлении этих включений в непосредственной близости от потенциальных проводников, где напряженность электрического поля может превысить критическую, в них начинается ионизация и частичные разряды, которые с течением времени развиваются в стримерные искровые разряды с образованием напряженных проводящих древовидных побегов, прорастающих вглубь изоляции. Такие побеги, с одной стороны, увеличивают сквозную проводимость через изоляцию, т.е. снижают ее сопротивление, а с другой – шунтируют часть емкости объекта по отношению к земле и междуфазной емкости.

Исследования по оценке влияния несимметрии активной и реактивной проводимостей через изоляцию электрической сети на нормальный эксплуатационный режим работы электрооборудования производились с использованием математической и физической модели трехфазной кабельной сети с двигательной нагрузкой, в которой все элементы, с точки зрения их воздействия на характер переходных процессов в режиме однофазных замыканий фазы на землю, представлены в том виде, в каком они имеют место в реальной сети. Эта модель представляет собой по существу некоторое аналоговое специализированное вычислительное устройство, регистрация переходных процессов в котором позволяет получить в системе любую информацию в реальном масштабе времени. Принципиальная схема модели, представленная в [11], состоит из необходимого числа присоединений, соответствующих реальной системе электроснабжения и обобщенной нагрузки, ступенчатое подключение которой позволяет смоделировать практически

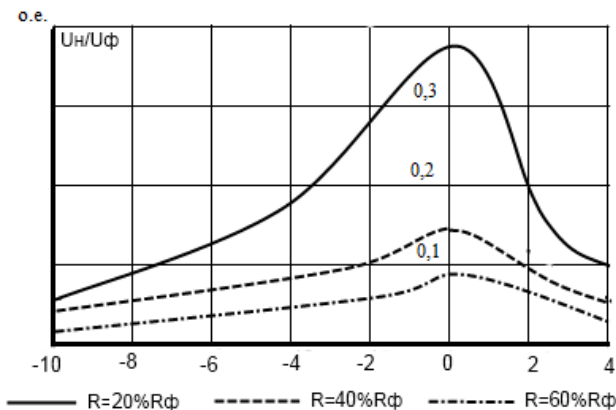
любую промышленную сеть по току замыкания на землю. Каждое присоединение моделирует линию с подключенным к ней электродвигателем мощностью от 3 до 15 кВт. Модель кабеля замещается П-образной цепочечной схемой, каждая ячейка которой построена на отображении соответствующей величины погонных метров индуктивности кабеля  $L_k$ , емкости по отношению к земле  $C_k$  и междуфазной емкостью  $C_{мф}$ , а также активного сопротивления жилы  $R_{из}$ . Длина кабеля сечением от 120 до 240 мм<sup>2</sup> моделируемого одной ячейкой, принята равной 100 м. Полная длина кабельной линии каждого присоединения принята равной 1000 м, а последовательные соединения таких кабельных линий одинакового сечения позволяют набрать длину присоединения до 2000 м, что соответствует предельным значениям длин кабельных линий сетей промышленного и коммунально-бытового назначения. Междуфазная емкость и регулируемое сопротивление утечками через изоляцию были подключены сосредоточенно в 3-4-х точках вдоль тысячеметровой длины кабельной линии. Регулированием величины сопротивления токам утечки через можно смоделировать сеть с любым состоянием изоляции ( $tg\delta$  сети изменяется в пределах изоляцию от долей процента до 10 %).

Питание модели осуществляется от трехфазного трехобмоточного разделительного трансформатора напряжением 0,4/0,4 кВ, мощностью до 100 кВА со схемой соединения обмоток Y/Y/Δ. Модель обеспечивает возможность проведения исследований по оптимизации режимов

заземления нейтрали и оценки влияния режима нейтрали на характер переходных процессов и величину перенапряжений при однофазном замыкании фазы на землю (ОЗНЗ). С этой целью модель снабжена плавно регулируемой дугогасящей катушкой плунжерного типа и набором линейных и нелинейных активных сопротивлений и RC-цепочек. Такая катушка обеспечивает линейность регулируемых характеристик и необходимые параметры по току компенсации для всех исследованных в работе сетей.

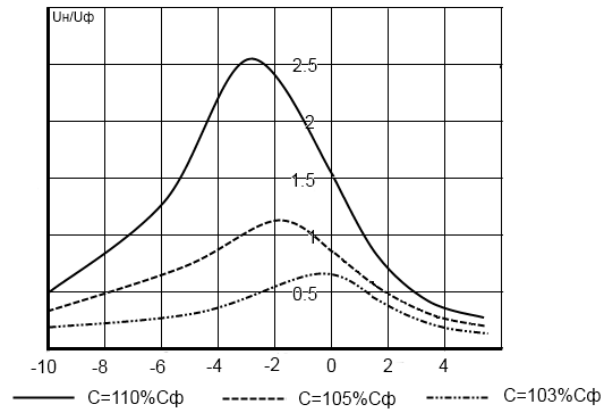
Результаты исследования влияния процессов старения изоляции на нормальный режим работы сети показали, что появление несимметрии емкостной и активной проводимостей через изоляцию приводит к смещению нейтрали и возникновению перекосов напряжения по фазам в нормальном эксплуатационном режиме работы сети. В сети с ДГК при наличии несимметрии настройка катушки в резонанс ведет к резкому увеличению напряжения смещения нейтрали. Показано, что несимметрия емкостей фаз относительно земли сильнее влияет на величину смещения нейтрали, чем несимметрия активных сопротивлений изоляции, что хорошо иллюстрируется для сети с емкостным током замыкания на землю 30 А, добротностью катушки в нейтрали  $R/X_L$  равной 0,01, и сопротивлением изоляции 1 МОм (рис. 2, 3).

Так, например, при исследовании зависимости резонансных характеристик контура нулевой последовательности и напряжений смещения нейтрали от степени настройки дугогасящей катушки для разных по параметрам и состоянию



а

Рис. 2. Зависимость напряжения смещения нейтрали от степени расстройки катушки в несимметричной сети с ДГК ( $I_{зам}=30$  А) при различной величине несимметрии, вызванной уменьшением сквозной активной проводимости через изоляцию в фазе А



б

Рис. 3. Зависимость напряжения смещения нейтрали от степени расстройки катушки в несимметричной сети с ДГК ( $I_{зам}=30$  А) при различной величине несимметрии, вызванной уменьшением сквозной емкостной проводимости через изоляцию в фазе А

изоляция распределительных сетей оказывается, что изменение несимметрии активной составляющей сквозной проводимости через изоляцию даже на порядок приводит к изменению величины напряжения смещения в пределах долей однофазного напряжения. В то же время появление несимметрии, обусловленной изменением емкостной составляющей проводимости через изоляцию фаз всего лишь на три-пять процентов, приводит к увеличению напряжения смещения нейтрали до  $U_{ф.ном.}$  и более в зависимости от степени настройки ДГК.

Важно обратить внимание также на тот факт, что по мере ухудшения состояния изоляции наряду с ростом тока в месте замыкания фазы на землю, обусловленного увеличением активных потерь в элементах сети, несимметрией и высшими гармониками, наблюдается процесс спрямления резонансной характеристики контура нулевой последовательности. При этом наиболее заметно этот процесс проявляется в сетях с более высокими параметрами по току замыкания.

Исходя из изложенного и в условиях широкого использования в практике эксплуатации дугогасящих катушек со ступенчатым регулированием индуктивности типа ЗРОМ и отсутствия в настоящее время качественных, серийно выпускаемых авторегуляторов для плавно-регулируемых ДГК типа РЗДПОМ; несовпадения интересов субъектов хозяйствования, когда в результате раздела в собственности одних оказались подстанции, где установлены ДГК, а у других – распределительные сети, где эти катушки необходимы, а также иных неизбежных и случайных факторов, влияющих на режимы настройки катушки, становится очевидным, что в сложившихся условиях качественная эксплуатация ДГК невозможна. При этом контроль степени настройки ДГК затруднен, а необходимая точность настройки маловероятна, что, с одной стороны, снижает эффективность от применения ДГК, а с другой – приводит к бесконтрольности уровня смещения нейтрали в таких сетях.

Последнее убедительно подтверждается опытом эксплуатации ряда энергетических предприятий Донбасского региона. Так, по данным измерений  $3U_0$  на 53-х подстанциях предприятия «Кировские электрические сети» было установлено, что только на несколько большей части из них смещение нейтрали не превышало 20 %, а на остальной части подстанций оно составило в пределах 100 %, причем на отдельных подстанциях оно достигало более 100 %, что создает весьма тяжелые условия для работы изоляции электрических сетей. Большие напряже-

ния смещения нейтрали в сетях имеют место также при обрывах и перегорании фаз отдельных присоединений, при наличии в сетях несимметричной нагрузки, в воздушных и воздушно-кабельных участках сети, в предпробойных состояниях изоляции фаз на землю и т.д. Поэтому большой практический интерес представляют результаты исследований по оценке влияния несимметрии напряжений на качественные и количественные параметры дуговых перенапряжений в сетях с изолированной нейтралью и компенсацией емкостных токов на землю.

Исследование переходных процессов при наличии несимметрии напряжений в указанных выше сетях при дуговых замыканиях на землю производилось на физической модели сети с использованием принципиально новой методики, позволяющей быстропротекающие процессы, какими являются дуговые перенапряжения, представлять в виде стоячих изображений на экране электронно-лучевых осциллографов. Это было достигнуто путем многократного наложения переходных процессов друг на друга с использованием специально разработанного устройства воспроизведения дуговых замыканий фазы на землю.

Воспроизведение всех возможных в реальных сетях замыканий фазы на землю осуществляется с помощью специально управляемого тиристорного ключа, выполненного на базе тиристора Т9-200, включенного в диагональ выпрямительного моста из вентилей ВК-200. Управление тиристором осуществляется с помощью блока формирования импульсов управления (ФИУ). Применение такого устройства позволяет быстропротекающие не периодически повторяющиеся процессы при дуговых замыканиях на землю представлять в виде стоячих изображений на экранах электронно-лучевых осциллографов, что существенно сокращает время на обработку исследуемой информации и дает возможность за весьма короткое время провести большой объем экспериментальных исследований по интересующему вопросу. Наиболее характерные осциллограммы могут быть зафиксированы на фотопленке с экрана осциллографа фотоаппаратом. Адекватность процессов в модели и реальной сети обеспечивается теорией подобия и моделирования электроэнергетических систем, изложенной в [12], и неоднократно подтверждалась экспериментальными исследованиями подобных процессов в реальных сетях.

Представленная ранее на рис. 1 характерная осциллограмма дуговых перенапряжений, полученная на физической модели электрической сети с током замыкания на землю 30 А, по каче-

ственным и количественным параметрам полностью соответствует современным представлениям о характере переходных процессов в симметричных электроустановках, работающих в режиме с изолированной нейтралью.

Проведенные исследования по оценке влияния несимметрии напряжений по фазам на качественные и количественные параметры дуговых перенапряжений в разных по параметрам и режиму заземления нейтрали сетях показывают, что независимо от характеристики сети кратность перенапряжений при дуговых замыканиях на землю растет примерно пропорционально несимметрии напряжения. Так, в сети с изолированной нейтралью (рис. 4) с ростом изношенности изоляции кратность дуговых перенапряжений независимо от параметров сети увеличивается примерно пропорционально несимметрии напряжения, и для реально возможной несимметрии в эксплуатации перенапряжения на 25-30 % могут превысить первоначальные значения. Это хорошо подтверждается результатами исследования перенапряжений в реальных сетях с результатами моделирования этих сетей в лабораторных условиях, когда, как уже отмечалось, исследуемая сеть принималась всегда симметричной.

С целью улучшения работы электрооборудования в сложившихся условиях специалисты рекомендуют перевести указанные сети из режима с изолированной нейтралью в режим заземления через активный резистор  $R \approx 130 \text{ Ом}$  (резистивное заземление). Для оценки эффективности такого перевода в работе были проведены исследования, результаты которых представлены также на рис. 4б. Из анализа этого рисунка следует, что при правильном подборе величины сопротивления заземляющего резистора с учетом параметров сети можно ограничить перенапряжения до безопасной для электрооборудования величины. Однако такой режим за-

земления нейтрали приведет к резкому увеличению тока замыкания на землю, что потребует немедленного отключения резистора от сети релейной защиты с целью сохранения его термической устойчивости.

В сети с резонансно-компенсированной нейтралью прослеживается та же закономерность роста перенапряжений, что и в сети с изолированной нейтралью при увеличении несимметрии фазных напряжений (рис. 5, 6). Здесь кратность дуговых перенапряжений тоже зависит от параметров сети, а также от степени настройки дугогасящей катушки. Скорость нарастания кратности дуговых перенапряжений здесь несколько больше, чем в сети с изолированной нейтралью. При реально возможной несимметрии в сети с ДГК уровень перенапряжений может оказаться даже больше, чем без установки катушки. Подключение активного резистора параллельно ДГК также позволит ограничить величину дуговых перенапряжений до безопасной для электрооборудования величины (рис. 5б, 6б).

В электрических сетях с двигательной нагрузкой, например, в сетях собственных нужд электростанций и других промышленных объектов в последнее время неоднократно имели место случаи групповых отказов в работе электрооборудования, которые сопровождалась разгрузкой энергоблоков или даже их полной остановкой. Наиболее часто при этом повреждались электродвигатели, имеющие, как известно, меньшие конструктивные запасы электрической прочности.

Послеаварийный анализ и обследования поврежденного электрооборудования показали, что во многих случаях причиной отказов является электрический пробой изоляции из-за перенапряжений, возникающих при дуговых замыканиях фазы на землю. В работе была поставлена задача выявления режимов, сопровождающихся опасными для изоляции перенапряжениями.

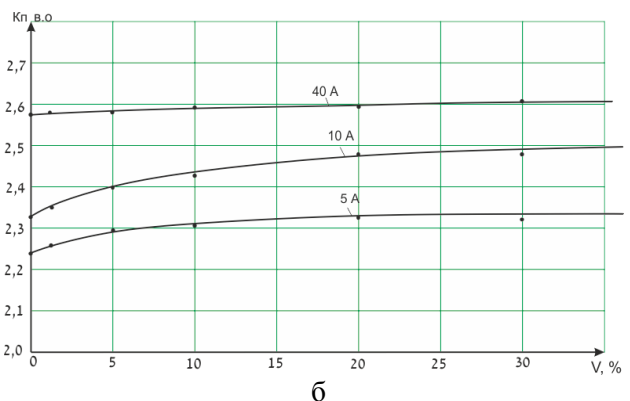
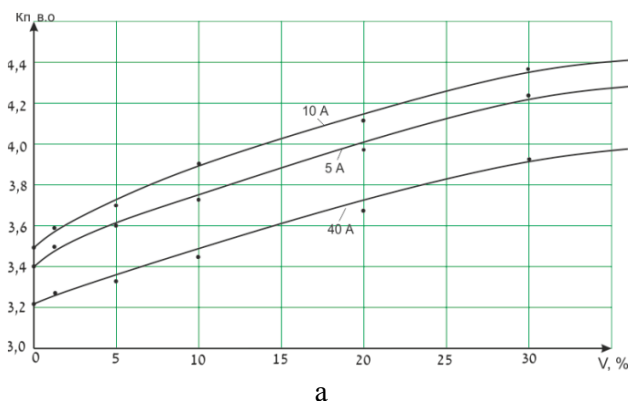


Рис. 4. Зависимость кратностей дуговых перенапряжений от степени смещения нейтрали в разных по параметрам сетях с а – изолированной; б – резистивно-заземленной нейтралью

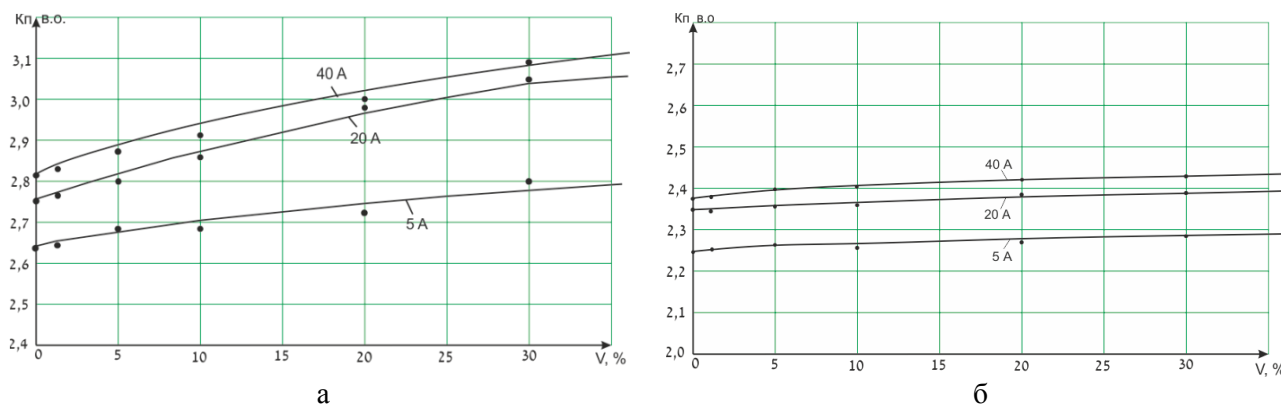


Рис. 5. Зависимость кратностей дуговых перенапряжений от степени смещения нейтрали в разных по параметрам сетях с ДГК, а – разветвления катушки 5 %; б – подключение параллельно ДГК резистора

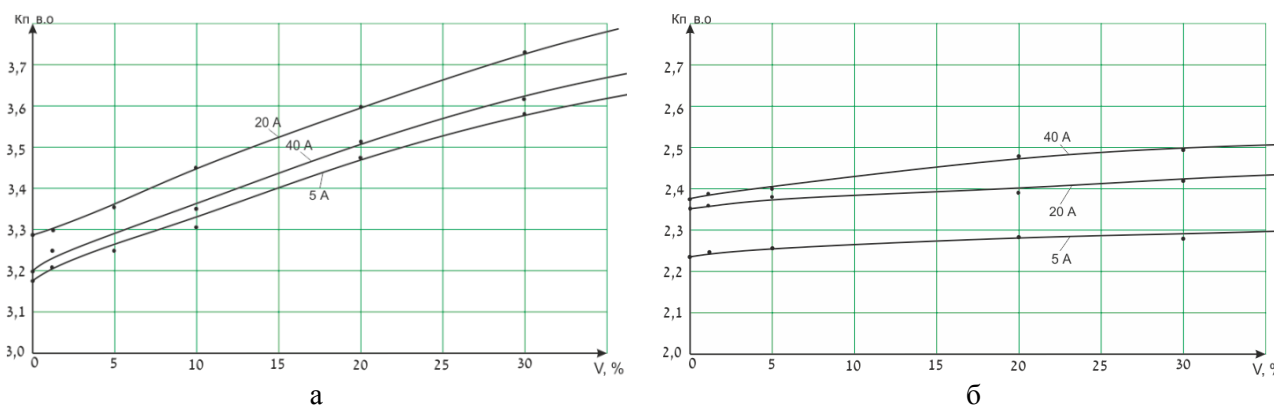


Рис. 6. Зависимость кратностей дуговых перенапряжений от степени смещения нейтрали в разных по параметрам сетях с ДГК, а – разветвления катушки 20 %; б – подключение параллельно ДГК резистора

Математический анализ, расчеты на ЭВМ и экспериментальные исследования на физической модели и в реальной сети показали, что одной из причин одновременного повреждения нескольких электродвигателей может быть выявленное авторами принципиально новое явление высокочастотного резонанса. Резонансные перенапряжения большой кратности возникают в петлях, образованных участком замкнувшейся на землю фазы питающего кабеля и подключенной к ней обмоткой электродвигателя (рис. 7). Кратности этих перенапряжений и вероятность их появления резко возрастают с увеличением протяженности питающей сети и мощности электроприемников, и для сетей, эквивалентных по емкости сетям собственных нужд энергоблоков мощностью 300-800 МВт, они могут значительно превысить нормы испытательного напряжения электрооборудования рассматриваемого класса. Наибольшие перенапряжения, достигающие шести- и более кратной величины, приходится на начало статорных обмоток электродвигателей. В зависимости от параметров питающей сети и места замыкания фазы на землю условия для появления резонансных перенапряжений

могут возникнуть одновременно в нескольких точках сети, что и является причиной одновременного (группового) повреждения нескольких электродвигателей. Частота, при которой наблюдается явление резонанса, зависит от параметров петли замкнувшейся на землю фазы кабель-электродвигатель и колеблется для рассмотренных параметров сетей в пределах от 10-12 кГц до сотен килогерц.

Большие перенапряжения возникают также в обмотке электродвигателя при замыкании ее на корпус. Исследования, выполненные на различных по мощности электродвигателях, показали, что при дуговом замыкании на расстоянии 5-10 % от начала обмотки в ней возникают быстрозатухающие перенапряжения с частотой порядка нескольких десятков килогерц. Кратность перенапряжений в значительной мере определяются параметрами питающей сети (суммарной емкостью по отношению к земле), и для сетей, эквивалентных по емкости сетям собственных нужд энергоблоков мощностью 300-800 МВт, получены напряжения пяти- и более кратного значения, т.е. значительно превышающие испытательное напряжение электродвигателей ( $1,73 U_n$ ).

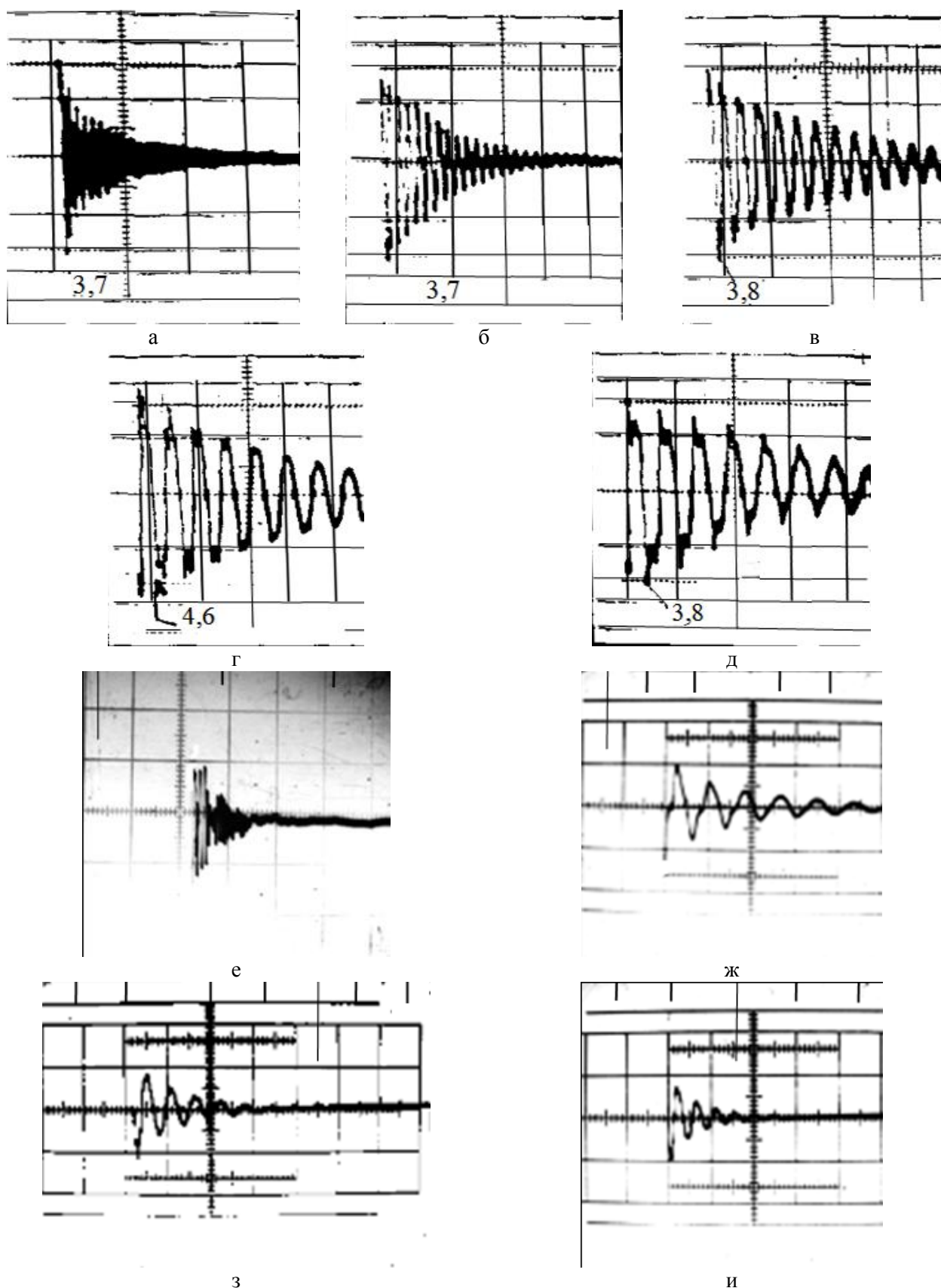


Рис. 7. Перенапряжения на зажимах электродвигателя 350 кВт поврежденной фазы сети с изолированной нейтралью на разном расстоянии от места замыкания:  
*а* – 100 м от электродвигателя; *б* – 200 м; *в* – 300 м; *г* – 400 м; *д* – 500 м;  
*е, ж, з, и* – эти же осциллограммы перенапряжений при подключении к нейтрали сети резистора.  
 При проведении опытов моделировалась сеть 6 кВ с током замыкания 7А;  
 масштаб:  $U_{\phi}=0,5$  клетки осциллографа



Это позволяет объяснить наблюдаемые в эксплуатации случаи, когда повреждение электродвигателя начинается с замыкания на корпус статорной обмотки с последующим пробоем межфазной изоляции в другой точке обмотки и переходом однофазного замыкания в двухфазное короткое замыкание, что увеличивает объем разрушений и приводит к повышению затрат, связанных с восстановлением поврежденных электродвигателей. Максимальное значение перенапряжений приходится на середину обмотки. При удалении точки замыкания от начала обмотки кратность перенапряжений резко снижается, и при замыкании на расстоянии 20-25 % от ее начала значение их не превышает испытательного напряжения.

Поскольку эти перенапряжения носят локальный характер, концентрируясь в основном в местах подключения больших индуктивных сопротивлений, а место их возникновения определяется параметрами сети и точкой замыкания фазы на землю, распространенные в настоящее время средства ограничения и регистрации перенапряжений в данном случае оказываются неэффективными.

На основе анализа результатов исследования установлено, что при подключении к нейтральной точке сети или нейтрали электродвигателя величиной даже до нескольких килоом величина перенапряжений снижается до безопасной для электрооборудования, в том числе электродвигателей, величины, что иллюстрируется осциллограммой рис. 7е-и.

### Выводы

1. Опыт эксплуатации последних лет указывает на существенное увеличение нарушений нормальной работы распределительных сетей среднего класса напряжения. Установлено, что основной причиной повреждения электрооборудования здесь является электрический пробой изоляции при воздействии перенапряжений в режиме дуговых замыканий фазы на землю.

2. Исследованиями установлено, что ухудшение технического состояния электрических сетей сопровождается увеличением несимметрии напряжений по фазам, что, в свою очередь, приводит к резкому увеличению кратности дуговых перенапряжений.

3. При моделировании распределительных сетей напряжением 6-10 кВ с двигательной нагрузкой обнаружено принципиально новое явление высокочастотного резонанса, которое позволяет объяснить нередко наблюдаемые в эксплуатации случаи множественных пробоев

изоляции на поврежденной фазе с групповым выходом из строя электрооборудования.

4. В работе предложено схемное решение, практическая реализация которого позволит симметризовать фазные напряжения распределительной сети; снизить кратность дуговых перенапряжений до безопасной для электрооборудования величины и таким образом продлить срок службы давно исчерпавшего свой ресурс электрооборудования.

### Список литературы

1. Сивокобыленко, В.Ф. Ограничение перенапряжений в системе собственных нужд электростанций / В.Ф. Сивокобыленко, М.П. Дергилёв, С.А. Иванов и др. // Энергетика и электрификация. – № 4. – 1996. – С. 20-22.
2. Дергилёв, М.П. Дуговые перенапряжения в электрических сетях в условиях постоянного ухудшения состояния изоляции / М.П. Дергилёв, А.А. Михайлов // Вестник кафедры «Электротехника» по итогам научной деятельности студентов. – Донецк: ДонНТУ, 2014. – С. 49-51.
3. Сарин, Л.И. Анализ результатов мониторинга процессов при однофазных замыканиях на землю в сети 6 кВ с дугогасящими реакторами и резисторами в нейтрали / Л.И. Сарин, М.В. Ильиных, А.И. Ширковец и др. // Энергоэксперт. – № 1. – 2008. – С. 56-64.
4. Бохан, А.Н. Особенности моделирования перенапряжений в сетях с ОПН / А.Н. Бохан, В.В. Кротенок, С.Н. Прохоренко // Материалы междунар. науч.-практ. конф. «Наука и производство», 19-20 марта 2009 г., г. Брянск. – Брянск: БГТУ, 2009. – С. 1-5.
5. Yongduan Xue. Research on adaptive tripping for single phase earth fault in neutral point no effectively grounded system / Yongduan Xue, Qiufeng Zhang, Zhenheng Wang et al. // Proceedings of China International Conference on Electricity Distribution (CICED 2012), 5-6 September, Shanghai, 2012. – P. 1-5.
6. Ma Shicong. An earth fault locating method in feeder automation system by examining correlation of transient zero mode currents / Ma Shicong, Xu Bingyin, Gao Houlei, et al. // Automation of Electric Power Systems. – 2008. – No.32 (7). – P. 48-52.
7. Чазов, Ю.О. Анализ величины перенапряжений при однофазном замыкании на землю в сети 35 кВ, работающей в режиме изолированной нейтрали / Ю.О. Чазов, И.А. Перминов, Н.П. Кочетков // Научный журнал КубГАУ. – № 87(03). – 2013. – С. 1-10.
8. Вильгейм, Р. Заземление нейтрали в высоко-

- вольтных системах / Р. Вильгейм, М. Уотерс. – М.-Л.: Госэнергоиздат, 1959. – 416 с.
9. Лихачев, Ф.А. Замыкание на землю в сетях с изолированной нейтралью и компенсацией ёмкостных токов. – М.: Энергия, 1971. – 152 с.
  10. Беляков, Н.Н. Исследования перенапряжений при дуговых замыканиях на землю в сетях 6-10 кВ с изолированной нейтралью / Н.Н. Беляков. – Электричество. – № 5. – 1957. – С. 31-36.
  11. Дергилёв, М.П. Физическая модель для исследования и оптимизации режима нейтрали трёхфазных электрических сетей с двигательной нагрузкой / М.П. Дергилёв, М. Саиди // Сборник научных трудов ДонГТУ, выпуск 2. – Донецк: ДонГТУ, 1998. – С. 206-210.
  12. Веников, В.А. Теория подобия и моделирования. – М.: Высшая школа, 1976. – 480 с.

**M.P. Dergilev /Cand. Sci. (Eng.)/, S.N. Tkachenko /Cand. Sci. (Eng.)/**  
*Donetsk National Technical University (Donetsk)*

**IMPROVEMENT OF WORKING CONDITIONS OF ELECTRICAL EQUIPMENT  
 IN NETWORKS WITH INSULATED AND RESONANT-COMPENSATED NEUTRAL  
 IN THE CONTEXT OF SEVERE INSULATION DETERIORATION**

**Background.** *In the recent conditions of severe deterioration of insulation of electric networks of medium voltage, there has been an increase in damage to electrical equipment. Mostly being damaged are electric motors and cables. Based on the analysis of the operating experience found that the main reason for such damage is the flux of the internal overvoltage and, above all, overvoltage associated with single-phase earthing (arc overvoltage). Shown that the deterioration of the technical condition of networks is accompanied by an increase in the asymmetry of active end-to-end conductivity and capacitive conductivity through insulation phases.*

**Materials and methods.** *The objective of the paper is to assess the impact of insulation wear both on the normal operating modes of electric equipment and on qualitative and quantitative parameters of transient processes at arc phase earthing in these networks. Studies conducted using mathematical and physical models of the cable network according to a fundamentally new method of recording fast transient processes. Of great interest are also the transient processes in the discharge circuits formed by the earthed phase of the supply cable and the electric motor winding.*

**Results.** *The results of the studies show that in the networks with insulated neutral, in case of phase asymmetry, arc overvoltages increase approximately in proportion to this asymmetry. Depending on the parameters of the network and the state of its insulation at a possible in operation asymmetry of phase voltages the multiplicity of overvoltage in the networks with insulated neutral can be 20-30 % more as compared to a symmetrical network with the same parameters. In the networks with compensation of capacitive currents to the ground, these overvoltages reach the same value as in networks without arc suppression coils (ASC). In the above-mentioned discharge circuit, found a fundamentally new phenomenon of high-frequency resonance with a large multiplicity of overvoltages significantly exceeding the norms of test voltage of electrical equipment.*

**Conclusion.** *Established that with the deterioration of insulation of electric networks 6-35 kV multiplicity of the most dangerous arc overvoltages increases, which is the cause of high damage to electrical equipment. The phenomenon of high-frequency resonance detected allows explaining the cases of repeatedly observed in operation multiple insulation breakdowns on the damaged phase with the group electrical equipment failure.*

**Keywords:** *electric network, neutral displacement, overvoltage multiplicity, limitation.*

**Сведения об авторах**

**М.П. Дергилёв**

SPIN-код: 5097-8133

Телефон: +380 (62) 335-34-55

Эл. почта: mozdik@mail.ru

**С.Н. Ткаченко**

SPIN-код: 5046-6030

Телефон: +380 (62) 301-03-72

Эл. почта: tsn1981@mail.ru

*Статья поступила 15.03.2018 г.*

*© М.П. Дергилёв, С.Н. Ткаченко, 2018  
 Рецензент д.т.н., проф. Э.Г. Куренный*