



**Автор:**

**Ширковец А.И.**

ООО «Болид»,

Новосибирск.

**Shirkovets A.I.**

LLC Bolid, Novosibirsk,

Russia

**Abstract:**

high rate of development of cable networks caused by implementation of new production capacities and new consumers leads to the rise of feeder lengths. As a result, single phase-to-ground currents increase. The paper deals with special characteristics of arcing ground fault development in mass-impregnated paper-insulated cables obtained by analytical study, recorded oscillograms and experimental investigations in operational networks. It is stated that during transient process simulation at single phase-to-ground faults in a cable, conditions of arc extinguishing at high-frequency component current zero should be taken into account. Based

# ХАРАКТЕРИСТИКИ ПЕРЕНАПРЯЖЕНИЙ И ОСОБЕННОСТИ ГОРЕНИЯ ДУГИ ПРИ ЗАМЫКАНИЯХ НА ЗЕМЛЮ В КАБЕЛЬНЫХ СЕТЯХ С ЛИНИЯМИ БОЛЬШОЙ ПРОТЯЖЕННОСТИ

## OVERVOLTAGE CHARACTERISTICS AND FEATURES OF ARCING AT SINGLE PHASE-TO-GROUND FAULTS IN CABLE NETWORKS WITH LONG-DISTANCE TRANSMISSION LINES

Аннотация: высокие темпы развития кабельных сетей, обусловленные введением новых производственных мощностей и подключением новых потребителей, приводят к росту протяженности единичных линий (фидеров) и повышению токов однофазного замыкания на землю. В статье рассматриваются характерные особенности развития дугового замыкания на землю в бумажно-пропитанной изоляции силовых кабелей, полученные на основе аналитических исследований, результатов регистрации перенапряжений и натуральных экспериментов в действующих электрических сетях. Констатируется, что при моделировании переходного процесса, сопровождающего однофазное дуговое замыкание в кабеле, следует задаваться условием погасания дуги в переходе высокочастотной составляющей тока через ноль. На основе расчета амплитудных параметров перенапряжений при дуговых замыканиях в разных точках кабельной линии (КЛ) 10 кВ протяженностью до 5 км показано, что распределение перенапряжений вдоль КЛ определяется в основном соотношением активного тока от резистора в нейтрали и емкостного тока сети.

**Ключевые слова:** горение дуги, перенапряжения, дуговые замыкания на землю, кабельные сети, кабели с бумажно-пропитанной изоляцией (БПИ), переходные процессы, резистивное заземление нейтрали, натурные осциллограммы

on calculations of amplitude overvoltage characteristics at arcing ground faults in various points of a 10 kV cable line with a length of 5 km, it was shown that overvoltage distribution along a cable line is determined by the ratio of active current of the resistor to capacitive current of the network.

**Keywords:**

arcing, overvoltages, single phase-to-ground arcing faults, cable networks, cables with mass-impregnated paper insulation, transient processes, resistance neutral grounding, experimental oscillograms

**Введение**

Как показывает опыт эксплуатации, одной из основных причин выхода из строя БПИ-кабелей напряжением 6-10 кВ является воздействие внутренних перенапряжений, которые оказывают негативное влияние на ослабленную изоляцию и в совокупности с объективными факторами (увлажнение масла, термохимическая деструкция целлюлозы, механическое разрушение слоев бумаги) могут привести к каскадному повреждению КЛ. Эта ситуация характерна для кабельных сетей промышленных предприятий и сетевых подстанций в крупных городах, где протяженность кабельных сетей может достигать нескольких сот километров, а токи замыкания на землю (из условия приближенной оценки 1,2-1,3 А/км) составляют иногда 100-150 А и более. Анализ многочисленных схем распреде-

лительных сетей подтверждает, что длина единичных КЛ на действующих объектах составляет от десятков метров до 3-5 км. КЛ на напряжение 6-10кВ длиной более 5 км встречаются крайне редко. Длина сети фидера от центра питания через транзитные распределительные пункты (РП) при этом может достигать в среднем 15-16 км.

Для распределительных кабельных сетей с линиями большой протяженности важным вопросом является оценка параметров переходных процессов при дуговых замыканиях на землю в разных точках сети, в том числе с учетом места замыкания (в кабельной изоляции), а также распределения перенапряжений по длине линии. Это необходимо для выбора оптимального режима заземления нейтрали и наилучшей защиты сети от перенапря-



жений, сопровождающих ОЗЗ. В рамках решения этой задачи следует также определить особенности процесса развития дугового замыкания на землю в изоляции силовых кабелей. Следует подчеркнуть, что несмотря на безальтернативное использование кабелей с изоляцией из сшитого полиэтилена при новом строительстве, реконструкции и модернизации энергообъектов различного назначения, в действующих электрических сетях (как городских, так и на промышленных предприятиях) кабели напряжением 6-10 кВ с БПИ все еще составляют подавляющее большинство (до 100%).

**Характерные особенности развития процесса дугового замыкания в бумажно-пропитанной изоляции кабелей**

Рассматривая процесс горения дуги в закрытом объеме кабельной изоляции, необходимо определить характерные особенности и условия пробоя кабельной изоляции. Возникновение перемежающейся дуги в кабелях с БПИ наиболее вероятно на первом этапе развития ОЗЗ, когда еще не произошло науглероживания дугового канала и возможно кратковременное восстановление электрической прочности.

Основными случайными факторами, определяющими амплитудные характеристики перенапряжений при дуговых ОЗЗ, являются: напряжение на поврежденной фазе в момент пробоя (зажигания дуги), момент погасания дуги, который может быть охарактеризован номером прохождения через нулевое значение высокочастотной составляющей тока ОЗЗ, и напряжение повторного зажигания дуги. Согласно классической постановке задачи предполагается, что максимальные перенапряжения формируются после второго погасания дуги.

Момент первого пробоя сопоставляется с мгновенным значением напряжения на поврежденной фазе, которое зависит также от переходного сопротивления в месте замыкания. В общем случае распределение напряжения пробоя изоляции подчиняется усеченному нормальному закону в интервале  $[-\Delta U \dots U_{\text{ФМАХ}} \dots \Delta U]$ , где  $\Delta U = (0,4-0,6) U_{\text{ФМАХ}}$  [1].

Момент погасания дуги при пробое в том числе и кабельной изоляции зависит от двух факторов:

- исхода «соревнования» восстанавливающейся в месте пробоя электрической прочности  $U_{\text{ВЭП}}$  и амплитуды возрастающего напряжения  $U_{\text{ВОССТ}}$  на поврежденной фазе, возникающего после погасания дуги;
- соотношения скорости  $V_1$  подхода тока дуги к нулевому значению и значения предельной скорости  $V_{\text{ПРЕД}}$ , при которой происходит гарантированное погасание дуги.

При совместном и одновременном выполнении условий  $U_{\text{ВЭП}} > U_{\text{ВОССТ}}$  и  $V_1 < V_{\text{ПРЕД}}$  происходит успешное погасание дуги ОЗЗ, в противном случае происходит повторный пробой (при  $U_{\text{ВЭП}} > U_{\text{ВОССТ}}$ ), либо переход в режим устойчивого горения дуги (при  $V_1 > V_{\text{ПРЕД}}$ ) – до момента следующего перехода тока через нулевое значение, когда процесс «соревнования» повторится с попыткой повторного погасания дуги.

В зависимости от значений  $U_{\text{ВОССТ}}$  и  $V_1$  происходит погасание при первом или последующем переходах высокочастотной составляющей тока через нулевое значение, что справедливо именно для кабельной изоляции. Следует отметить, что первый пробой изоляции происходит при напряжении  $U_{\text{ПР}}$ , близком к фазному. Напряжение последующих пробоев зависит от места повреждения и с развитием дугового замыкания постепенно стабилизируется.

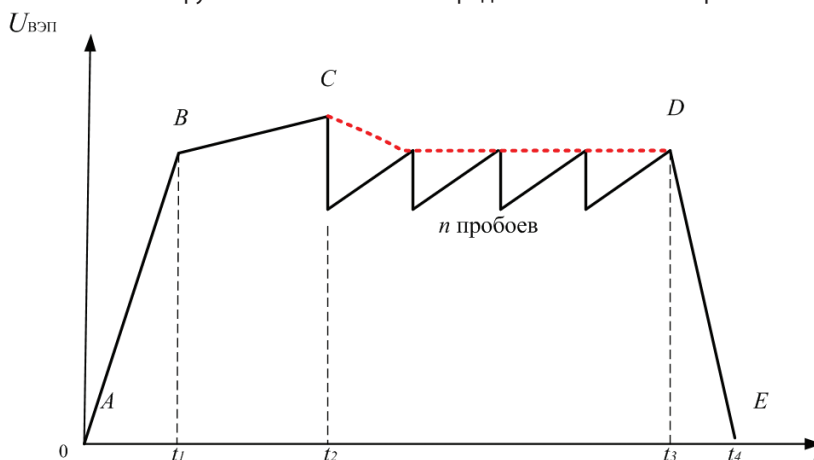


Рис. 1. Характер изменения восстанавливающейся электрической прочности в процессе развития дугового замыкания в изоляции силового кабеля

Для изоляции силовых кабелей с БПИ характерно кратковременное увеличение  $U_{\text{ВЭП}}$  в начальной стадии процесса, в основном за счет выдувания дуги из узкого канала пробоя, с последующим понижением  $U_{\text{ПР}}$  при выгорании изоляции в месте повреждения. Момент погасания дуги определяется в результате сопоставления  $U_{\text{ВЭП}}$  и  $U_{\text{ВОССТ}}$ , при этом параметры  $U_{\text{ВЭП}}$  задаются с помощью математического ожидания  $M[U_{\text{ВЭП}}]$  и среднеквадратического отклонения  $\sigma[U]$  для нормального закона распределения. Кривая восстановления электрической прочности  $U_{\text{ВЭП}}$  в первом приближении может быть аппроксимирована несколькими прямолинейными участками (рис. 1):

- первый участок (А–В) отображает относительно быстрое первоначальное возрастание электрической прочности после погасания дуги за счет приэлектродных участков;  $t_1 \leq 0,1$  с;
- второй участок (В–С) соответствует медленному процессу возрастания электрической прочности за счет уменьшения концентрации ионов и охлаждения плазмы дуги газообразными продуктами разложения изоляции; наблюдается постепенная стабилизация  $U_{\text{ВЭП}}$ , пробой происходит при напряжении  $U_{\text{ПР}} \leq U_{\text{ФМАХ}}$  (точка «С»);  $t_2 \approx 0,1 - 0,2$  с;
- третий участок (С–D) (пунктирная линия) представляет собой почти на всем протяжении прямую, параллельную оси абсцисс, поскольку в течение времени  $t_2-t_3$  среднее значение электрической проч-



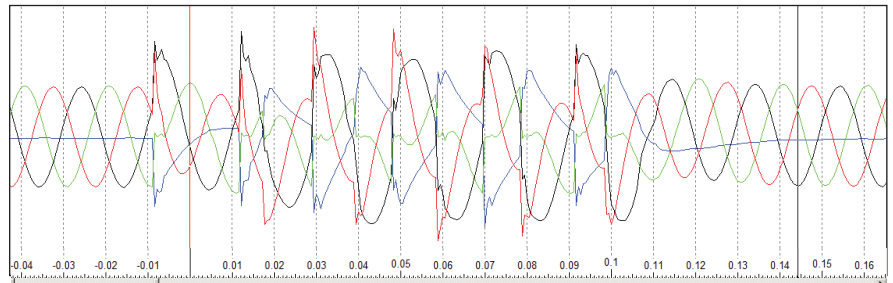
ности изменяется, как правило, незначительно. Количество повторных пробоев ограничено свойствами изоляционного промежутка. Диапазон  $t_2 - t_3$  может быть весьма широким: от 0,3 – 1,5 с до десятков минут для кабелей с БПИ и не более нескольких минут для кабелей с СПЭ-изоляциями. В ходе последовательных пробоев  $U_{ВЭП}$  меняется ступенчато;

– четвертый участок (D-E) характеризует переход в режим непрерывного горения дуги с образованием металлического мостика «фаза-земля» с вероятным переходом ОЗЗ в междуфазное КЗ и отключением фидера. При этом наклон участка «D-E» по отношению к оси абсцисс может достигать 90°, поскольку скорость снижения прочности промежутка на заключительном этапе зависит от типа изоляции и степени ее повреждения.

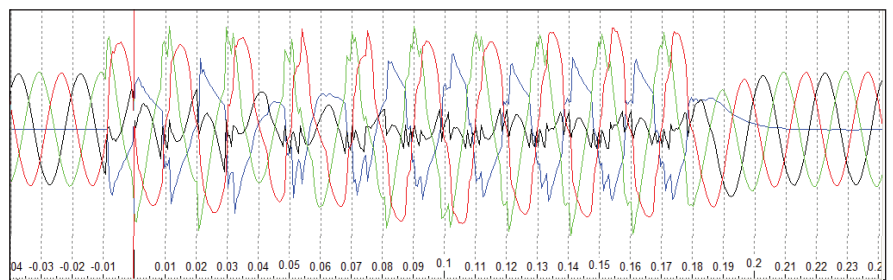
Проиллюстрируем представленные положения натурными осциллограммами, зафиксированными в кабельной сети 6 кВ ОАО «Гродно Азот» с помощью регистраторов аварийных событий «Парма» (частота дискретизации 1 кГц). В качестве первичных датчиков напряжения использовались ТН типа ЗНОМ-6, установленные на секция главных понизительных подстанций (ГПП). На рис. 2 напряжение фазы «А» – черный, фазы «В» – зеленый, фазы «С» – красный, напряжение с «разомкнутого треугольника» ТН (нейтраль) – синий. Нейтраль каждой секции 6 кВ заземлена через резистор. Повторные пробой следуют каждые 10-20 мс, что соответствует условиям горения перемежающейся дуги.

Анализ зарегистрированных в сети 6 кВ трех ГПП технологических нарушений с 2008 г. по 2011 г. показывает, что абсолютное большинство аварийных отключений в сети 6 кВ ОАО «Гродно Азот» связано с переходом однофазных замыканий на землю в двухфазные и трехфазные КЗ. При этом к коротким замыканиям приводят как зарегистрированные при дугowych замыканиях «клевки», вызывающие от 55% до 85% аварийных событий, так и длительные (условно – более 1 с) и устойчивые дуговые ОЗЗ.

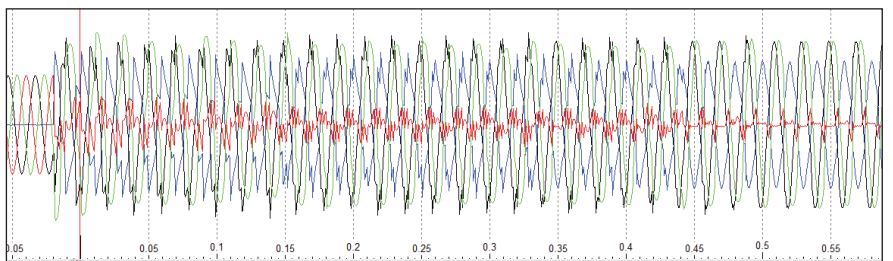
**Результаты расчета амплитудных и частотных параметров пере-**



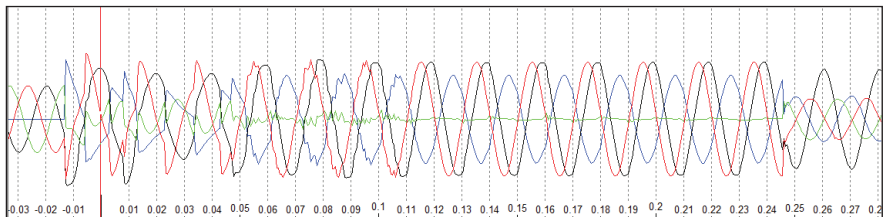
**а) технологическое нарушение 24.07.2008: восстановление электрической прочности с самоустранением дугowego замыкания после десяти пробоев – участок «А-В» рис. 1**



**б) технологическое нарушение 27.05.2009: изменение характера горения дуги со снижением длительности бестоковых пауз и стабилизацией УПР – участок «А-С» рис. 1**



**в) технологическое нарушение 14.12.2010: изменение характера горения дуги при науглероживании канала пробоя – участок «А-Д» рис. 1**



**г) технологическое нарушение 16.10.2008: быстрое развитие дугowego ОЗЗ с переходом в междуфазное КЗ с отключением поврежденного фидера – участок «А-Е» рис. 1**

**Рис. 2. Натурные осциллограммы переходных процессов, отражающие изменение условий горения дуги при развитии дугowych замыканий в действующей кабельной сети 6 кВ**

**ходного процесса при однофазном замыкании в кабеле**

Поскольку протяженности КЛ, как на сетевых подстанциях, так и в схе-

мах электроснабжения промышленных предприятий с развитием производства и подключением новых потребителей по стороне 6-10 кВ неуклонно воз-

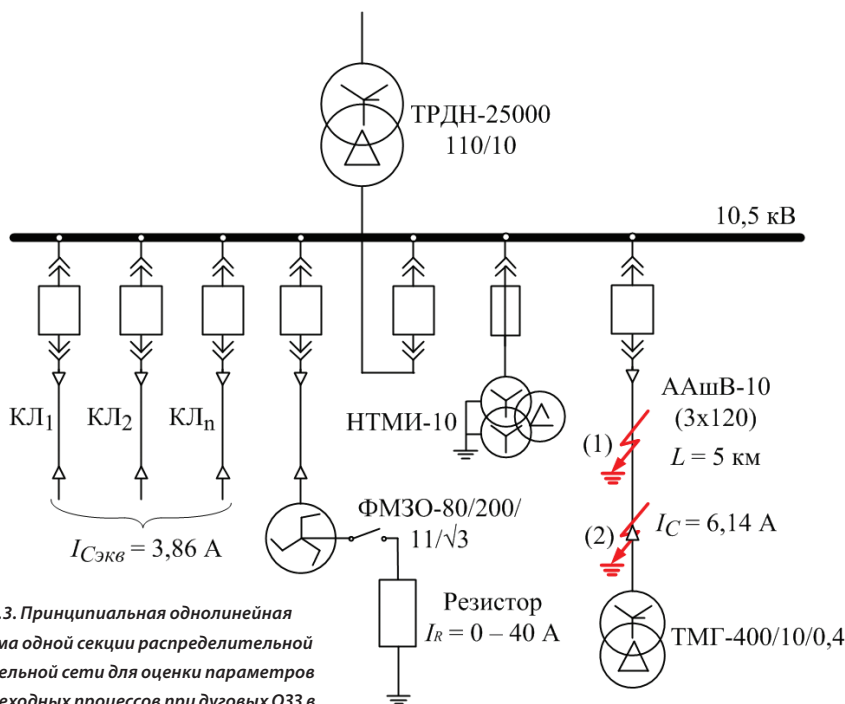


Рис.3. Принципиальная однолинейная схема одной секции распределительной кабельной сети для оценки параметров переходных процессов при дугowych ОЗЗ в разных точках КЛ

растают, актуальной в настоящее время является задача расчета распределения перенапряжений по длине линии при различных схемах заземления нейтрали сети, в частности при внедрении резистивного заземления нейтрали. Можно ожидать, что за счет волновых процессов, в зависимости от первичных параметров линии, уровни перенапряжений в конце КЛ будут выше, чем в начале. Покажем, как это происходит. Расчет произведем на основе принципиальной схемы кабельной сети напряжением 10 кВ, приведенной на рис. 3.

Следует отметить, что одним из адекватных вариантов минимизации негативных последствий от однофазных замыканий является их отключение, легко реализуемое при оснащении нейтрали сети резистором соответствующего номинала, обычно с активным током не более 300-400 А. Поэтому ниже рассматриваются переходные процессы в кабельной сети при различных соотношениях активного тока от резистора и полного емкостного тока. Несмотря на необходимость во многих случаях компенсацию емкостного тока в

кабельных сетях, организация действия релейной защиты на отключение фидера с ОЗЗ с минимальной выдержкой времени позволяет отказаться от применения дугогасящих реакторов. Примером использования такой концепции является реализуемый в настоящее время пилотный проект низкоомного резистивного заземления нейтрали в нескольких крупных центрах питания г. Санкт-Петербурга.

В эквивалентной схеме рассматриваемой электрической сети (рис. 4) КЛ моделировалась в виде десяти П-схем (эквивалентирование участками по 500 м) с погонными параметрами  $R_0=0,258$  Ом/км;  $X_0=0,081$  Ом/км. Полный емкостной ток ОЗЗ в схеме равен 10 А, в том числе 6,14 А – ток от емкости рассматриваемой КЛ при принятых длине и сечении кабеля; 3,86 А – ток от эквивалентной ёмкости ( $n$  силовых кабелей суммарной длиной 3,1 км при том же сечении  $3 \times 120$  мм<sup>2</sup>) на стороне НН трансформатора ТРДН-25000/110. Для учета влияния нелинейного ТН на характеристики переходного процесса была разработана и учтена в схеме модель

трансформатора типа НТМИ-10 с заземленной первичной обмоткой (фаза «В»). В ходе вычислительного эксперимента моделировалось два последовательных цикла зажигания и погасания дуги в двух точках кабельной линии: в середине КЛ – на отметке 2,5 км от питающих шин (1); в концевой муфте КЛ со стороны нагрузки – на отметке 5,0 км от питающих шин (2). Перенапряжения фиксировались по всей длине линии, «реперными» точками для этого служили узлы П-схем модели.

Активная проводимость (эквивалент тока утечки) была принята равной 5% от емкостной проводимости на землю. Измерения перенапряжений проводились на каждом участке КЛ при соотношениях активного и емкостного токов соотношениях  $I_R/I_C = 0 \dots 4$ . Трехфазная нагрузка подключена через трансформатор ТМГ-400 и представлена сопротивлением с параметрами  $R_H=13$  Ом,  $X_H=10,05$  Ом на каждой фазе.

Сопротивление дуги, исходя из условия возникновения дугового пробоя при малом динамическом сопротивлении дугового столба в изоляции кабеля, для упрощения модели и получения устойчивого результата было принято  $R_D = 5 \cdot 10^{-4}$  Ом. Адекватность этого решения подтверждается многочисленными расчетами, показывающими удовлетворительную сходимость с результатами натурных экспериментов.

Следует отметить, что продольные параметры кабельных линий оказывают существенное влияние на мгновенные значения токов и напряжений при дугowych замыканиях на землю и практически не влияют на действующие значения и гармонические составляющие в области частот примерно до 5 кГц.

В сетях, выполненных воздушными линиями и в сетях с токоограничивающими реакторами на отходящих от шин подстанции кабельных линиях продольные индуктивности могут быть соизмеримыми с индуктивностями питающих трансформаторов. Аналогичная ситуация, в зависимости от параметров конкретных КЛ, имеет место в сетях с относительно протяженными (длиной 3-5 км или

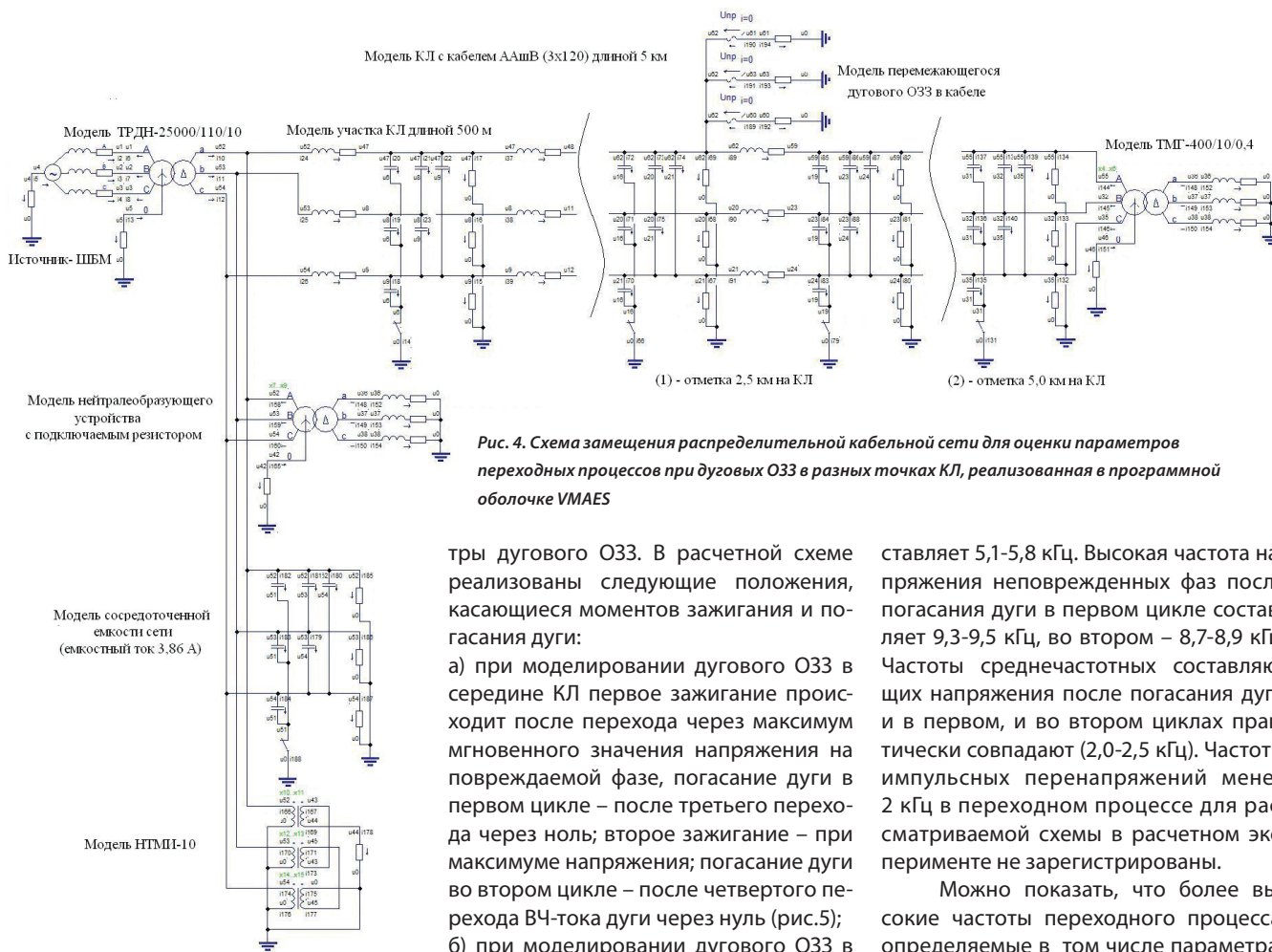


Рис. 4. Схема замещения распределительной кабельной сети для оценки параметров переходных процессов при дуговых ОЗЗ в разных точках КЛ, реализованная в программной оболочке VMAES

более) кабельными линиями. С учетом этого обстоятельства принимается схема замещения, реализованная в формате визуально-ориентированной модели в программной оболочке VMAES и представленная на рис. 4.

Ставятся и решаются задачи распределения перенапряжений по длине протяженной КЛ, в том числе в зависимости от отношения  $I_R/I_C$ .

Условия зажигания и погасания дуги принимались на основе результатов многочисленных экспериментальных исследований и данных регистрации несимметричных режимов работы сетей 6-10 кВ. Указанные сведения подтвердили основные закладываемые в математическую модель сети параме-

тры дугового ОЗЗ. В расчетной схеме реализованы следующие положения, касающиеся моментов зажигания и погасания дуги:

- а) при моделировании дугового ОЗЗ в середине КЛ первое зажигание происходит после перехода через максимум мгновенного значения напряжения на повреждаемой фазе, погасание дуги в первом цикле – после третьего перехода через ноль; второе зажигание – при максимуме напряжения; погасание дуги во втором цикле – после четвертого перехода ВЧ-тока дуги через ноль (рис.5);
- б) при моделировании дугового ОЗЗ в концевой муфте КЛ зажигание дуги происходит после перехода через максимум мгновенного значения напряжения на повреждаемой фазе; погасание дуги происходит при первом переходе высокочастотного тока через ноль (рис. 6).

Моделируется дуговое ОЗЗ на фазе «А» в кабеле. На рис. 5-6 представлены компьютерные осциллограммы напряжений на фазах (фаза «А» – черный, фаза «В» – синий, фаза «С» – красный) и нейтрали (зеленый), а также тока дуги в месте повреждения (голубой – в первом цикле пробоя, желтый – во втором).

Оценка параметров переходных процессов показала, что частота тока дуги (перед обрывом в нуле) может несколько отличаться от цикла к циклу и для рассматриваемой схемы сети со-

ставляет 5,1-5,8 кГц. Высокая частота напряжения неповрежденных фаз после погасания дуги в первом цикле составляет 9,3-9,5 кГц, во втором – 8,7-8,9 кГц. Частоты среднечастотных составляющих напряжения после погасания дуги и в первом, и во втором циклах практически совпадают (2,0-2,5 кГц). Частоты импульсных перенапряжений менее 2 кГц в переходном процессе для рассматриваемой схемы в расчетном эксперименте не зарегистрированы.

Можно показать, что более высокие частоты переходного процесса, определяемые в том числе параметрами источника питания и нагрузки, и в токе дугового замыкания, и в напряжении неповрежденных фаз – соответствуют более ранним переходам тока дуги через ноль с ее погасанием.

Отметим, что отличие предложенной модели дугового ОЗЗ от классических схем Петерсена и Н.Н. Белякова заключается в реализации фактических положений по условиям зажигания и погасания дуги в изоляции кабеля с БПИ, полученных при мониторинге перенапряжений в действующих электрических сетях [2]:

- во-первых, пробой изоляции на одной фазе в кабельной сети после перехода напряжения через максимум на ней более вероятен (вероятность  $\geq 0,5$ ), нежели пробой в максимум (вероятность = 0,15);

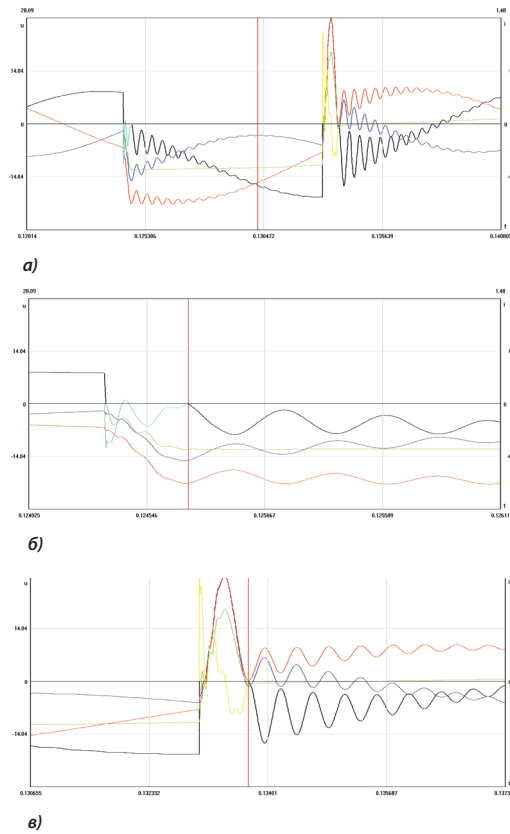


Рис. 5. Компьютерные осциллограммы переходных процессов при моделировании дугового ОЗЗ в середине КЛ (2,5 км от питающих шин): исходная осциллограмма (а), первый (б) и второй (в) циклы «зажигание-погасание» дуги

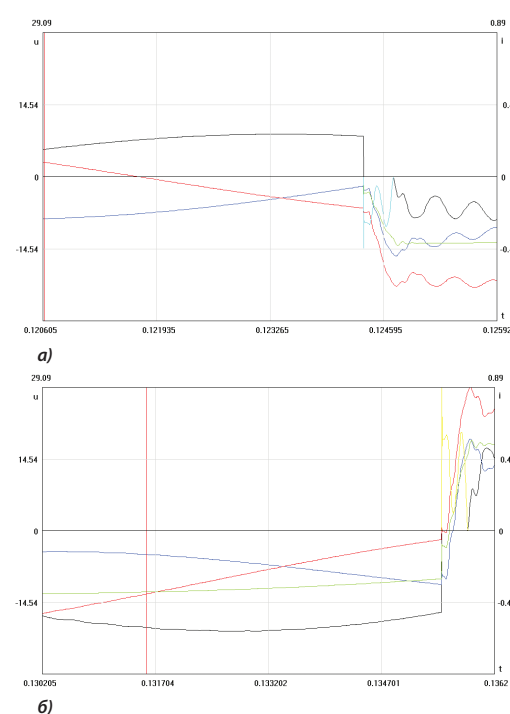


Рис. 6. Компьютерные осциллограммы переходных процессов при моделировании дугового ОЗЗ в концевой муфте КЛ (5,0 км от питающих шин) в первом (а) и втором (б) циклах «зажигание-погасание» дуги

• во-вторых, погасание дуги может происходить с равной вероятностью как в первый, так и любой из последующих 3-х-4-х переходов тока дуги через нуль.

Адекватные действительным уровни перенапряжений могут быть получены на компьютерной модели при двух последовательных пробоях фазы на землю, на практике повторных пробоев может быть сколь угодно много (наибольшая зарегистрированная длительность дуговых ОЗЗ составляет на сегодняшний день несколько десятков минут), но независимо от их количества и условий существования справедливо соотношение  $U_{\text{ПЕР}}/U_{\text{ФМАХ}} \leq 3,0-3,2$ . При этом следует учитывать, что погасание дуги при горении в кабельной изоляции происходит при переходе высокочастотной составляющей (от 400-600 Гц до 2-6 кГц) тока через нуль.

На основе рассматриваемой модели сети 10 кВ (рис. 4) в приложении к близким к реальным условиям горения дуги в кабельной изоляции при первых ее пробоях произведена оценка зависимости уровней перенапряжений от соотношения  $I_R/I_C$  по длине КЛ (рис. 7).

Результаты расчетов, приведенные на рис. 7, хорошо согласуются с результатами физического моделирования, выполненного Н.Н. Беляковым [3]. Исходя из анализа параметров переходных процессов при дуговых ОЗЗ для различных моделей электрической сети с КЛ, а также на основе кривых распределения перенапряжений как функции отношения  $I_R/I_C$  можно отметить следующее. Точки пересечения кривых наибольших перенапряжений в одной и той же точке линии при двух последовательных пробоях позволяют оценить значения сопротивления резистора, достаточно-

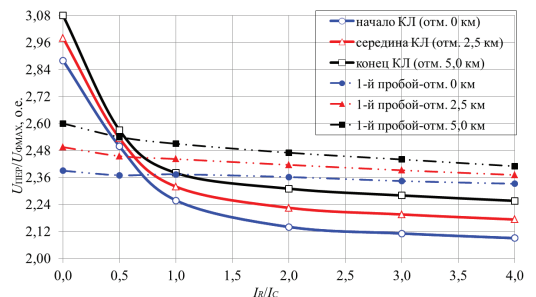


Рис. 7. Расчетные уровни перенапряжений в трех точках КЛ для различных соотношений  $I_R/I_C$  (пунктирные линии – после первого пробоя, сплошные – после второго) в сети без компенсации емкостного тока



го для ограничения перенапряжений до требуемого (который полагается безопасным для изоляции даже состаренного оборудования) уровня не более  $(2,4-2,6)U_{\text{ФМАХ}}$ . Например, для рассматриваемой схемы сети практически независимо от удаления точки замыкания от питающих шин, оптимальный номинал резистора соответствует значениям активного тока  $I_R = (0,6-0,7)I_C$ .

Зависимость  $U_{\text{ПЕР}}/U_{\text{ФМАХ}} = f(I_R/I_C)$  носит характер гладкой ниспадающей кривой, которая с уровнем достоверности 0,98-0,99 может быть аппроксимирована полиномиальной функцией четвертой степени вида  $Ax^4+Bx^3+Cx^2+Dx+E$  (для оценки перенапряжений на шинах) и функцией пятой степени вида

$Ax^5+Bx^4+Cx^3+Dx^2+Ex+F$  (для оценки перенапряжений по длине КЛ) с коэффициентами, приведенными в табл. 1. Использование подобных полиномов позволит с высокой степенью точности проводить оценочные расчеты по выбору номинала резистора для заземления нейтрали сети как по условию ограничения перенапряжений, так и по условию гарантированного перевода перемежающейся дуги в устойчивую.

На рис. 8 приведены кривые распределения уровней перенапряжений по длине рассматриваемой КЛ.

Как показали расчеты, при дуговых ОЗЗ на КЛ наблюдается рост перенапряжений к концу линии, практически независимо от точки замыкания (напомним, что в расчетах замыкание

на землю моделировалось в середине линии на отметке 2,5 км и в концевой муфте на отметке 5,0 км). Это связано с характером волнового процесса при распространении импульса перенапряжения по линии. Следует отметить, что с повышением соотношения  $I_R/I_C$  рост перенапряжений по длине КЛ становится менее заметным: например, при  $I_R/I_C=0$  разница в начале и конце КЛ длиной 5 км составляет  $\Delta U_{\text{ПЕР}}/U_{\text{ФМАХ}} = 0,15$ , а при  $I_R/I_C=4$  имеет место снижение до  $\Delta U_{\text{ПЕР}}/U_{\text{ФМАХ}} = 0,06$ .

Можно показать, что подобный характер изменения перенапряжений будет наблюдаться и при иных значениях протяженности КЛ с сохранением следующего соотношения: удаление точки регистрации фазных напряжений от точки дугового ОЗЗ на каждую 1000 м приводит к росту  $U_{\text{ПЕР}}/U_{\text{ФМАХ}}$  примерно на 1-4% после первого пробоя и на 0,5-1,0 % после второго.

Эти заключения были в целом подтверждены результатами осциллографирования переходных процессов при искусственных «металлических» ОЗЗ, которые можно рассматривать как частный случай единичного дугового пробоя, в кабельной сети 6 кВ ПС №104 «АСМ» г. Рубцовска. Регистрация фазных напряжений в двух точках – на секции шин подстанции, а также удалении на 7,7 км по наиболее протяженному фидеру сети – показала, что уровни  $U_{\text{ПЕР}}/U_{\text{ФМАХ}}$  могут увеличиваться по длине КЛ более чем на 20-25 %, а длительность фронта импульса перенапряжения повышается примерно на 0,1-0,5 мс. Рост перенапряжений более расчетных значений и некоторое «вытягивание» фронта вызваны, вероятно, переотражением волны напряжения на узлах схемы – транзитных РП-6 кВ.

**Оценка параметров переходного процесса при дуговом замыкании в кабеле для сети с комбинированной нейтралью**

Можно показать, что для сети с компенсацией емкостного тока справедливы основные положения, касающиеся расчета амплитудных и частотных параметров с помощью использованной модели дугового замыка-

Табл. 1. Коэффициенты аппроксимирующих полиномов для оценки уровней перенапряжений в разных точках КЛ

Коэффициенты полинома $U_{\text{ПЕР}}/U_{\text{ФМАХ}} = f(I_R/I_C)$	Точка регистрации перенапряжений по длине КЛ		
	питающие шины (отметка 0 км)	середина КЛ (отметка 2,5 км)	концевая муфта со стороны нагрузки (отметка 5,0 км)
A	$9,8 \cdot 10^{-3}$	$1,3 \cdot 10^{-3}$	$-6,9 \cdot 10^{-3}$
B	-0,1185	$5,9 \cdot 10^{-3}$	$9,22 \cdot 10^{-2}$
C	0,5243	-0,1506	-0,479
D	-1,0279	0,6753	1,2101
E	2,8832	-1,1928	-1,5164
F	-	2,98	3,08

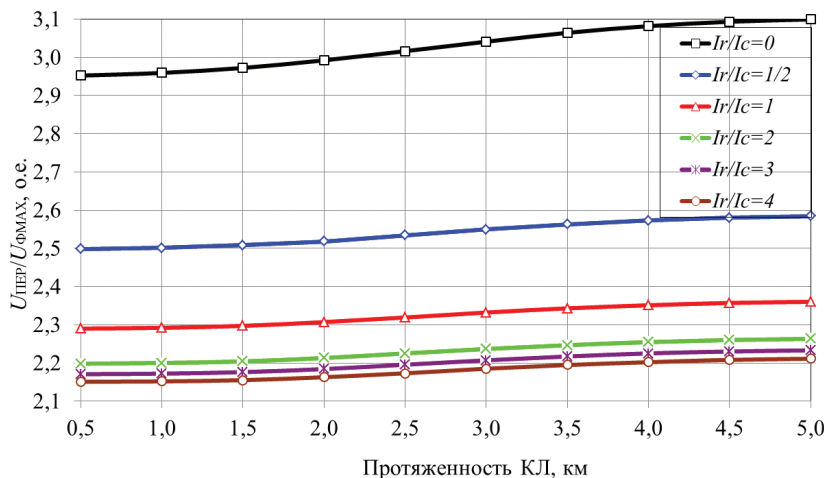


Рис. 8. Распределение уровней перенапряжений по длине КЛ с бумажно-пропитанной изоляцией при различных соотношениях  $I_R/I_C$

ния. Принципиально в сети с ДГР за счет снижения скорости восстановления напряжения поврежденной фазы уменьшается частота следования повторных пробоев, однако при расстройках компенсации более 15-20% этот эффект будет серьезно нивелирован, возможны биения, а уровни перенапряжений станут сопоставимы с таковыми для сети с изолированной нейтралью. Включение в нейтраль параллельно дугогасящему реактору активного сопротивления способствует быстрому снижению свободных колебаний, гашению биений и снижению напряжения на поврежденной фазе.

Большинство приведенных выше положений было подтверждено в результате натурных экспериментов с инициированием дугового замыкания в БПИ кабеля (искусственное повреждение типа «прокол») в действующей электрической сети 6 кВ Кемеровской ТЭЦ. Схема заземления нейтрали сети – комбинированная. В рассматриваемом опыте емкостный ток сети составлял 96 А, индуктивный ток перекомпенсации – 9,6 А ( $\nu=+10\%$ ), активный ток от резисторов в нейтрали – 6,9 А. На рис. 9 с разными развертками по времени приведены осциллограммы переходного процесса дугового ОЗЗ в испытываемом кабеле ААШВ-6 3х120 мм<sup>2</sup> (напряжение фазы «А» – синий, фазы «В» – зеленый, фазы «С» – красный, ток дуги в месте повреждения – черный).

Всего в течение опыта было зафиксировано 57 пробоев. Попытки гашения дуги наблюдаются при каждом переходе высокочастотного тока через ноль, о чем свидетельствует появление малого, но отличного от нуля напряжения поврежденной фазы (рис. 9 б, в). Полученная частота тока дуги до погасания, совпадающая с частотой напряжений неповрежденных фаз, равна  $520 \pm 30$  Гц, а скорость перехода тока дуги через ноль перед погасанием – 400-500 А/мс. Зарегистрированная в эксперименте частота тока перед погасанием дуги примерно на порядок ниже расчетных значений (рис. 5-6), что объясняется соответствующим отличием значений емкостей прямой и нулевой последо-

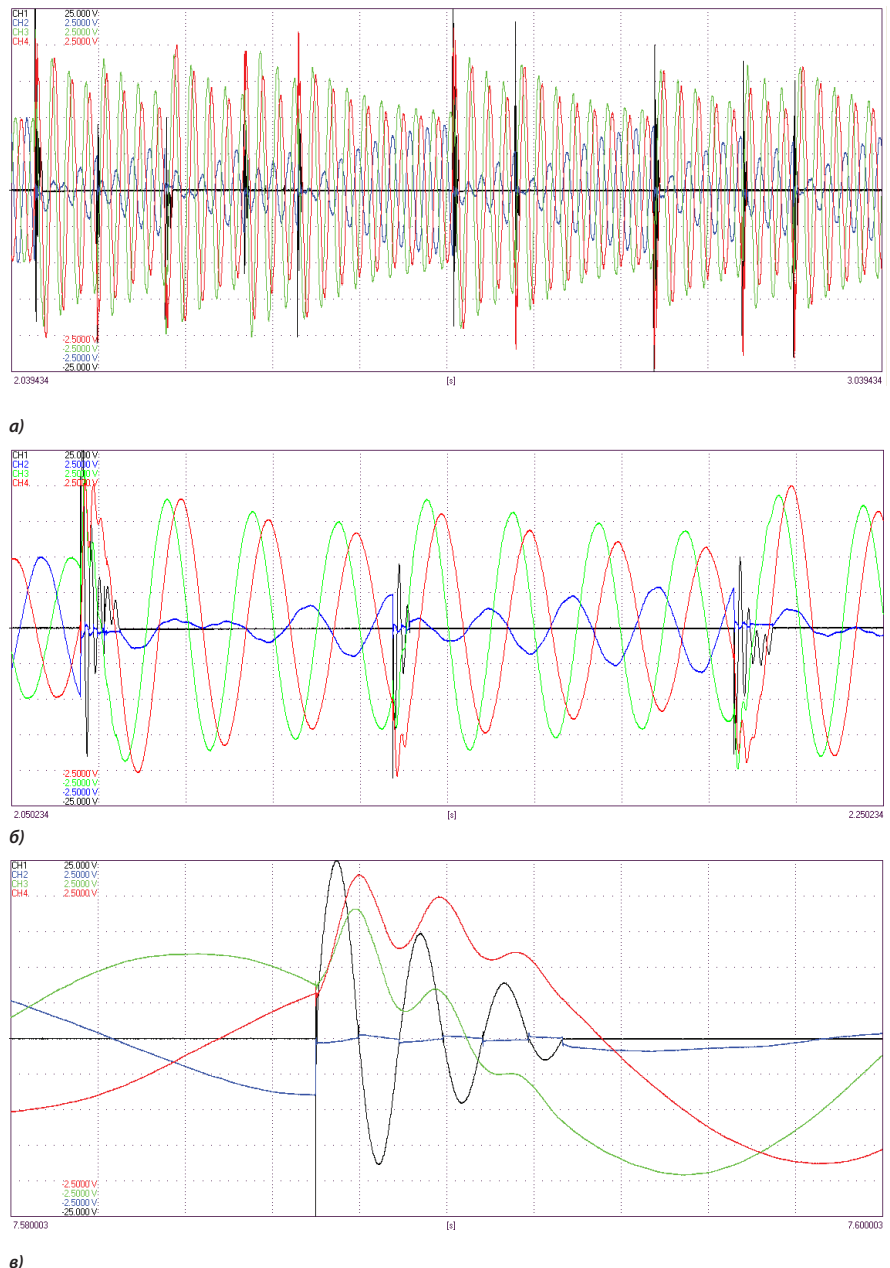
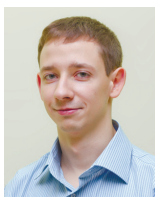


Рис. 9. Экспериментальная осциллограмма многократного дугового замыкания в кабельной изоляции с попытками погасания и успешным гашением дуги при переходе высокочастотного тока дуги через ноль (масштаб по оси напряжения 2,55 кВ/дел): а) 100 мс/дел, б) 20 мс/дел, в) 2 мс/дел

вательностей в экспериментальной и расчетной схемах сети. Перенапряжения на протяжении дугового замыкания (длительностью 5,2 с в рассматриваемом опыте) не превышают  $2,4U_{\text{ФМАХ}}$ . В процессе горения прерывистой дуги с

бестоковыми паузами 60-100 мс и длительностью существования высокочастотного тока 5-7 мс напряжение повторных пробоев меняется в диапазоне  $(0,1-0,6)U_{\text{ФМАХ}}$ . Скорость восстановления напряжения на поврежденной фа-





**Ширковец Андрей Игоревич**

Дата рождения: 06.09.1983 г., окончил в 2006 г. Новосибирский государственный технический университет, кафедра техники и электрофизики высоких напряжений, магистр техники и технологии по направлению Электроэнергетика. В настоящее время соискатель ученой степени кандидата технических наук (НГТУ), научный руководитель д.т.н., профессор К.П. Кадомская, ведущий инженер научно-исследовательского отдела ООО «Болд»

зе в бестоковую паузу, в зависимости от условий пробоя, составляет от 15-20 В/мс до 40-60 В/мс.

Таким образом, представленные цифровые осциллограммы, записанные с частотой дискретизации не ниже 500 кГц, в целом подтверждают адекватность, дополняют и корректируют результаты расчетов с помощью представленной модели для анализа переходных процессов при дуговых замыканиях на землю в изоляции силовых кабелей 6-10 кВ.

### Выводы

1. Рассмотрены особенности дугового замыкания в БПИ силового кабеля и получен характер изменения восстанавливающейся электрической прочности на различных стадиях горения дуги ОЗЗ, подтвержденный натурными осциллограммами в действующей кабельной сети 6 кВ промышленного предприятия.

2. В рамках решения поставленной задачи разработана и реализована в программной оболочке VMAES расчетная модель для анализа переходных процессов при дуговых ОЗЗ в сети 10 кВ с кабельными линиями большой протяженности. Для данной модели кабельной сети характерной конфигурации (секция шин) проведен комплекс расчетов перенапряжений и определены основные амплитудные и частотные параметры переходного процесса.

3. Показано, что погасание дуги при горении в кабельной изоляции происходит при переходе высокочастотной (как правило, от 400-600 Гц до 2-6 кГц) составляющей тока через нуль. Это условие следует использовать при моделировании соответствующих переходных процессов, частоты которых в идеальной схеме замещения определяются только эквивалентной емкостью сети (фазной на землю и междуфазной) и мощностью питающего трансформатора.

4. Распределение перенапряжений по КЛ 6-10 кВ длиной до 5 км, определяемое в основном соотношением  $I_R/I_C$  и относительно слабо зависящее от точки замыкания, не превышает обычно  $(2,4-2,6)U_{\text{ФМАХ}}$  уже при  $I_R/I_C \geq 0,5-0,7$ . В целом волна перенапряжений, вызванная замыканием на землю в изоляции кабеля, при пробегании по линии несколько искажается как по длительности фронта, так и по амплитуде. Независимо от точки замыкания уровень перенапряжений, воздействующих на изоляцию неповрежденных фаз кабеля, определяется соотношением  $I_R/I_C$  и повышается к концу линии примерно на 5-15 % для КЛ с характерными длинами 3-5 км.

Эффект повышения амплитуды перенапряжения при пробегании волны вдоль протяженной КЛ становится более заметным и может достигать 20-25% уже при первом пробое, если длина КЛ превышает 7 км.

5. Натурные эксперименты с созданием дугового замыкания длительностью более 5 с в кабельной изоляции позволяют скорректировать амплитудные и частотные параметры переходного процесса для случая комбинированного заземления нейтрали, т.е. при меньшей (по сравнению с режимом резистивного заземления нейтрали) скорости восстановления напряжения на поврежденной фазе в бестоковую паузу, оцененной как 20-60 В/мс.

### Литература

1. Александров Г.Н., Иванов В.Л., Кадомская К.П. и др. Техника высоких напряжений. Учеб. пособие для вузов./ Под ред. М.В. Костенко. – М.: Высшая школа, 1973. – 528 с.
2. Ильиных М.В., Ширковец А.И., Сарин Л.И., Буянов Э.В. Компенсированная и комбинированно заземленная нейтраль. Опыт эксплуатации сети 6 кВ металлургического комбината // Новости Электротехники. 2007. №2 (44). – С.68–72.
3. Беляков Н.Н. Перенапряжения от заземляющих дуг в сетях с активным сопротивлением в нейтрали// Труды ВНИИЭ. 1961. Вып. 11. – С.84-101.



## Научно- производственное предприятие «БОЛИД»

### Производство:

- высоковольтные резисторы для заземления нейтрали сетей 3-35 кВ;
- резистивные установки в составе токоограничивающих устройств для сетей до 500 кВ;
- панели электрические греющие до 1,2 кВт;
- системы обогрева гидротехнических сооружений;
- блочно-модульные нагрузочные устройства до 5,5 МВт;
- резисторы для RC-цепей, а также RC-цепи полностью на номинальное напряжение 6-110 кВ.

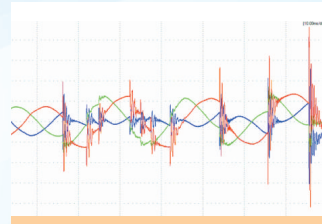


*Резисторы аттестованы в ОАО "ФСК ЕЭС", ОАО "Холдинг МРСК" и соответствуют принятым международным нормам IEEE-Std 32-1972 (Сертификат Соответствия TUV Rheinland InterCert Kft.).*



### Экспериментальные исследования:

- металлические и дуговые замыкания на землю с осциллографированием всех режимных параметров;
- процессы при коммутациях высоковольтных выключателей с целью определения их характеристик и разработки требований к ним.



### Испытания и диагностика кабельных линий:



- измерение тангенса угла диэлектрических потерь;
- измерение частичных разрядов с локализацией места источника;
- прожиг дефектной изоляции;
- точное определение места повреждения;
- точная локация однофазных замыканий на землю.



*Электротехническая лаборатория МЕГА-2 Professional 80 System 3S производства BAUR, установленная на шасси УРАЛ 4320.*

Компания ООО «Болид» обладает многолетним опытом выполнения исследовательских и экспериментальных работ в сетях 6-35 кВ различного назначения и имеет аккредитацию ОАО «Газпром» на осуществление деятельности по техническому диагностированию.



**Адрес:** Новосибирск, Ул. Электrozаводская, 2, корп. 6.

**Головной офис:** Телефон/факс: 8(383) 325-33-17, 325-33-15.

Телефон: 8 (383) 325-33-18. E-mail: pnp\_bolid@ngs.ru.

**Научно-исследовательский отдел:** Телефон: 8 (383) 246-10-03, 246-10-04, 246-10-02.

Факс: 8 (383) 2-360-363. E-mail: nio\_bolid@ngs.ru.

[www.pnpbolid.com](http://www.pnpbolid.com)