

## МОДЕЛИРОВАНИЕ ПЕРЕНАПРЯЖЕНИЙ В КАБЕЛЬНОЙ РАСПРЕДЕЛИТЕЛЬНОЙ СЕТИ 10 кВ ПРИ ОДНОФАЗНЫХ ДУГОВЫХ ЗАМЫКАНИЯХ НА ЗЕМЛЮ

**В.А. Бошняга, В.М. Постолатий, В.М. Суслов (Институт энергетики Академии  
Наук Молдовы), А.Н. Клиндухов (компания «Днестрэнерго»)**

**Аннотация.** Разработана модель для исследования перенапряжений в кабельной распределительной сети 10 кВ при наличии перемежающейся дуги. Проведены расчеты и анализ перенапряжений, возникающих при однофазных замыканиях на землю. Определены уровни перенапряжений в распределительной сети при однофазном коротком замыкании, а также при наличии виткового замыкания в обмотке ВН распределительного трансформатора 10/0,4 кВ. Показано, что величины максимальных перенапряжений в сети 10 кВ в основном определяются работой ОПН, и непосредственно не связаны с наличием дугогасящего реактора, выполняющего функцию ограничения тока в месте короткого замыкания и лишь сглаживающего высокочастотные колебания.

**Ключевые слова:** модель, кабельная сеть, однофазное замыкание, перемежающаяся дуга, перенапряжения, витковое замыкание.

### MODELAREA SUPRATENSIUNILOR ÎN REȚEAUA DE CABLU DE DISTRIBUȚIE 10 kV LA SCURTCIRCUITE MONOFAZATE LA PAMÂNT CU ARC

**V.A. Boșneaga, V.M. Postolati, V.M. Suslov (Institutul de Energetică al Academiei de Științe a Moldovei),  
A.N. Klinduhov (Întreprindere de Stat „Dnestrenergo”)**

**Rezumat.** Este elaborat modelul pentru calcularea și investigarea supratensiunilor în rețeaua de distribuție prin cablu de 10 kV în prezența arcului monofazat intermitent. Au fost determinate nivelurile de supratensiuni în rețeaua de distribuție pentru scurtcircuit monofazat și în cazul scurtcircuitului în bobina de tensiune înaltă a transformatorului de distribuție 10/0, 4 kV. S-a demonstrat, că valorile maxime a supratensiunilor sunt determinate în mare măsură de funcționarea aparatelor de limitare a supratensiunilor, și nu sunt direct legate de prezența reactorului de stingere a arcului electric, care contribuie esențial la limitarea curentului de scurt-circuit în locul defectului și numai netezește oscilațiile de frecvență înaltă.

**Cuvinte-cheie:** model, rețeaua de cablu, scurtcircuit monofazat, arcul intermitent, supratensiunile, scurtcircuit în bobinaj.

### MODELING OF OVER VOLTAGES IN 10 kV CABLE DISTRIBUTION NETWORK AT SINGLE- PHASE FAULTS TO GROUND WITH ARC

**V.A. Bosneaga, V.M. Postolaty, V.M. Suslov (Institut of Power Engineering of the ASM),  
A.N. Klinduhov (state company „Dnestrenergo”)**

**Abstract.** The aim of the work is to study surges in the 10 kV cable distribution network in the presence (occurrence) of the intermittent arc, which could lead to significant damages in the network, including the failure of distribution transformers. Surge analysis is performed for single-phase to ground faults in the network. Surges' levels in the 10 kV distribution network were determined for single-phase-to-ground faults and for HV winding inter-turn fault in the 10/0,4 kV distribution transformer. It is shown, that the maximum surge values are determined mainly by the functioning of installed surge arresters and are not directly related to the presence of the arc elimination reactor, which acts mainly as the current limiter in the place of short-circuit and only smoothes high-frequency oscillations. The elaborated model may be used for analyses of surges in the cable network, caused by short circuits via (due to) the intermittent arc.

**Key words:** model, cable network, single-phase short-circuits, intermittent arc, transformer winding internal short-circuits.

### **Введение.**

Вопросы расчета перенапряжений в электрических распределительных сетях с изолированной (компенсированной) нейтралью напряжением 6-35 кВ при однофазных замыканиях на землю (ОЗЗ) и способы обеспечения их более надежной работы

являются актуальными с научной и практической точек зрения. Этим вопросам в доступной литературе посвящены многочисленные публикации, среди которых можно, например, отметить [1-7]. Наиболее подходящим методом моделирования и исследования переходных процессов при дуговых ОЗЗ и сопровождающих их перенапряжениях, как справедливо указано в [1], с учетом ограниченных возможностей проведения экспериментов в действующих сетях 6-35 кВ, является математическое моделирование на ЭВМ, которое применяется и в данной работе. Однако, в отличие от [8], где применен комбинированный подход - аналитическое исследование упрощенной схемы, а затем более детальное моделирование с использованием программы расчета электромагнитных переходных процессов АТР-ЕМТР, в данной работе используется математическое моделирование. При этом, в отличие от [8], где рассматривается замыкание через фиксированное сопротивление, здесь моделируется перемежающаяся дуга с повторными зажиганиями. Расчету перенапряжений в кабельных сетях посвящена также работа [9], где, однако, рассматривается традиционно наиболее распространенная в ряде энергосистем, преимущественно на западе, резистивное заземление нейтрали. В отличие от упомянутых работ, предложена методика и проведено эквивалентирование древовидной схемы сети, а также расчет и исследование перенапряжений с учетом влияния устройств ограничения перенапряжений (ОПН), заземления нейтрали через дугогасящий реактор и, кроме того, смоделированы витковые замыкания в обмотках ВН распределительного трансформатора. Исследование проведено на примере распределительной кабельной сети электроснабжения жилого микрорайона (см. рис.1) с бытовой и промышленной нагрузкой. Отдельное внимание при этом уделено моделированию перемежающейся дуги и рассмотрению возможных витковых замыканий в обмотках высокого напряжения (ВН) распределительных трансформаторов, оценке их влияния на величину напряжения на стороне НН.

### **Методика моделирования кабельной сети**

В качестве расчетного инструмента для анализа подобных режимов был использован пакет программ МАТЛАБ, располагающий достаточно развитым набором специальных блоков для моделирования элементов энергетической системы, в том числе и трансформаторов.

В связи с относительно большим объемом рассматриваемой сети (см. рис.1) было проведено эквивалентирование рассматриваемого участка кабельной электрической сети, а затем, на базе полученного эквивалента (см. рис.2), проведена серия расчетов различных режимов (как установившихся, так и электромагнитных переходных процессов). Далее, на основе полученных результатов, проанализированы возможные величины возникающих перенапряжений и потенциальные причины возникновения повышенных напряжений на стороне НН (у потребителей).

При исследовании перенапряжений в кабельной распределительной сети 10 кВ было принято допущение, состоящее в том, что величины возникающих максимальных перенапряжений в системе с изолированной или заземленной через дугогасящий реактор нейтрали в основном определяются параметрами кабельной сети (длинами, емкостями и индуктивностями кабелей) и практически не зависят от величины протекающих по сети симметричных токов нагрузки данной сети. Это объясняется тем, что нейтрали трансформаторов распределительной сети 10 кВ изолированы от земли.

Поэтому расчеты проводились при отсутствии в сети токов нагрузки (в том числе и на потребительских подстанциях 10/0,4 кВ). Так как предполагалось рассмотрение несимметричных повреждений (и, прежде всего, наиболее вероятных однофазных

коротких замыканий в сети), то распределительная сеть моделировалась в фазных координатах с помощью стандартных элементов, предоставляемых упомянутой программой.

Каждый участок сети представляется в виде Т-образной трехфазной схемы замещения. Результаты расчета параметров элементов Т-образных схем замещения для ветвей моделируемой сети (см. рис.1) приведены в таблице. Данная схема строится из базовых элементов, имеющих в среде МАТЛАБ [10]. Основной ее элемент, используемый для моделирования это последовательная трехфазная RL ветвь, в которой элемент R определяет активное сопротивление жилы участка кабеля, а L – ее индуктивность прямой последовательности.

Оболочка кабеля вместе с землей представляется как отдельный обратный провод. Он моделируется в схеме в виде однофазной RL ветви. Ее параметры определяются из известных соотношений [11] для кабеля, имеющих между сопротивлениями прямой и нулевой последовательностей. Емкости фаз кабеля по отношению к его оболочке (на землю) задаются трехфазной последовательной С-ветвью по схеме звезды, нейтраль которой подключена к обратному проводу. Междофазные емкости кабеля также моделируется такой же схемой, но с изолированной нейтралью. Их величины определяются известными соотношениями между емкостями жил кабеля для прямой и нулевой последовательностей [12].

Для более корректного учета затухания свободных составляющих переходного процесса и учета поверхностного эффекта активные сопротивления элементов схемы замещения были увеличены в 4,5 раза (см. [13]).

Последовательные участки сети эквивалентировались традиционным образом: производилось суммирование соответствующих параметров участков сети. Участки сети, исходящие из одного узла, замещались одним эквивалентным участком. Параметры RL данного участка определялись из следующих соотношений.

$$r_{\Sigma} = \frac{\max(r_i \cdot C_i)}{\sum_{i=1}^n C_i}, L_{\Sigma} = \frac{\max(L_i \cdot C_i)}{\sum_{i=1}^n C_i},$$

где  $i$  – номер участка,  $r_i$  – активное сопротивление,  $C_i$  – емкость,  $L_i$  – индуктивность  $i$ -го участка,  $\max$  – максимальное значение из всех произведений  $r_i C_i$  параллельных участков.

Эквивалентная емкость такого участка определяется суммированием емкостей составляющих участков. Результат эквивалентирования схемы рис.1 показан на однолинейной схеме рассматриваемой сети в виде, изображенном на рис.2. Номера внутри прямоугольников соответствуют номерам подстанций, а сами прямоугольники обозначают подстанции первоначальной сети либо эквивалентные узлы, полученные в результате упрощения исходной схемы рис.1.

Параметры модели для имеющегося в схеме исходной сети сдвоенного реактора (включенного между I и III системами шин) типа РБСДГ 10-2Х2500-0.2УЗ определялись следующим образом: собственное индуктивное сопротивление каждой обмотки реактора РБСДГ 10-2Х2500-0.2УЗ в соответствии с номинальными данными принято равным 0,2 Ом (см. [14]). Коэффициент электромагнитной связи между обмотками  $k_{св}$ , согласно тому же источнику, принят равным 0,46.

Для сквозного тока через реактор, индуктивности каждой из ветвей реактора определяются из следующего выражения:

$L_e = \frac{x}{\omega} \cdot (1 + k_{ce}) = \frac{0,2}{314} \cdot (1 + 0,46) = 0,00093(\Gamma H)$  , Где  $x$  - собственное индуктивное сопротивление каждой из обмоток реактора,

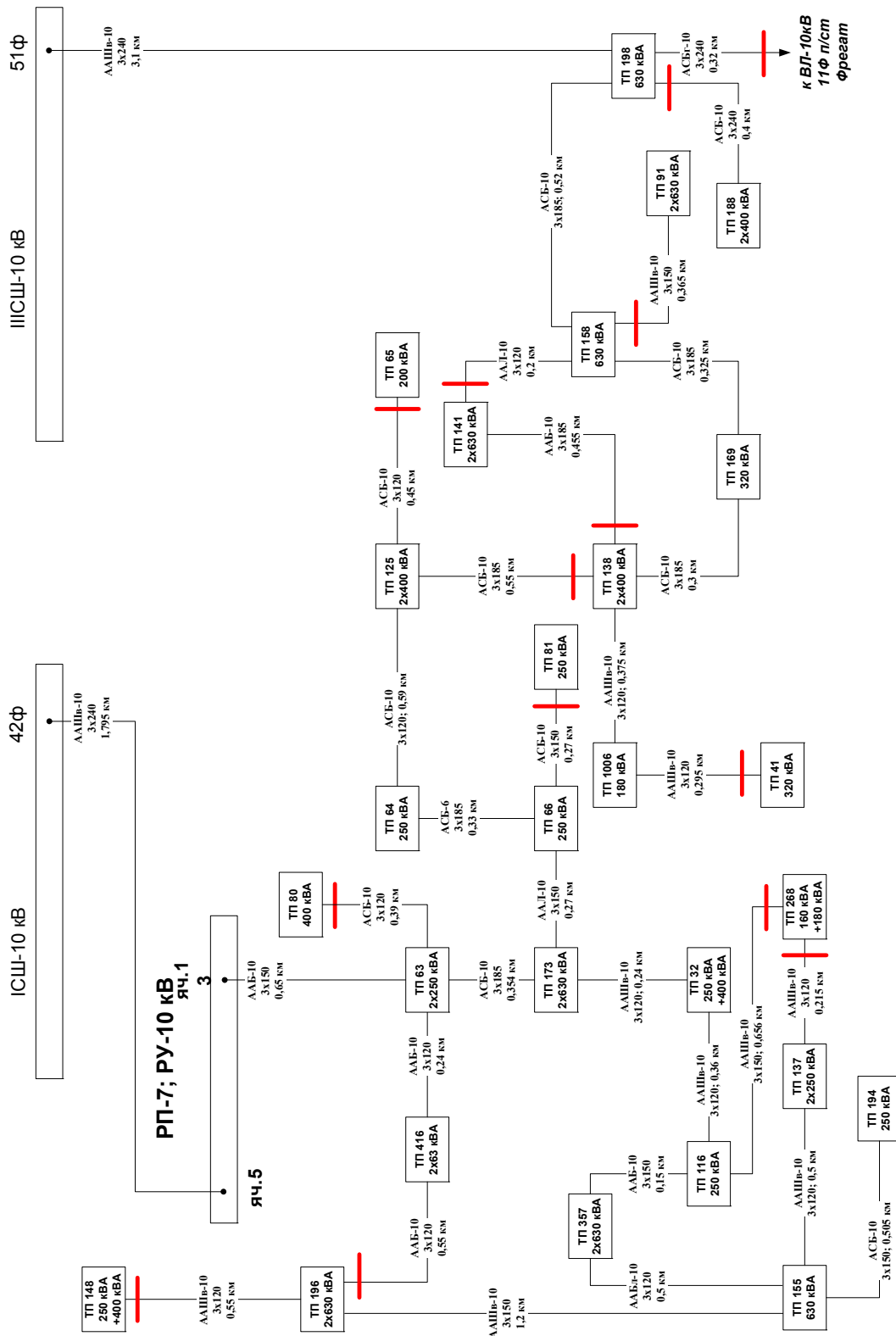


Рис.1. Моделируемая распределительная кабельная сеть

PROBLEMELE ENERGETICII REGIONALE 1(21)  
ELECTROENERGETICĂ

$\omega$  - промышленная частота переменного тока (угловая),

$k_{cb}$  – коэффициент электромагнитной связи между обмотками.

**Таблица расчетных параметров Т-образных схем замещения участков распределительной кабельной сети 10 кВ.**

Номера пограничных подстанций		Пофазные параметры участков				Параметры земляного провода	
<i>№1</i>	<i>№2</i>	Активное сопротивление, Ом : $R_r=2,25R_y$	Индуктивность, мкГн : $L_r=1592X_y$	Емкость на землю, мкФ: $C_r=0,28C_y$	Дополнительная <sup>1</sup> емкость (без земли), мкФ: $C_{об}=0,22C_y$	Активное сопротивление, Ом : $R_z=3R_r$	Индуктивность, мкГн : $L_r=X_r$
<b>63</b>	<b>416</b>	<b>0,132</b>	<b>31</b>	<b>0,0497</b>	<b>0,039</b>	<b>0,397</b>	<b>31</b>
173	66	0,119	34	0,0665			
66	64	0,118	40,5	0,0832			
64	125	0,325	76,1	0,122			
<b>173</b>	<b>125</b>	<b>0,562</b>	<b>151</b>	<b>0,272</b>	<b>0,214</b>	<b>1,69</b>	<b>151</b>
138	169	0,107	36,8	0,0756			
1006	138	0,207	48,4	0,0777			
<b>169</b>	<b>1006</b>	<b>0,314</b>	<b>85,2</b>	<b>0,153</b>	<b>0,12</b>	<b>0,94</b>	<b>85,2</b>
196	155	0,529	151	0,296			
155	137	0,276	64,5	0,104			
<b>155</b>	<b>137-196</b>	<b>0,5</b>	<b>143</b>	<b>0,399</b>	<b>0,313</b>	<b>1,17</b>	<b>143</b>
155	357	0,276	64,5	0,104			
357	116	0,0662	18,9	0,037			
116	32	0,198	46,4	0,0746			
32	173	0,132	31	0,0497			
<b>155</b>	<b>173</b>	<b>0,67</b>	<b>161</b>	<b>0,265</b>	<b>0,208</b>	<b>2,02</b>	<b>161</b>
1	3	0,505	214	0,462			
3	63	0,287	81,8	0,16			
<b>1</b>	<b>63</b>	<b>0,792</b>	<b>296</b>	<b>0,622</b>	<b>0,489</b>	<b>2,38</b>	<b>296</b>
<b>63</b>	<b>173</b>	<b>0,126</b>	<b>43,4</b>	<b>0,0892</b>	<b>0,07</b>	<b>0,38</b>	<b>43,4</b>
<b>155</b>	<b>194</b>	<b>0,223</b>	<b>63,5</b>	<b>0,124</b>	<b>0,0974</b>	<b>0,666</b>	<b>63,5</b>
1	198	0,872	370	0,799			
158	198	0,186	63,8	0,131			
169	158	0,116	39,8	0,0819			
<b>1</b>	<b>169</b>	<b>1,17</b>	<b>474</b>	<b>1,01</b>	<b>0,794</b>	<b>3,52</b>	<b>474</b>

<sup>1</sup> Дополнительная емкость – это емкость в схеме звезды (с изолированной нейтралью), эквивалентная емкости в треугольнике междуфазных емкостей.

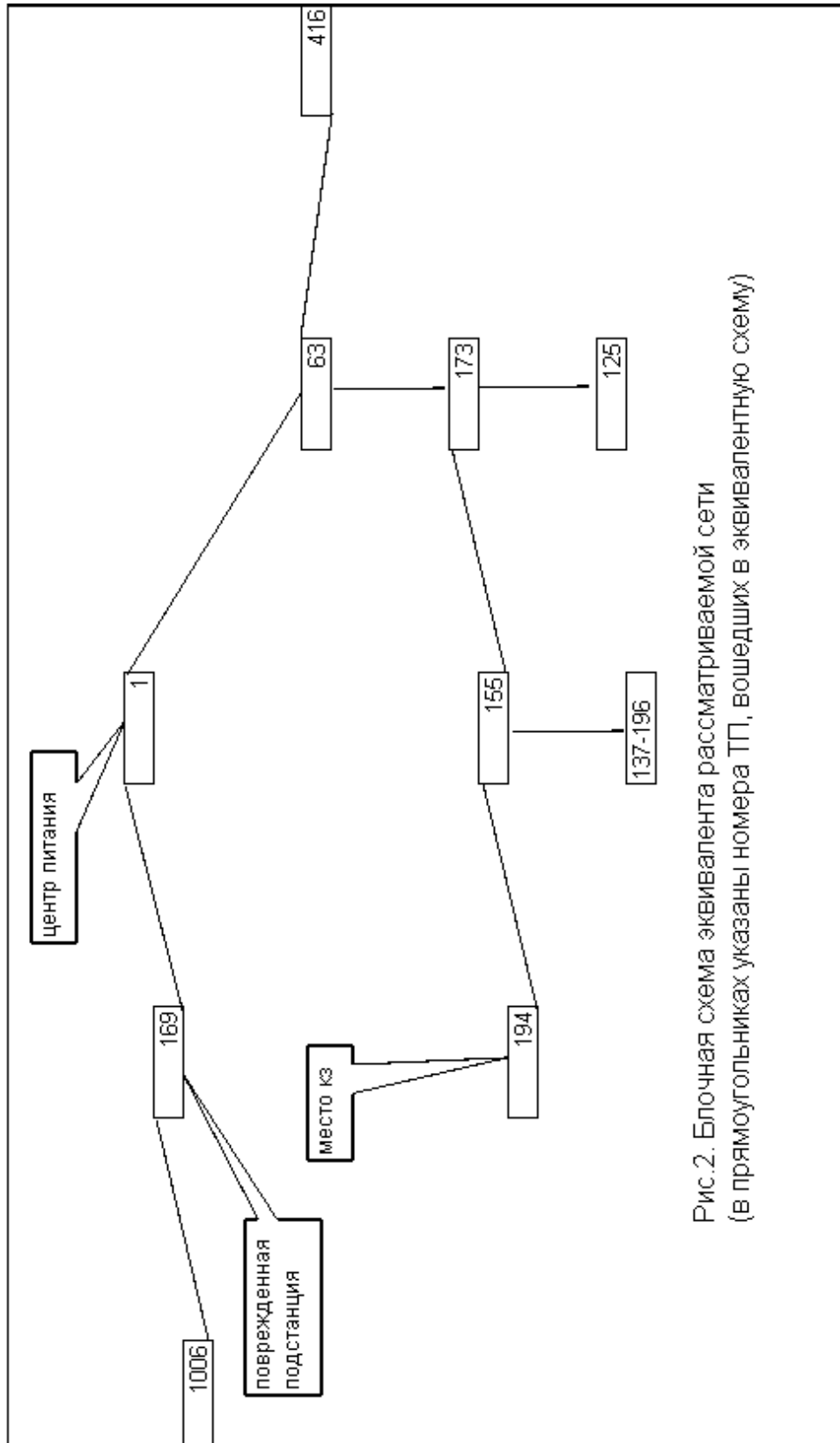


Рис.2. Блочная схема эквивалента рассматриваемой сети  
(в прямоугольниках указаны номера ТП, вошедших в эквивалентную схему)

**Рис.2.** Блочная эквивалентная схема рассматриваемой сети

Однофазные короткие замыкания моделировались в кабельной линии с учетом перемежающейся дуги. Для определения возникающих перенапряжений при ОЗЗ дуговой разряд моделировался по двум общепринятым теориям: Петерсена и Петерса-Слепяна (см. например, [15], стр. 450-452). Для моделирования дуги использовался

стандартный элемент «Breaker» и специально разработанный для данной задачи логический блок для управления им, подробное описание которого, ввиду значительного объема, может быть дано в отдельной работе. Проводящее и непроводящее состояния дуги моделировались двумя величинами активных сопротивлений: 1 Ом - для проводящего состояния и 100 кОм - для непроводящего. Дуга загоралась при максимуме напряжения поврежденной фазы при условии превышения им номинального напряжения. Гашение дуги производилось автоматически, в нужный момент времени при переходе ее тока через нуль, в соответствии с принятой при каждом расчете одной из двух теорий. Данный момент времени определял вышеупомянутый оригинальный блок.

Для моделирования защитных разрядников типа ОПН использовался стандартный элемент, для которого были выбраны типовые значения параметров в соответствии с номинальным напряжением рассматриваемой сети 10 кВ и рекомендуемым уровнем защиты. При расчетах, для выявления роли и влияния ОПН в ограничении возникающих в заданной сети перенапряжений, рассматривались варианты с наличием и отсутствием ОПН.

Дугогасящий реактор также моделировался с помощью стандартного элемента типа однофазной последовательной ветви RLC, параметры которой рассчитывались в соответствии с заданными характеристиками дугогасящих реакторов типов РДПОМ-320/10, РЗДСОМ-760/10, имеющих в рассматриваемой кабельной сети.

Для исследования процессов, происходящих в распределительном трансформаторе 10/0,4 кВ при возникновении и развитии витковых замыканий, а также при других повреждениях (имеется ввиду возможность перехода напряжения со стороны обмотки ВН на обмотку НН при повреждении межобмоточной изоляции) была использована стандартная [10] модель трехобмоточного трансформатора. Параметры данного трансформатора были заданы в соответствии с имеющейся информацией о его схеме соединения обмоток, их номинальных напряжениях и номинальной мощностью – 320 кВА.

Для моделирования различных режимов в заданной кабельной сети была составлена соответствующая рис.1 базовая схема, используемая при расчете перенапряжений. Кроме основных блоков, представляющих собственно кабельную сеть, и ранее упомянутых использованы также описанные в [10] блоки для измерения и визуализации токов и напряжений в различных точках рассматриваемой схемы, представляющих наибольший интерес. В частности, фиксировались токи и напряжения на поврежденной подстанции ТП-169, в месте моделируемого ОЗЗ в кабельной сети в районе ТП-194 и др. элементах сети.

### ***Результаты моделирования различных режимов***

*Расчеты перенапряжений в кабельной сети с перемежающейся дугой (1-я модель дуги) при отсутствии и наличии в схеме ОПН.*

В литературе описано три модели перемежающейся дуги при ОЗЗ, дающих в принципе различные результаты (см., например, [15], стр. 450-452). Здесь будут приведены результаты расчетов, полученные с использованием двух наиболее употребительных моделей, позволяющих получить значения максимальных возможных перенапряжений. В действительности же, как показано в многочисленных экспериментальных исследованиях, обычно реальные значения перенапряжений будут несколько меньше. Рассмотрим сначала результаты расчетов, полученные при использовании первой модели дуги.

На рис. 3 показаны полученные в результате расчета кривые напряжений и тока в месте повреждения при ОЗЗ в кабельной линии (при отключенном ОПН на питающей подстанции) на выходе с ТП-194.

На верхнем графике показана кривая зависимости от времени напряжения поврежденной фазы А по отношению к земле, по оси ординат отложено напряжение в Вольтах, по оси абсцисс – время в секундах (то же самое относится ко всем представленным в данной работе графикам напряжений).

В момент времени  $t = 0,035$  с. происходит очередное зажигание дуги при максимуме напряжения, при этом напряжение на поврежденной фазе резко падает и появляются высокочастотные колебания в кривой напряжения, обусловленные перезарядом емкостей сети, на втором графике приведена кривая тока в месте повреждения (ток указан в амперах, время в секундах, то же самое относится ко всем представленным в данной работе графикам токов). Видно, что в момент зажигания дуги в поврежденной фазе появляется ток к.з., имеющий явно выраженную высокочастотную составляющую. В этот же момент времени в кривых напряжений «здоровых» фаз В и С также появляются значительные импульсные перенапряжения с амплитудой, не превышающей 50 кВ, которые, однако, быстро затухают. Высокочастотная составляющая в токе поврежденной фазы быстро затухает (при  $t \approx 0,037$  с.).

Через некоторое время, после погасания дуги ( $t \approx 0,046$  с.), напряжение фазы А снова начинает повышаться до следующего момента загорания перемежающейся дуги (при  $t = 0,055$  с.). При этом во всех фазах, кроме быстрозатухающих высокочастотных перенапряжений, возникают более длительные по времени перенапряжения величиной до 16-18 кВ.

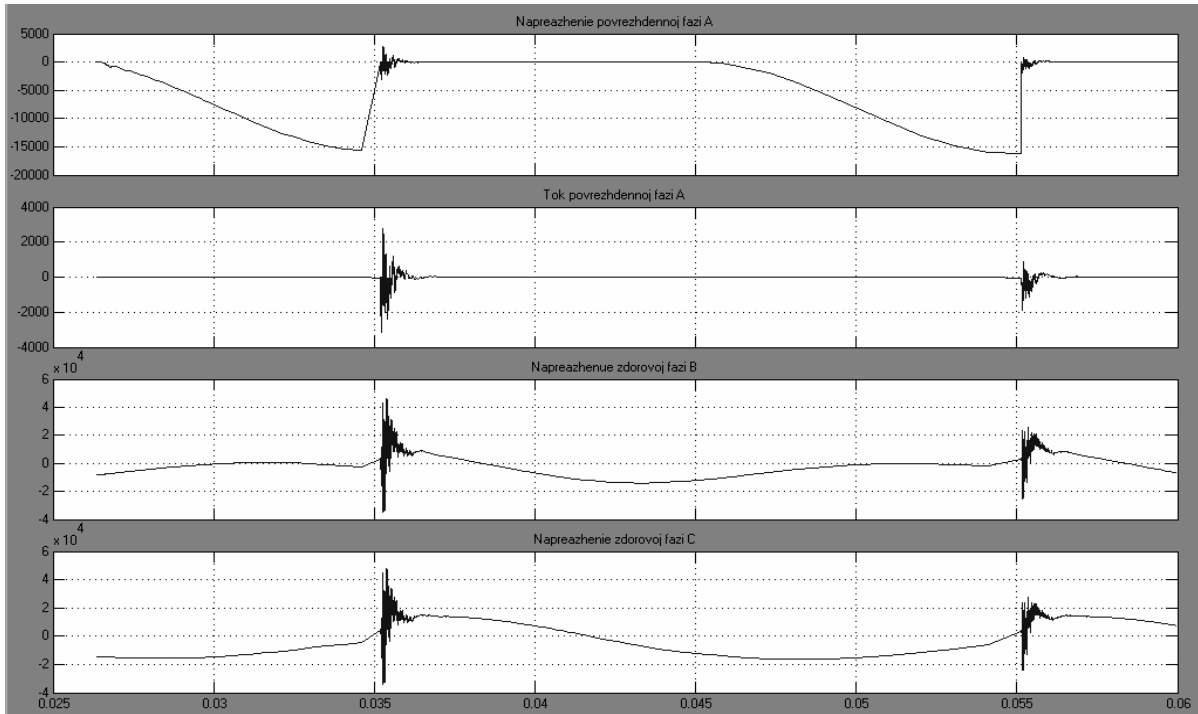
На рисунке 4 показаны кривые фазных напряжений относительно земли на шинах ВН подстанции ТП-169 в том же промежутке времени. Видно, что в момент времени (при  $t \approx 0,036$  сек), соответствующий зажиганию дуги в месте повреждения кабеля, кривые напряжений здоровых фаз искажаются и появляются импульсные перенапряжения, которые, не превышают уровня 25 кВ. После зажигания дуги в месте повреждения, на всех трех фазах наблюдаются более медленные повышения напряжения, аналогичные тем, что возникали в месте повреждения, величиной до 17 кВ.

На рис 5, 6 показаны аналогичные кривые, полученные для случая с включенными на питающей подстанции ограничителями перенапряжений ОПН. Из рис. 5 (место ОЗЗ) видно, что, как и следовало ожидать, применение ОПН заметно снижает уровень наблюдаемых перенапряжений. При этом импульсные перенапряжения снижаются на здоровых фазах В и С приблизительно до уровня 27-28 кВ, и примерно в той же пропорции понижаются и длительно действующие перенапряжения. Анализ кривых рис.6, где приведены фазные напряжения на подстанции ТП 169, показывает, что ОПН существенно (до величин порядка 13 кВ) уменьшает импульсные перенапряжения и практически устраняет длительно действующие перенапряжения, что значительно облегчает условия работы изоляции подстанций.

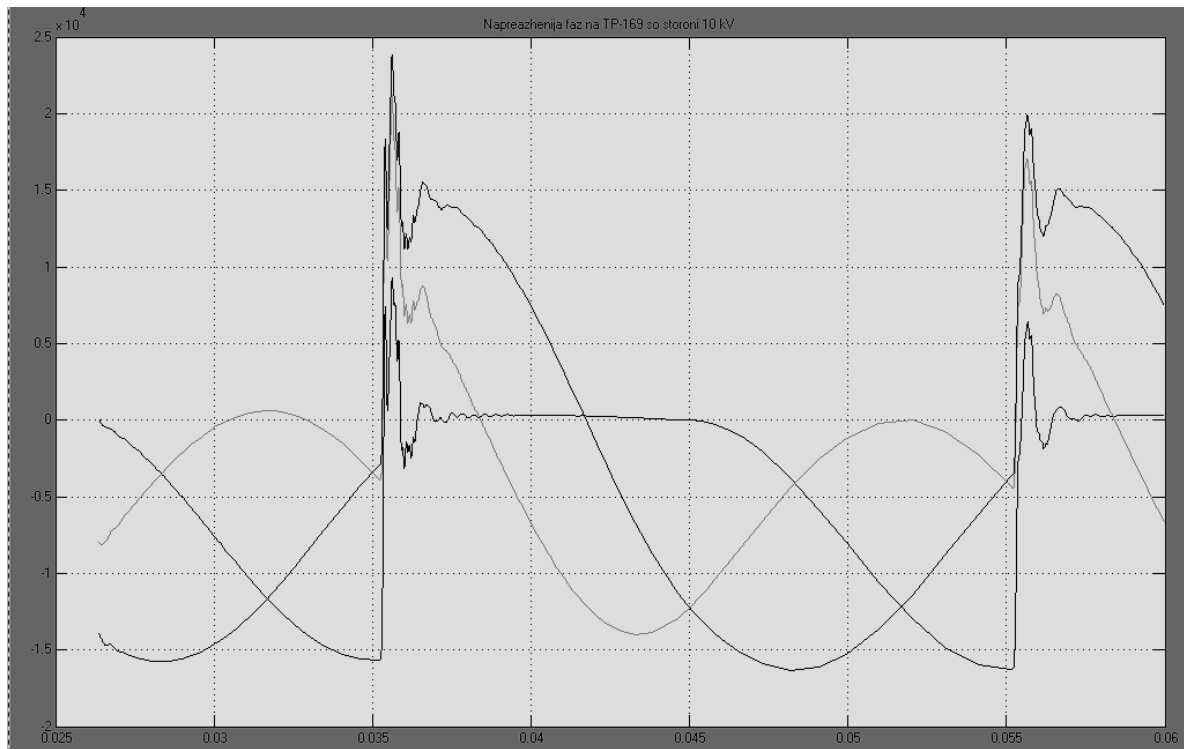
Аналогичным образом были рассчитаны величины перенапряжений и тока для второго варианта модели дуги. При этом, в общих чертах, наблюдаются те же закономерности, что и при первой модели дуги, поэтому соответствующие графики не приводятся ввиду ограниченного объема статьи. Следует, однако, отметить, что имеются и некоторые количественные отличия в величине расчетных максимальных перенапряжений, которые в случае второй модели дуги оказываются выше.



PROBLEMELE ENERGETICII REGIONALE 1(21)  
ELECTROENERGETICĂ

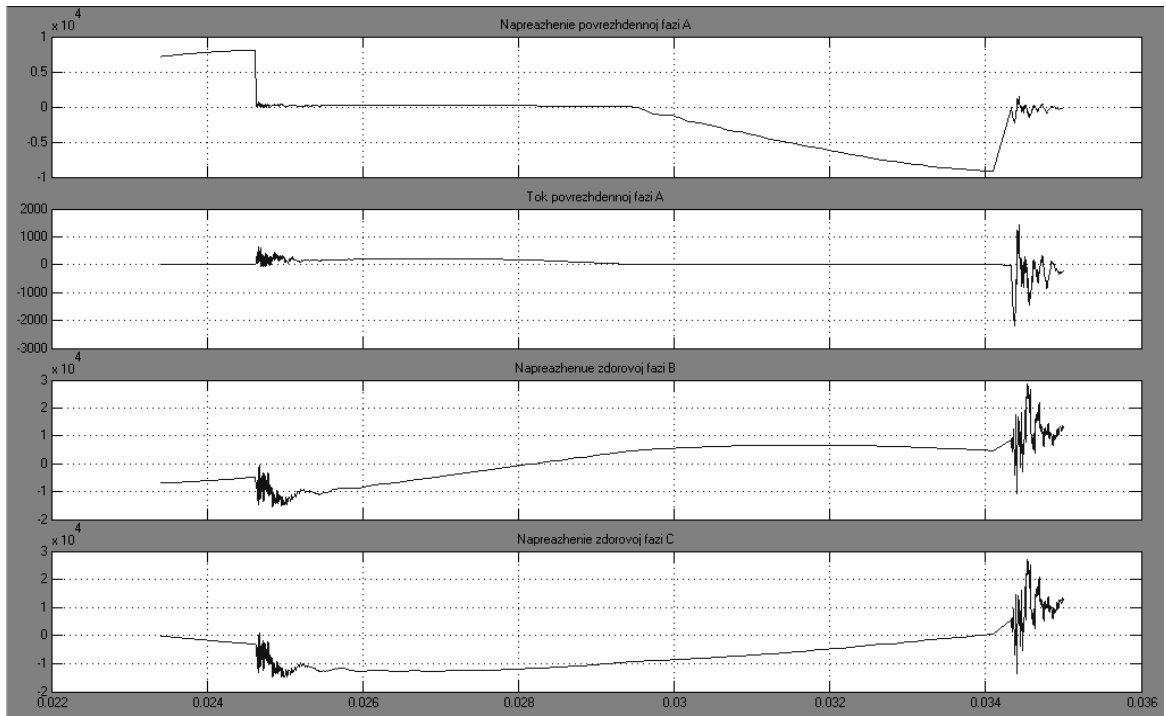


**Рис. 3.** Фазные напряжения и ток повреждения в режиме ОЗЗ на кабельной линии на выходе с ТП-194 (ОПН отключены, 1М)

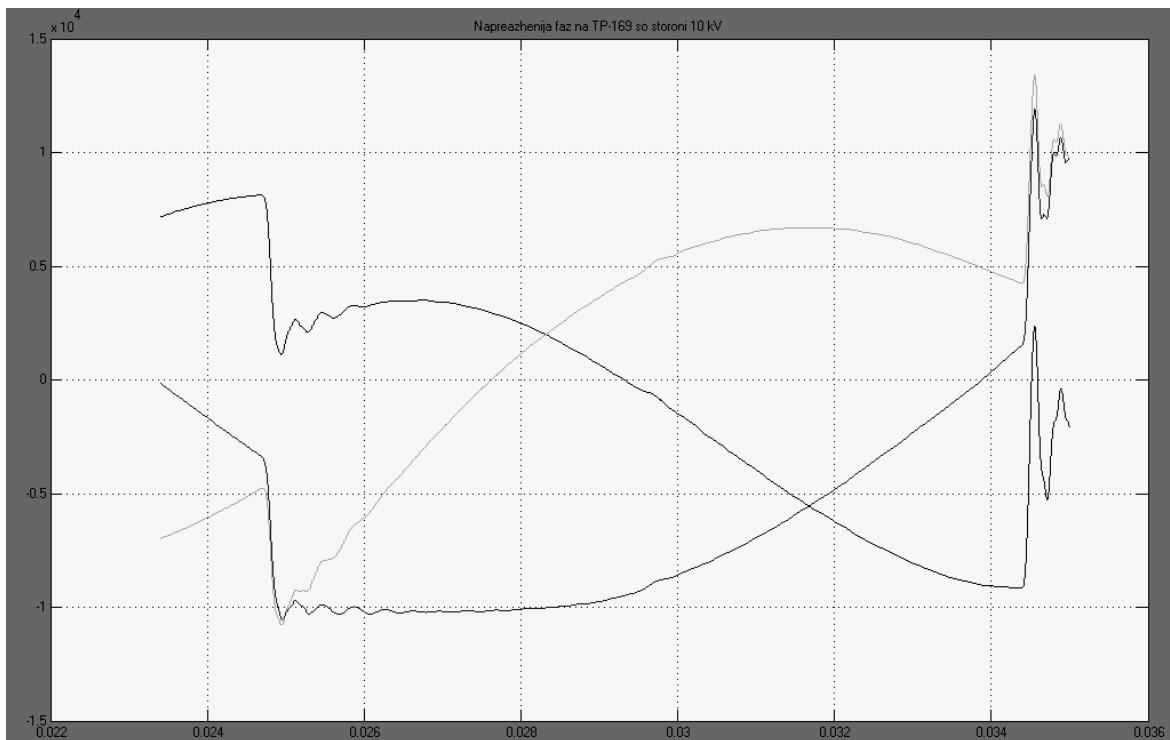


**Рис. 4.** Фазные напряжения на шинах ВН подстанции ТП-169 при ОЗЗ в сети при повторных зажиганиях перемежающейся дуги (без ОПН, 1М)

PROBLEMELE ENERGETICII REGIONALE 1(21)  
ELECTROENERGETICĂ



**Рис.5.** Фазные напряжения и ток повреждения в режиме ОЗЗ на кабельной линии на выходе с ТП-194 (ОПН в работе, 1М).



**Рис. 6.** Фазные напряжения на шинах ВН подстанции ТП-169 при ОЗЗ в сети при повторных зажиганиях перемежающейся дуги (ОПН в работе, 1М).

Максимальное амплитудное значение фазного напряжения на подстанции ТП-169 (имеющее характер очень кратковременного пика) достигается при использовании 2-ой

модели дуги и составляет при наличии ОПН порядка 15 кВ (тогда как нормальное значение составляет  $5,78 \text{ кВ} \cdot 1,41 = 8,15 \text{ кВ}$ ), что не представляет особой опасности для оборудования подстанции, в том числе и для трансформатора, конечно, при условии, что он находится в нормальном рабочем состоянии.

*Расчет и исследование режимов работы трансформатора в распределительной сети при витковом к.з. в обмотке ВН*

В связи с тем, что в рассматриваемой сети на ТП-169 было установлено существенное повреждение распределительного трансформатора типа ТМ-320 кВА, со следами многочисленных витковых замыканий средней фазы обмотки ВН, а также с перекрытием и разрушением изоляции этой обмотки, дополнительно рассмотрены режимы работы сети с учетом возникновения и развития виткового замыкания в обмотке ВН распределительного трансформатора. Для его моделирования в основную схему сети был включен дополнительно соответствующий элемент – трехобмоточный трехфазный трансформатор, в котором искусственно воспроизведено замыкание некоторой части (с возможностью изменения числа закорачиваемых витков) витков обмотки ВН через переходное сопротивление, величина которого варьировалась в диапазоне 1-10 Ом.

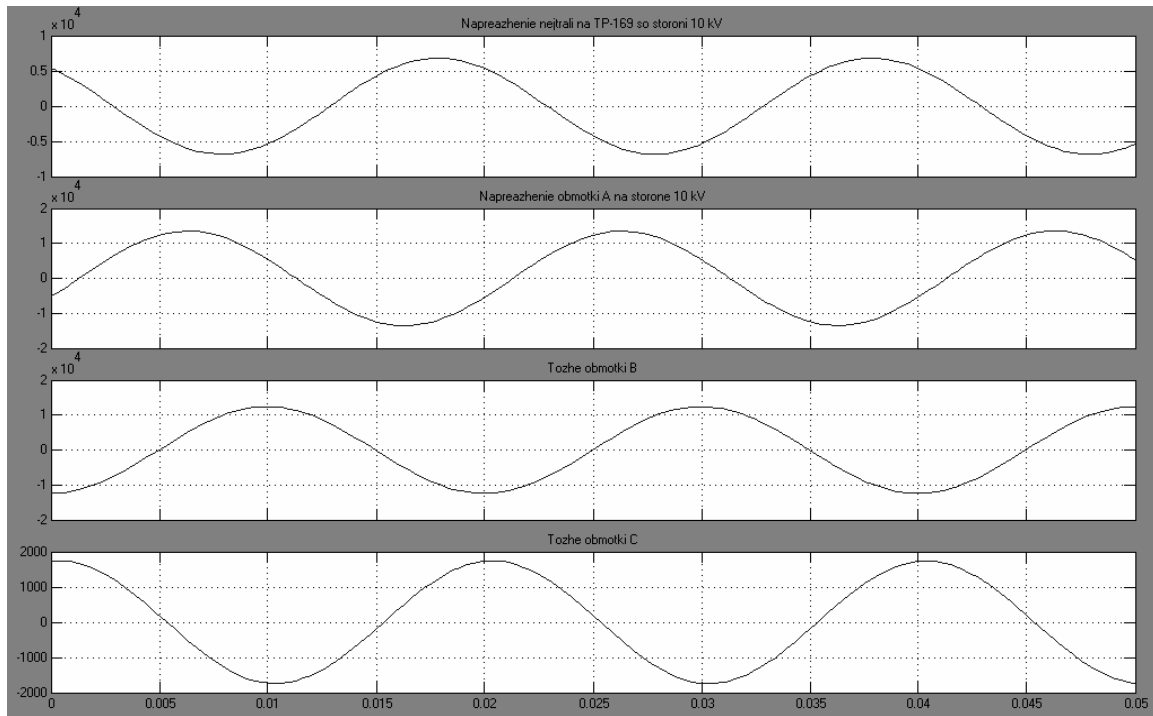
Была проведена серия расчетов, основные результаты которых представлены на рис.7, 8 (при переходном сопротивлении 1 Ом). На рис.7 показаны напряжение смещения нейтрали на стороне ВН (верхний график) и напряжения обмоток на стороне ВН трансформатора при закорачивании небольшого (около 1%) числа витков обмотки ВН. Видно, что появляющееся значительное смещение нейтрали на величину порядка фазного напряжения приводит к изменению напряжений на обмотках различных фаз (это видно из трех нижних графиков на рис.7), причем на закороченной фазе С (нижний график) напряжение сильно падает, а на оставшихся «здоровых» фазах соответственно, повышается. При этом, как следует из проведенных расчетов, фазные напряжения относительно земли на стороне ВН симметричны и имеют нормальную величину, а токи двух «здоровых» фаз также одинаковы, исключение составляет поврежденная фаза, где наблюдается небольшое увеличение тока.

Соответствующая данному режиму качественная векторная диаграмма напряжений приведена на рис. 8, где наглядно показано изменение напряжений на обмотках ВН трансформатора при витковом к.з.

Как показали проведенные расчеты, при этом в закороченной части обмотки возникает повышенный ток, зависящий от величины закороченной части и значения переходного сопротивления, что приводит к постепенному развитию аварии и разрушению изоляции. На рис. 9 приведены фазные напряжения на стороне НН, которые соответствуют напряжениям обмоток ВН, показанным на рис. 8, и имеют (за исключением поврежденной фазы) недопустимо высокие значения, в амплитуде до 500 вольт (по сравнению с нормальным амплитудным значением около 310 вольт), что уже может привести к повреждениям у потребителя. Кроме того, в поврежденной фазе С напряжение оказывается ниже нормального, что также отрицательно влияет на качество напряжения у потребителя.

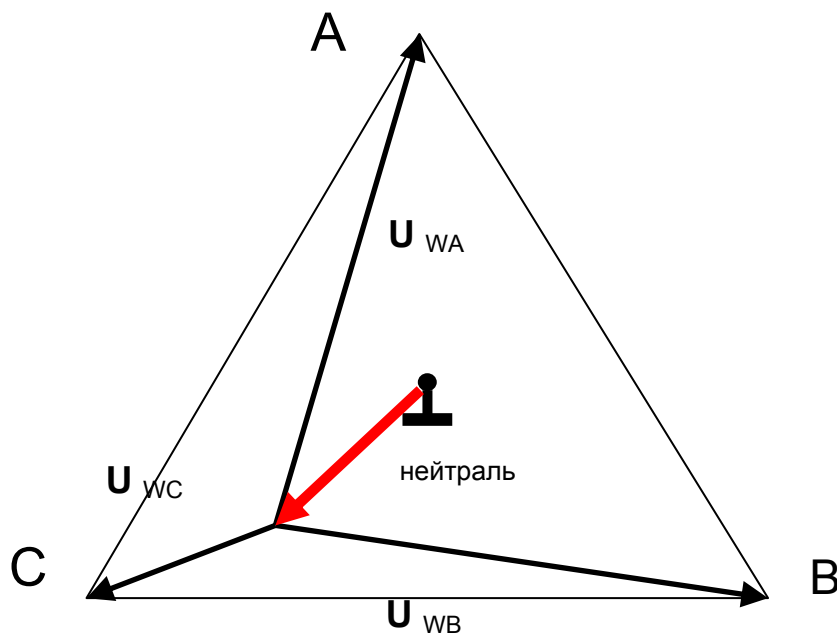
Аналогичные данные были получены при увеличенном значении переходного сопротивления в месте виткового к.з., равного 10 Ом. В данном случае эффект увеличения напряжения сверх нормального на стороне НН выражен слабее, однако тоже имеет место, что позволяет сделать вывод о том, что даже при значительном переходном сопротивлении в месте повреждения, равном 10 Ом, процесс развития повреждения заметен и может быть обнаружен в самом начале, при наличии контроля

PROBLEMELE ENERGETICII REGIONALE 1(21)  
ELECTROENERGETICĂ

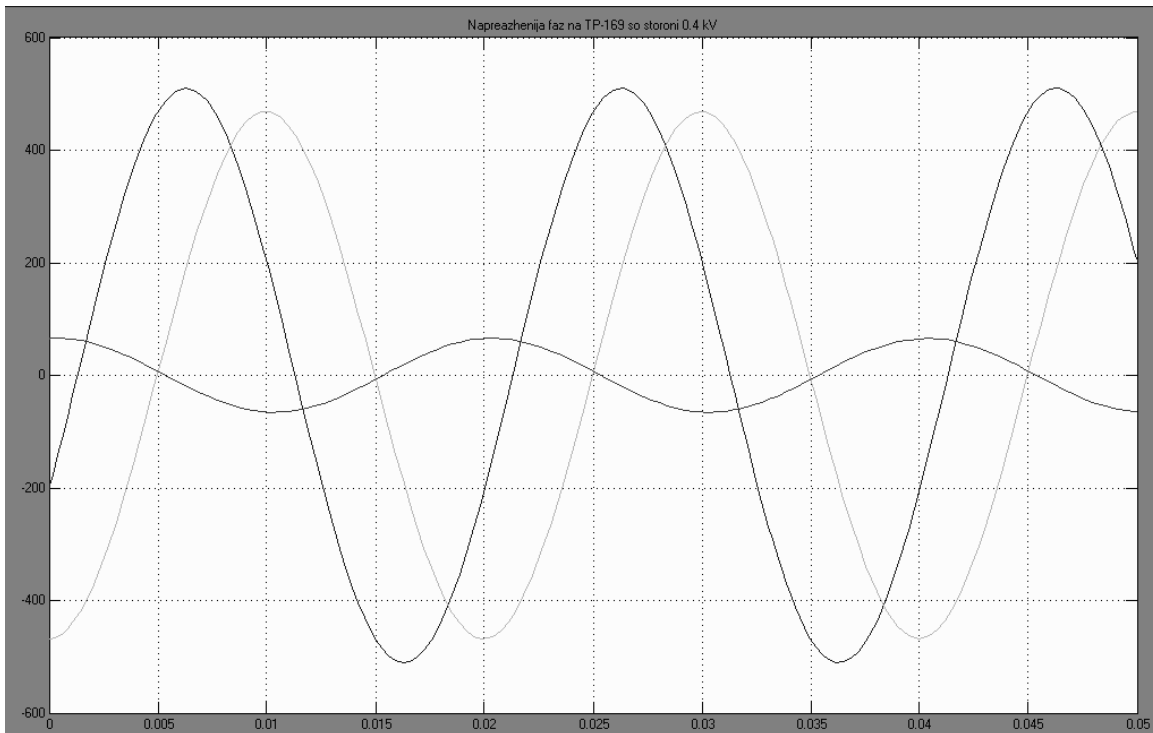


**Рис.7.** Напряжения нейтрали и обмоток на стороне ВН ПТ-169 при витковом замыкании в обмотке ВН трансформатора. (1 Ом)

величины напряжения на стороне НН трансформатора. При дальнейшем развитии процесса виткового замыкания с вовлечением большего количества витков и уменьшением переходного сопротивления, ситуация ухудшается, что в конечном итоге приводит к наличию длительного недопустимого повышения напряжения у потребителя и повреждению трансформатора.



**Рис.8.** Векторная диаграмма, иллюстрирующая изменение напряжений обмоток ВН трансформатора при смещении нейтрали



**Рис.9.** Напряжения фаз на стороне НН подстанции ПТ-169 при витковом замыкании в обмотке ВН трансформатора (1 Ом)

Следует отметить, что данное повреждение, особенно в начальном периоде своего развития, не вызывает больших токов в прилегающей сети, на которые могла бы отреагировать релейная защита и своевременно отключить поврежденный трансформатор, вследствие чего оно особенно опасно и ведет к длительным перерывам в электроснабжении потребителей.

*Расчет и исследование режимов работы трансформатора в распределительной сети при попадании напряжения с обмотки ВН на сторону НН.*

В связи с тем, что, как уже было упомянуто, были установлены существенные разрушения изоляции обмотки ВН распределительного трансформатора на ТП-169, следы перекрытий изоляции, нельзя исключить полностью возможность попадания высокого напряжения на сторону НН. Поэтому, для полноты картины, а также в связи с отсутствием в доступной литературе (за исключением, пожалуй, [16], стр.159-160) подробной информации относительно данного вида повреждения и его влияния на качество напряжения у потребителя, были также рассмотрены режимы работы сети при развитии замыкания с обмотки ВН на обмотку НН распределительного трансформатора.

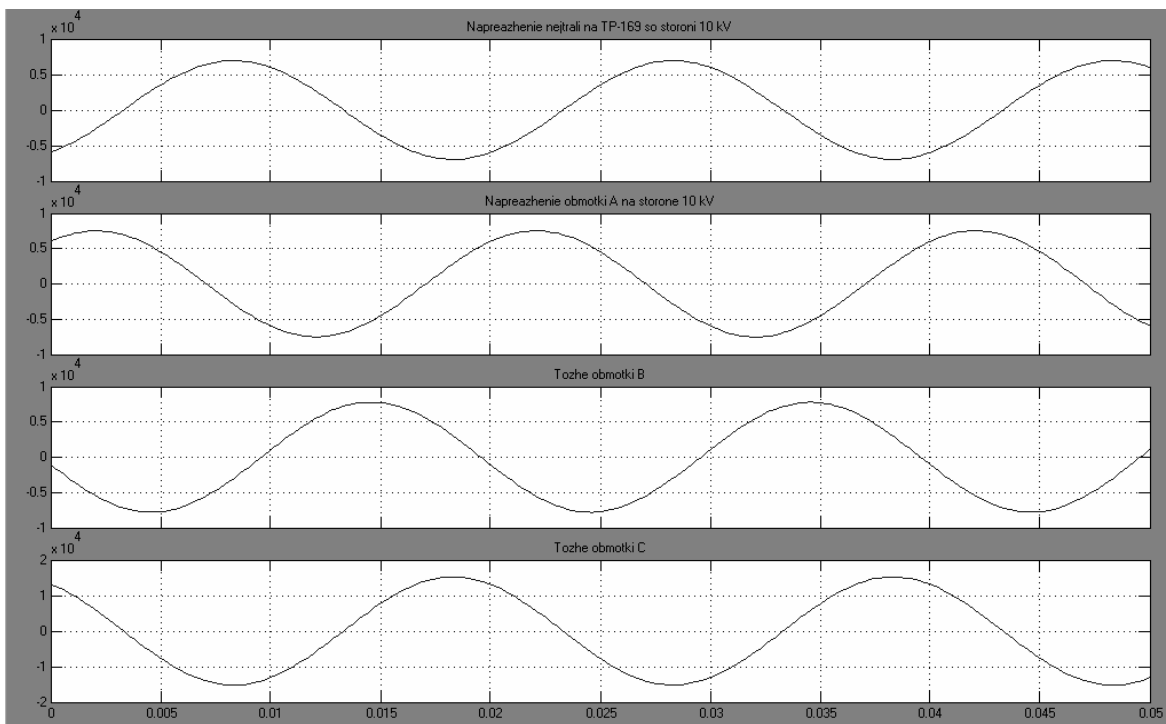
Для этого в схему распределительного трансформатора, включенного в основную схему сети, была добавлена закорачивающая перемычка, моделирующая переход высокого напряжения на сторону НН. Были проведены расчеты режимов сети при 3-х основных различных вариантах указанного повреждения:

1. переход напряжения со стороны ВН на сторону НН, не связанный с другими событиями в сети;
2. переход напряжения со стороны ВН на сторону НН, при наличии в сети металлического ОЗЗ на кабеле в той же фазе, что и закоротка на ТП-169;

3. переход напряжения со стороны ВН на сторону НН, при наличии в сети металлического ОЗЗ на кабеле в другой по отношению к закоротке, фазе.

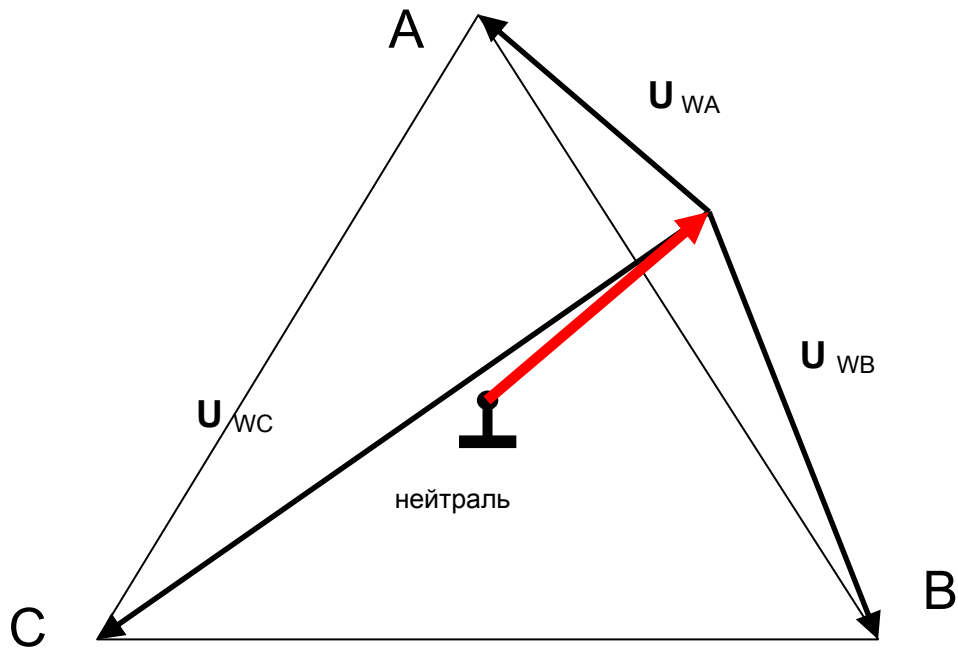
Рассмотрим первый из предложенных вариантов. На рис 10 – 12 представлены результаты проведенных расчетов при следующих дополнительно заданных условиях. С учетом информации о том, что в основном повреждения изоляции в рассматриваемом случае приходились на среднюю часть обмотки ВН трансформатора, принято, что высокое напряжение попадает на сторону НН со средней точки обмотки ВН через переходное сопротивление величиной 1 Ом.

На рис.10 показаны кривые напряжения нейтрали (верхний график) и напряжений на обмотках на стороне ВН. Видно, что имеет место существенное смещение нейтрали приблизительно на величину фазного напряжения, при этом напряжения на обмотках ВН двух неповрежденных фаз остаются на нормальном уровне,

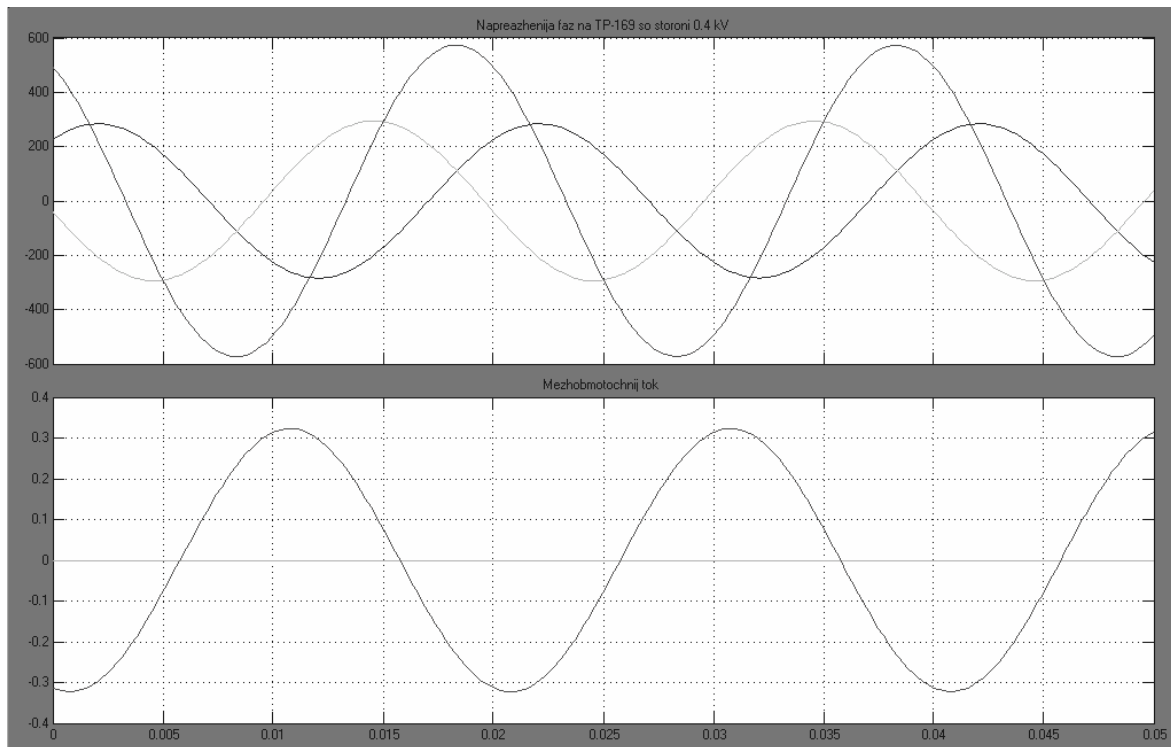


**Рис. 10.** Напряжения нейтрали и обмоток на стороне ВН подстанции ПТ-169 при межобмоточном замыкании обмоток ВН-НН трансформатора

а на обмотке поврежденной фазы С напряжение повышается приблизительно в два раза, что иллюстрируется векторной диаграммой на рис. 11, где показан треугольник линейных напряжений и напряжения обмоток на стороне ВН  $U_{WA}$ ,  $U_{WB}$ ,  $U_{WC}$ , красным цветом обозначен вектор смещения нейтрали. При этом из проведенных расчетов следует, что напряжения фаз А и В по отношению к земле имеют близкую к нормальной величину, а ток в поврежденной фазе С несколько больше, чем в двух других. На рис. 12 вверху показаны напряжения фаз на стороне НН, откуда видно, что в соответствии с рис.10, напряжение на вторичной обмотке поврежденной фазы С также значительно увеличилось, приблизительно до 600 вольт (тогда как нормальное значение составляет  $220 \cdot 1,41 = 310,2$  Вольт.) и практически в 2 раза превышает номинальное значение. Таким образом, данное повреждение приводит к недопустимому росту напряжения у потребителя.



**Рис. 11.** Упрощенная векторная диаграмма, иллюстрирующая изменение напряжений обмоток ВН трансформатора при межобмоточном к.з.



**Рис.12.** Напряжения фаз на стороне НН подстанции ПТ-169 и ток при межобмоточном замыкании обмоток ВН-НН трансформатора.

В остальных рассмотренных вариантах при наличии дополнительного металлического ОЗЗ на кабеле в общих чертах наблюдаются те же закономерности, т.е

также имеет место недопустимое повышение напряжения у потребителя на стороне НН.

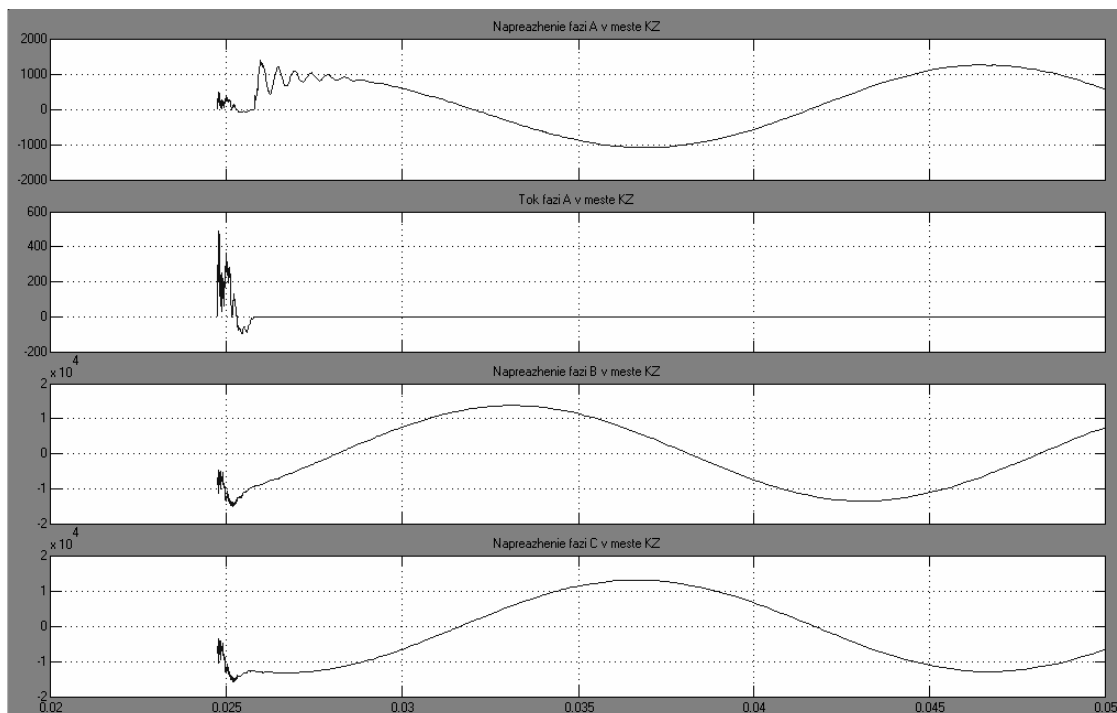
### *Включение дугогасящего реактора*

Как уже было указано (см., например, [13]), одним из наиболее распространенных средств уменьшения (компенсации) тока однофазного замыкания на землю является включение в нейтраль сети регулируемого реактора (катушки Петерсена). При настройке реактора в резонанс с емкостями сети существенно облегчается гашение дуги в месте замыкания при ОЗЗ и затрудняется ее повторное зажигание, что ограничивает вредные последствия возникновения ОЗЗ.

На рис. 13-15 приведены результаты расчетов напряжений в различных точках сети и тока ОЗЗ при замыкании на кабеле и подключенном дугогасящем реакторе, настроенном в резонанс с емкостями сети.

На верхнем графике рис. 13 показана кривая фазного напряжения в месте ОЗЗ, на втором графике – кривая тока ОЗЗ, далее - напряжения здоровых фаз. Видно, что в момент времени около 0,025 сек зажигается дуга (ток в месте к.з. не равен нулю) и имеют место высокочастотные колебания, вызванные процессами перезаряда емкостей сети через ее индуктивности.

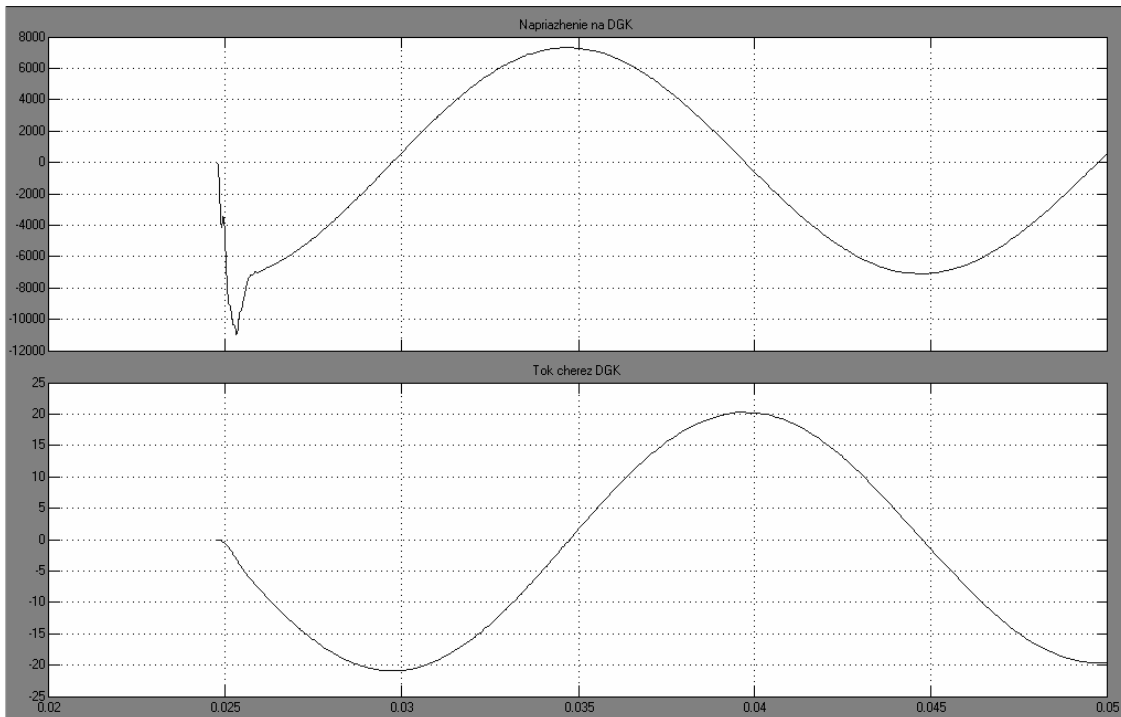
После затухания высокочастотных колебаний дуга погасает (горизонтальный участок на кривой тока) и продолжается переходный процесс перезаряда через емкостные проводимости и перехода к установившемуся режиму. При этом на поврежденной фазе напряжение пониженное (амплитудой около 1000 вольт в начальной стадии переходного процесса - см. верхний график), а на здоровых фазах наблюдаются перенапряжения до уровня 15 кВ (амплитудное значение), что почти в 2 раза превышает нормальное значение напряжения.



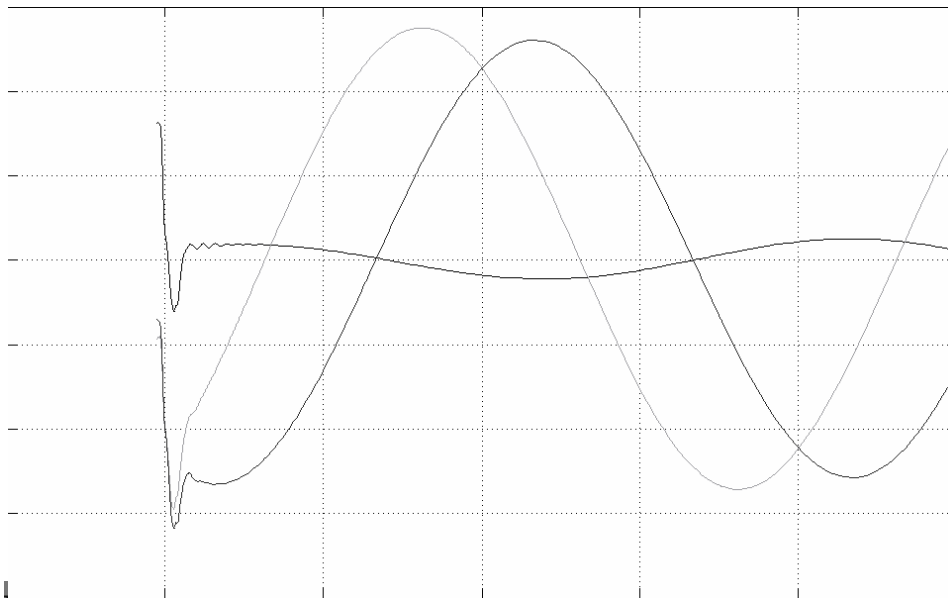
**Рис.13.** Напряжения фаз и ток ОЗЗ при замыкании на кабеле при резонансной настройке дугогасящего реактора.



На рис. 14 показано напряжение и ток дугогасящего реактора, настроенного в резонанс. Видно, что имеет место смещение нейтрали на величину, близкую к номинальному фазному напряжению, и через реактор течет индуктивный ток компенсации, соответствующий суммарной емкости сети.



**Рис. 14.** Напряжение и ток дугогасящего реактора при ОЗЗ на кабеле при резонансной настройке дугогасящего реактора.



**Рис.15.** Напряжения фаз на стороне ВН на ТП-169 при ОЗЗ на кабеле при резонансной настройке дугогасящего реактора.

При этом в сети на ТП-169 наблюдаются перенапряжения на здоровых фазах и пониженное напряжение на поврежденной фазе (см. рис. 15). Таким образом, включение настроенного в резонанс дугогасящего реактора обеспечивает быстрое

погасание дуги в месте к.з., однако не снимает проблем с перенапряжениями при ОЗЗ, которые, при необходимости, должны быть ограничены другими техническими средствами, например, ограничителями перенапряжений ОПН, которые в таких режимах, разумеется, будут испытывать повышенные нагрузки.

### **Выводы**

1. Разработана модель и проведены расчеты и анализ возникающих в кабельной распределительной сети перенапряжений с учетом перемежающейся дуги. Проведенные расчеты показали, что при ОЗЗ в рассмотренной кабельной сети 10 кВ, как при отсутствии, так и при наличии дугогасящего реактора (основная функция которого – ограничение тока в месте ОЗЗ и облегчение погасания дуги), значительные перенапряжения в сети 10 кВ возникают лишь при отсутствии ОПН.
2. Проведенные расчеты продемонстрировали, что длительные недопустимые повышения напряжения на стороне 0,4 кВ могут возникнуть в результате повреждения обмоток ВН распределительного трансформатора.
3. Расчеты режимов при наличии дугогасящего реактора подтвердили, что он выполняет свою функцию по ограничению тока ОЗЗ только при настройке в резонанс с емкостью сети. Наиболее приемлемым в этих условиях техническим решением для уменьшения последствий ОЗЗ может быть автоматическая настройка реактора.
4. Распределительные трансформаторы подвергаются неоднократному воздействию перенапряжений в сети 10 кВ в период эксплуатации, что может привести к постепенному развитию виткового к.з. в обмотке ВН, особенно в ослабленной или некачественной изоляции. Следует также отметить, что перенапряжения регулярно возникают в сети при коммутациях, грозовых процессах или ОЗЗ, но это не связано непосредственно с наличием или отсутствием дугогасящего реактора.

### **ЛИТЕРАТУРА**

- [1] Шуин В.А. Расчет перенапряжений при дуговых прерывистых замыканиях на землю. Зависимость от режима заземления нейтрали. Журнал «Новости Электротехники», №4 (58), 2009 год.
- [2] Шуин В.А. Начальные фазовые соотношения электрических величин переходного процесса при замыканиях на землю в кабельных сетях 3–10 кВ // Электричество. 1991. № 10. С. 58–61. .
- [3] Евдокунин Г.А., Гудилин С.В., Корепанов А.А. Выбор способа заземления нейтрали в сетях 6–10 кВ // Электричество. 1998. № 12. С. 8–22.
- [4] Козлов В., Петров М., Дугогасящие реакторы в сетях среднего напряжения. Компенсация емкостных токов замыкания на землю. «Новости электротехники», №2(74), 2012 год.
- [5] Bickford, J.P. Application of travelling-wave methods to the calculation of transient-fault currents and voltages in power-system networks. Generation, Transmission and Distribution, IEE Proceedings C. May 1980, vol 127 , issue 3, pp. 153 – 168.
- [6] Yu, Luke. Quick evaluation of voltage surge in electrical power systems. IEEE Transactions on Industry Applications, Mar/Apr 1995, vol. 31 , issue 2, pp. 379 – 383.

- [7] Gustavsen, Bjørn. Calculation of electromagnetic transients in transmission cables and lines taking frequency dependent effects accurately into account. IEEE Transactions on Power Delivery, Apr 1995, Vol.10, issue 2, pp. 1076 – 1084.
- [8] F.M. Gatta, A. Geri, S. Lauria, M. Maccioni. Analytical prediction of abnormal temporary overvoltages due to ground faults in MV networks. Electric Power Systems Research Volume 77, Issue 10, August 2007, Pp. 1305–1313, Roma, Italy.
- [9] Uglesic, I.; Delbianco, L.; Babic, S. Overvoltages provoked by faults in the distribution electrical network. Electrotechnical Conference, 2000. MELECON 2000. 10th Mediterranean Volume: 3, 2000 , pp. 895 – 898, IEEE Conference Publications.
- [10] И.В.Черных. Моделирование электротехнических устройств в МАТЛАБ, SimpowerSystems и Simulink. Из-во «Питер», 2008 г. , 290 стр.
- [11] Электротехнический справочник: Т3, книга 1. Производство, передача и распределение электрической энергии. М.: Энергоатомиздат, 1982- стр. 343-344.
- [12] Электротехнический справочник: Т2. М.: Энергоатомиздат, 1986- стр. 24.
- [13] Лихачев Ф.А. Замыкания на землю в сетях с изолированной нейтралью и с компенсацией емкостного тока. М.: Энергия, 1971.
- [14] 14.Технические характеристики сдвоенных токоограничивающих реакторов.
- [15] <http://forca.ru/spravka/spravka/tehnicheskie-harakteristiki-sdvoennyh-tokoogranichivayuschih-reaktorov.html>
- [16] Техника высоких напряжений. Под общей редакцией Разевига Д.В., М.: Энергия, 1976, 488 стр.
- [17] Князевский Б.А. Охрана труда в электроустановках. Издание 3, М.: Энергоатомиздат, 1983 г, 336 стр.

**Сведения об авторах:**



**Бошняга В.А.**, окончил Кишиневский Политехнический Институт в 1971 г. Защитил диссертацию на степень кандидата технических наук в Институте Электродинамики Академии наук Украины в 1988г. Ведущий научный сотрудник, область научных интересов связана с расчетами режимов электрических систем с использованием разрабатываемых моделей трансформаторных устройств. E-mail: [valeriu.bosneaga@gmail.com](mailto:valeriu.bosneaga@gmail.com)



**Постолатий В.М.**, гл.н.с., академик АН Молдовы, д.т.н. Область научных интересов: энергетические системы, управляемые линии электропередач переменного тока повышенной пропускной способности, проблемы передачи энергии, режимы энергетических систем, переходные электромеханические процессы, электрические станции, теплоэнергетика, экономика энергетики, вопросы управления энергетическим комплексом.



**Суслов В.М.**, окончил Кишиневский Политехнический Институт в 1972 г. Научный сотрудник, область научных интересов связана с электропередачами переменного тока повышенной пропускной способности, их влиянием на окружающую среду, режимами энергетических систем, переходными электромеханическими процессами, моделированием в энергетических системах.



**Клиндухов А.Н.**, окончил Одесский государственный Политехнический университет в 1995 г. с присвоением ученой степени магистра технических наук. Специалист в области эксплуатации оборудования и сетей электросетевых предприятий электроэнергетических систем, начальник производственно-технического отдела ГУП «ГК Днестрэнерго». Область научных интересов: надежность энергетических систем, режимы эксплуатации энергетических систем, переходные электромеханические процессы, моделирование в действующих энергетических системах, экономика энергетики, вопросы управления энергетическим комплексом.