

## ВЛИЯНИЕ ПЕРЕХОДНОГО СОПРОТИВЛЕНИЯ НА ПОВЕДЕНИЕ НАПРАВЛЕННЫХ ЗАЩИТ ОТ ЗАМЫКАНИЙ НА ЗЕМЛЮ В СЕТЯХ 6-35 кВ

*А.И. Шалин (ООО «ПНП БОЛИД», Новосибирск)*

### *Переходное сопротивление в месте однофазного замыкания на землю на воздушной ЛЭП и его физическая реализация*

В [1, 2] описана традиционная модель, позволяющая исследовать влияние переходного сопротивления в месте повреждения на параметры установившегося процесса ОЗЗ.

Было показано, что переходное сопротивление  $R_n$  не влияет на фазовый угол между током  $\bar{I}_0$  и напряжением  $\bar{U}_0$  нулевой последовательности как в неповреждённой, так и повреждённой линии, т.е. не искажает основных фазовых соотношений, на которые реагирует направленная токовая защита нулевой последовательности. Однако появление  $R_n$  снижает значения

$|\bar{I}_0|$  и  $|\bar{U}_0|$  и может по этой причине привести к отказу защиты в функционировании.

Описанное в [1, 2] переходное сопротивление  $R_n$  существенную роль играет лишь на воздушных ЛЭП, где применительно к компенсированным и резистивно-заземлённым сетям складывается из сопротивлений следующих основных элементов:

- заземления опоры с неисправным изолятором;
- цепи протекания «обратного» тока ОЗЗ по земле от места замыкания до нейтрали источника питания;
- заземляющего устройства на питающей подстанции.

Проведённые эксперименты показали, что при повреждении линейного изолятора суммарное значение переходного сопротивления  $R_n$  на частоте 50 Гц в некоторых случаях достигает 100-200 Ом. В основном оно носит активный характер и может оказать существенное влияние на переходные процессы ОЗЗ и снизить установившееся значение тока замыкания на землю.

При падении на землю оборвавшегося провода вместо первой указанной выше составляющей проявляются сопротивления:

- предмета, на который упал провод (слой снега, льда, упавших листьев, ветка дерева и т.д.), и через который осуществляется контакт с землёй;
- полусферы «растекания тока» в месте контакта с землёй.

Эти сопротивления сильно зависят от удельного сопротивления грунта, вида находящихся на поверхности земли предметов, на которые упал провод, погодных условий (дождь, снег), времени года и т.д.

В одном из экспериментов летом при падении провода на сухой песок отмечалось переходное сопротивление в месте ОЗЗ порядка 5-7 кОм. Зимой, при падении провода на обледеневшую землю или в сугроб значение  $R_n$  может увеличиться в несколько раз, что и подтверждалось рядом экспериментов с участием автора настоящей статьи.

Ясно, что наличие в цепи протекания токов ОЗЗ такого большого по величине переходного сопротивления может привести к отказу защиты от ОЗЗ. В [3] предлагалось совмещать защиту нулевой последовательности (например, направленную токовую) со специальной защитой от обрыва фазного провода, например, реагирующей на отношение

$\frac{I_{(2)}}{I_{(1)}}$ , где  $I_{(2)}$  - значение тока обратной последовательности в защищаемой линии;  $I_{(1)}$  - зна-

чение тока прямой последовательности. При этом каждая из разновидностей защит будет реагировать на «свою» часть повреждений. Чувствительная направленная защита нулевой последовательности обеспечит защиту воздушной ЛЭП при значениях  $R_n$  до 2-3 кОм, защита от обрывов – при больших значениях переходного сопротивления. Она же сработает, например, при обрыве «шлейфа», соединяющего между собой два пролёта воздушной ЛЭП. Обрыв шлейфа в ветреную погоду, приводящий к его кратковременным соприкосновениям с опорой (что иногда случается на практике), без такой защиты едва ли удастся быстро выявить.

### ***Влияние электрической дуги на параметры процессов при ОЗЗ***

Электрическая дуга также является своеобразным «переходным элементом» в месте ОЗЗ. Однако попытки учесть дугу в рамках описанной в [1, 2] модели во многих случаях не увенчаются успехом. Эта, используемая большинством авторов, модель не в состоянии адекватно описать, например, влияние перемежающейся дуги на те сигналы, на которые реагируют направленные защиты от ОЗЗ. Рассмотрим этот вопрос подробнее.

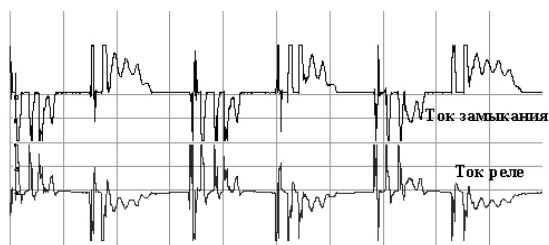
#### *Устойчивая дуга*

Горящая в месте ОЗЗ устойчивая дуга обычно является мощным источником высокочастотных составляющих в напряжении  $U_0$  и токе  $I_0$ . В [4] отмечалось, что в токе это влияние становится настолько заметным, что может привести, например, к излишнему срабатыванию защит неповреждённых линий. Для предотвращения таких срабатываний в современных устройствах защиты от ОЗЗ предусматриваются специальные гармонические фильтры.

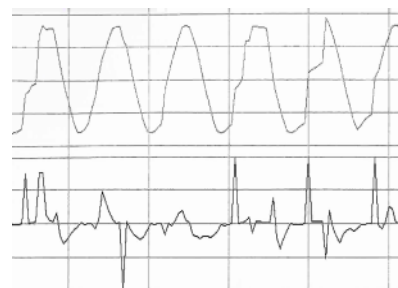
#### *Перемежающаяся дуга*

Перемежающаяся дуга может возникать при ОЗЗ как на воздушных, так и кабельных ЛЭП, но для кабельных линий она более характерна. По некоторым данным [1] до 80% замыканий на кабельных линиях сопровождается перемежающейся дугой. На воздушных ЛЭП таких замыканий в несколько раз меньше. Анализом токов при ОЗЗ, сопровождающихся перемежающейся дугой, занимался ряд авторов (например, [5, 6, 7]). Однако по ряду причин (одна из них - низкое качество осциллографической аппаратуры на период выполнения работы) эти исследования велись в основном на математических моделях, хотя и с использованием имеющихся экспериментальных данных. К тому же авторы не ставили перед собой задачи исследовать поведение направленных токовых защит нулевой последовательности при наличии перемежающейся дуги. В связи с этим в настоящее время многие вопросы, связанные с поведением таких защит при дуговых замыканиях, так и остались невыясненными.

На рис.1, показаны осциллограммы первичного и вторичного тока  $i_0(t)$ , полученных в процессе натуральных экспериментов, на рис.2 – осциллограммы напряжения  $u_0(t)$  и тока  $i_0(t)$ .



**Рис.1**



**Рис.2**

На рис.1 сверху показана кривая первичного тока в месте ОЗЗ, а внизу – вторичного тока в цепи реле, на рис.2 сверху – напряжение  $u_0(t)$ , внизу – ток  $i_0(t)$  в цепях защиты.

Из рис. 1, 2 видно, что при дуговом замыкании:

- осциллограмма напряжения  $u_0(t)$  содержит гораздо меньше высокочастотных составляющих, её проще «записать» и проанализировать;
- ток  $i_0(t)$  при ОЗЗ может на какое-то время прерываться, а затем дуга загорается вновь;
- этот ток содержит большое количество высокочастотных составляющих;
- сигналы при перемежающейся дуге могут иметь разный вид (в действительности это многообразие весьма велико).

Как отмечалось выше, в настоящее время процессы в сети при ОЗЗ, сопровождающихся перемежающимися дугами, и виды сигналов, поступающих при этом на направленную токовую защиту, недостаточно изучены. Это объясняется рядом технических причин (если не говорить о чрезвычайно скудном финансировании такого рода работ):

- многообразие разновидностей перемежающихся и прерывистых дуг (вид дуги зависит, в частности, от того, где она горит – «открытая» дуга на воздухе, «закрытая» (например, в кабеле на начальной стадии ОЗЗ), стадии процесса (особенно это заметно в кабеле), от режима заземления нейтрали сети и т.д.;
- отсутствием достаточно совершенной теории, описывающей мгновенные значения токов  $i_0(t)$  и напряжений  $u_0(t)$  нулевой последовательности при различных видах перемежающихся дуг в сетях 6-35 кВ;
- низким качеством кабельных трансформаторов тока, большим разбросом их характеристик и слабой проработанностью моделей измерительных трансформаторов и фильтров тока нулевой последовательности, а также трансформаторов напряжения, работающих в режимах перемежающихся дуговых замыканий;
- сложностью получения качественных осциллограмм токов при натуральных экспериментах с перемежающимися дугами (на рис.1 видно, что некоторые пики токовых импульсов «обрезаны» из-за невысокого качества аналого-цифрового преобразователя осциллографа);
- терминологическими трудностями (до сих пор среди специалистов нет единого мнения, какую дугу можно назвать перемежающейся и чем она отличается от прерывистой);
- отсутствием теоретической базы, позволяющей адекватно обработать полученные в эксперименте сигналы (выделить гармонические составляющие, оценить основные параметры дуги, влияющие на поведение релейной защиты) и т.д.

Многообразие алгоритмов обработки сигналов  $i_0(t)$  и  $u_0(t)$  в различных устройствах защиты и нежелание разработчиков защит давать подробную информацию по этим алгоритмам дополнительно усложняют задачу.

Тем не менее, некоторые закономерности, влияющие на работу направленных защит от ОЗЗ, можно проанализировать.

Условимся в соответствии с терминологией, предложенной в [8], перемежающимися дугами называть такие, в которых бестоковые паузы сравнительно коротки. За время паузы потенциал нейтрали не успевает снизиться до значения, близкого к нулю. При повторных пробоях возможна эскалация перенапряжений. Прерывистыми дугами будем называть такие, бестоковые паузы в которых велики, например, имеют продолжительность до 10 периодов промышленной частоты и более. К концу паузы потенциал нейтрали симметричной сети можно считать равным нулю.

При таких условиях осциллограммы, изображённые на рис.1, 2, соответствуют процессам с перемежающейся дугой. Очевидно, что представленные осциллограммы далеко не исчерпывают всего разнообразия перемежающихся дуг. Результаты описанных ниже исследований также не претендуют на широту обобщения, а являются, скорее примерами, иллюстрирующими определённые тенденции.

### Спектральный состав тока $i_0(t)$

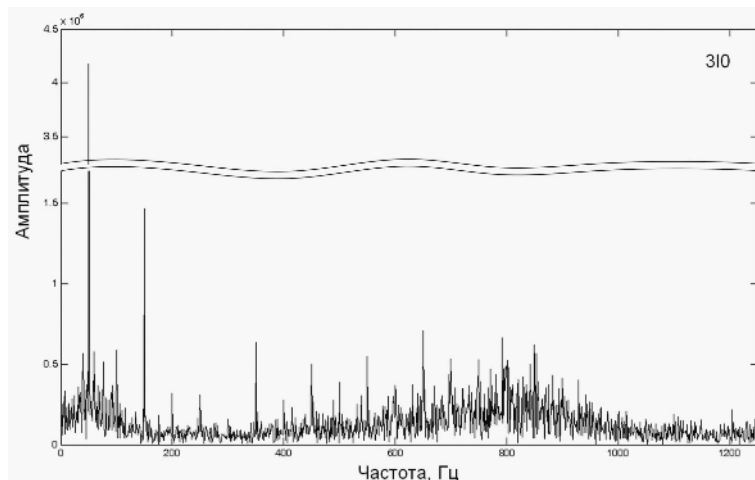


Рис.3. Спектральный состав тока нулевой последовательности в сети при ОЗЗ, сопровождающемся перемежающейся дугой

На рис.3 приведён спектральный состав тока  $i_0(t)$ , полученный магистром НГТУ Касяном В.М. в процессе обработки одного из натуральных экспериментов.

Из рисунка видны некоторые интересные особенности:

- ток  $i_0(t)$  содержит высокочастотные составляющие вплоть до 20-й гармоники и выше;
- в спектре содержится большое количество «интергармоник» (терминология автора [9]), т.е. существуют не только гармонические составляющие с частотой, кратной 50 Гц, но и с множеством промежуточных частот (практически – непрерывный спектр);
- при перемежающейся дуге в токе  $i_0(t)$  в значительном количестве присутствуют субгармоники (с частотой, меньшей 50 Гц).

Последнюю особенность необходимо учитывать при разработке гармонических фильтров, повсеместно используемых, например, в направленных токовых защитах от ОЗЗ. При выделении основной гармоники следует применять не фильтры-пробки высших частот, как это иногда делается, а полосовые фильтры.

Кроме того, наличие в сети субгармоник с частотами, лежащими в пределах 15-25 Гц, может привести к неселективной работе некоторых защит от ОЗЗ, выполненных на наложенном токе 16,7 – 25 Гц. Это, по-видимому, относится не только к защитам линий, но и, например, к защитам от ОЗЗ генераторов, если эти генераторы работают на сборные шины, гальванически соединённые с сетью, и имеют защиту от ОЗЗ с наложенным током соответствующей частоты. Возникающие при ОЗЗ синусоидальные составляющие с частотой, например, 25 Гц могут иметь произвольные углы относительно «наложенных» токов той же частоты, вызванных искусственным источником, и различные амплитуды. Наложение одних сигналов на другие, если не предпринять соответствующих мер, может привести к неселективному действию защит.

### Искажение фазовых углов между $i_0(t)$ и $u_0(t)$ в переходных режимах

Из рис. 1, 2 видно, что при перемежающейся дуге ток может прерываться и снова начинать течь по несколько раз за период промышленной частоты. Моменты «зажигания» и погасания дуги являются случайными величинами, что, в частности, и является, причиной появления в токе интергармоник.

Кроме того, в переходных процессах, связанных с зажиганием и погасанием дуги, искажаются фазовые соотношения между величинами  $i_0(t)$  и  $u_0(t)$ .

На рис.4 приведены осциллограммы напряжения  $u_0(t)$  (кривая с большей амплитудой) и тока  $i_0(t)$  в режиме дугового ОЗЗ в резистивно-заземлённой сети, полученные на модели. Осциллограммы построены для случая, когда суммарный ток через заземляющие резисторы в сети равнялся примерно 70% от ёмкостного тока. Дугогасящий реактор отсутствовал.

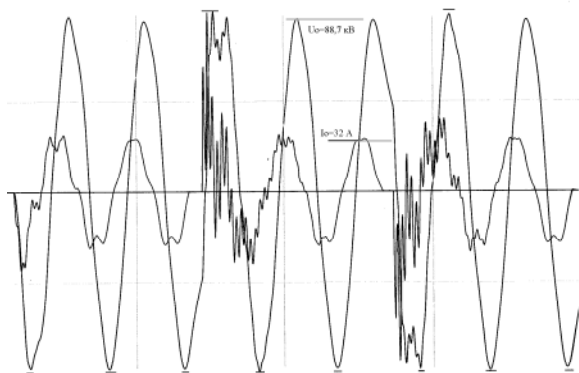


Рис.4. Напряжение и ток нулевой последовательности при металлическом «прерывистом» ОЗЗ в сети при наличии заземляющего резистора

На рис.4 видна интересная особенность процесса ОЗЗ, связанная с взаимным отношением мгновенных значений величин тока  $i_0(t)$  и напряжения  $u_0(t)$ .

Иногда при обсуждении процессов, возникающих в сети при ОЗЗ, звучит не совсем верное утверждение о том, что при отсутствии тока  $i_0(t)$  не должно быть и напряжения  $u_0(t)$ . Это справедливо перед возникновением ОЗЗ, когда сеть работает в симметричном режиме и смещение нейтрали отсутствует. В процессе же ОЗЗ это условие не выполняется.

На рис.4 видно, что «впервые» ток  $i_0(t)$  и напряжение  $u_0(t)$  действительно появляются в один и тот же момент времени (при появления замыкания на землю). В этот момент угловой сдвиг между ними отсутствует. Через некоторое время процесс стабилизируется и угол между напряжением  $u_0(t)$  и соответствующим током  $i_0(t)$  (например, измеренный по моментам перехода этих величин через ноль) становится постоянным. Если измерить фазовый угол между первыми гармониками сигналов  $i_0(t)$  и  $u_0(t)$ , то за счёт описанного выше он несколько приблизится к нулю. Степень влияния описанного эффекта на фазовый угол между входными сигналами направленной защиты от ОЗЗ будет, в частности, зависеть от длительности промежутка времени, в течение которого дуга не гасла.

Однако теперь при погасании дуги (ток на осциллограмме в течение определённого промежутка времени равен нулю) напряжение  $u_0(t)$  нулю не равно. Это и понятно: ёмкость повреждённой фазы не успевает зарядиться до фазного напряжения и нейтраль сети ещё некоторое время остаётся смещённой.

Особенно отчётливо это видно на рис.5, где приведены осциллограммы напряжений в фазах А  $U_A$  и С  $U_C$ , а также напряжения на нейтрали сети  $U_n$  в процессе отключения ОЗЗ в фазе А, полученные автором на модели для одной из реальных систем. Заземляющий резистор отсутствовал. Ёмкостный ток при ОЗЗ – порядка 19 А. Из рисунка видно, что после того, как ток в дуге прервался, и дуга погасла, напряжение  $u_n(t)$ , уменьшаясь по экспоненте, ещё длительное время продолжает существовать.

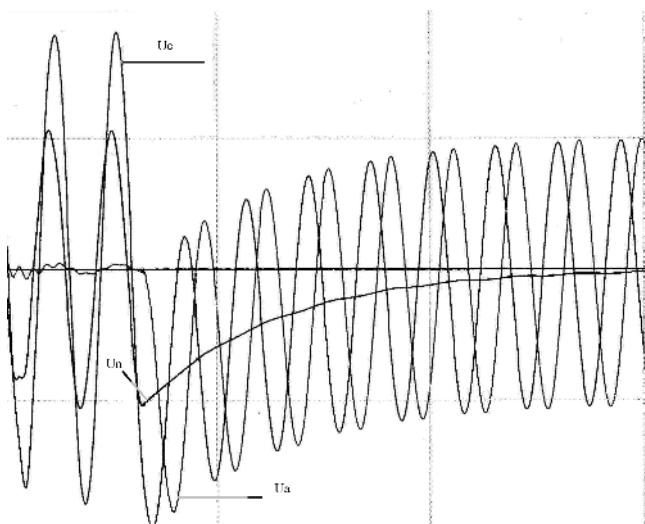


Рис.5. Осциллограммы напряжения  $u_C(t)$  в фазе С,  $u_A(t)$  в фазе А и  $u_n(t)$  - напряжение на нейтрали в процессе отключения ОЗЗ в фазе А.

Как видно, в процессе ОЗЗ напряжение на нейтрали равняется  $-e_a(t)$ , где  $e_a(t)$  - ЭДС повреждённой фазы. После отключения ОЗЗ напряжение на нейтрали  $u_n(t)$  по экспоненте приближается к нулю. Амплитуда напряжения  $u_C(t)$  в процессе ОЗЗ равна  $\sqrt{3}$

амплитуды фазного напряжения, угол между  $u_n(t)$  и  $u_c(t)$  равен 30 электрическим градусам. Высшие гармонические составляющие в напряжениях в рассматриваемом случае практически отсутствовали. После отключения ОЗЗ напряжение на нейтрали, не меняя своего знака, уменьшается по экспоненте:

$$u_n(t) = u_{\max} e^{-\frac{t}{RC}}, \quad (1)$$

где  $u_{\max}$  - напряжение на нейтрали в момент погасания дуги;  $t$  – текущее время;  $R$  – результирующее сопротивление активных утечек в сети и заземляющего резистора;  $C$  – общая трёхфазная ёмкость сети. Повторного загорания дуги после её погасания в случае, которому соответствует рис.5, не произошло.

Значения фазных напряжений после погасания дуги можно записать следующим образом:

$$\left. \begin{aligned} u_A(t) &= u_n(t) + e_A(t); \\ u_B(t) &= u_n(t) + e_B(t); \\ u_C(t) &= u_n(t) + e_C(t). \end{aligned} \right\} \quad (2)$$

Максимальные значения напряжений фаз относительно земли возникают сразу же после погасания дуги и имеют отрицательный знак.

Моменты повторного пробоя промежутка и зажигания дуги – случайны, ток при этом начинает возрастать с нуля (в сторону положительного или отрицательного полупериода), но напряжение нулевой последовательности (напряжение на нейтрали) в момент пробоя уже не равно нулю. Из рис. 4 видно, что пробои (на рисунке 4 – повторные) часто сопровождаются значительными высокочастотными составляющими токов и иногда – напряжений (токи разряда ёмкости повреждённой фазы и дозаряда ёмкостей «здоровых» фаз). Эти «свободные» высокочастотные составляющие токов играют большую роль в процессе загорания и погасания дуги.

В большинстве направленных защит от ОЗЗ в качестве входных рабочих сигналов используются составляющие 50 Гц  $i_0(t)$  и  $u_0(t)$ . Фазовый угол между этими сигналами зависит, в частности, от моментов зажигания и погасания дуги, а также от значений  $u_n(t)$  в эти моменты времени. В результате, например, в токе  $i_0(t)$  при наличии в месте ОЗЗ перемежающейся дуги имеются две основные составляющие:

- вынужденная, имеющая частоту 50 Гц;
- свободная, содержащая составляющие как минимум двух высоких частот (разряда и дозаряда фазных ёмкостей).

Поведение направленной токовой защиты от ОЗЗ определяется тем, в какой степени проявляется в выделенной в защите токовой составляющей 50 Гц сигнала  $i_0(t)$  первая из указанных выше величин. Вторую, высокочастотную составляющую, в токовом сигнале рассматриваемых защит следует считать «шумом», искажающим поведение защиты.

Аналогична ситуация с сигналом  $u_0(t)$  с той разницей, что он искажён в меньшей степени (см. рис. 1, 2).

Проведённые в НГТУ магистром Касяном В.М. исследования показали, что в процессе ОЗЗ, сопровождающегося перемежающейся дугой, фазовый угол между составляющими 50 Гц  $i_0(t)$  и  $u_0(t)$  может существенно изменяться. На рис.6 показана одна из таких зависимостей, полученная на основании результатов натурального эксперимента. По вертикальной оси здесь изображён фазовый угол между составляющими 50 Гц  $i_0(t)$  и  $u_0(t)$ , поступающими на защиту, а по горизонтальной оси - время.



Рис.6. Зависимость фазового угла от времени в процессе замыкания на землю, сопровождающегося перемежающейся дугой

Начальная часть зависимости на рис.6 соответствует «металлическому» ОЗЗ, т.е. замыканию без переходного сопротивления. При этом фазовый угол соответствует своему значению, полученному по модели, описанной в [1, 2]. Затем возникла перемежающаяся дуга, и фазовый угол стал меняться случайным образом (в соответствии со случайными

моментами зажигания и погасания дуги). Рис.6 соответствует промежутку времени чуть больше 0,2 секунды. В процессе ОЗЗ фазовый угол менялся в некоторых случаях на несколько десятков электрических градусов от своего начального значения, его математическое ожидание отклонялось в сторону более активных токов примерно на 15-20 градусов.

Аналогична зависимость амплитуды составляющей 50 Гц токового сигнала от времени. В процессе ОЗЗ амплитуда также может существенно изменяться.

Очевидно, что изучение процессов ОЗЗ, сопровождающихся перемежающейся дугой с точки зрения поведения направленных защит ещё только начинается, предстоит провести множество экспериментов и обобщить их результаты. Однако на основании имеющихся данных можно сделать следующие выводы:

- фазовый угол между составляющими 50 Гц  $i_0(t)$  и  $u_0(t)$  в процессе ОЗЗ, сопровождающегося перемежающейся дугой, может изменяться в широких пределах, что существенно усложняет задачу, поставленную перед защитой; мгновенно действующие направленные защиты, судя по результатам проведённых исследований, имеют тенденцию к неселективным срабатываниям при внешних ОЗЗ и к отказам в срабатывании при повреждениях на защищаемой линии;

- на достаточно продолжительном промежутке времени (порядка нескольких десятых долей секунды) математическое ожидание этого угла для рассмотренных случаев оставалось сравнительно постоянным и отклонялось от аналогичного значения при металлическом ОЗЗ примерно на 15-20 электрических градусов в сторону более активных токов;

- меняется во времени также и амплитуда входного токового сигнала защиты;

- для обеспечения стабильности поведения направленных защит от ОЗЗ их рабочий сигнал должен усредняться (интегрироваться) на достаточно большом промежутке времени (порядка нескольких десятых долей секунды); при этом сама защита должна выполняться с выдержкой времени;

- фазовая характеристика направленной защиты должна быть рассчитана на то, чтобы обеспечивать её селективное действие как при «металлических» ОЗЗ, так и при дуговых, сопровождающихся перемежающейся дугой.

Из описанного не следует делать вывод о принципиальной неработоспособности направленных защит в режимах с перемежающимися дугами. Если рабочие сигналы интегрировать в течение нескольких десятых долей секунды и «запоминать» факт запуска защиты на время возможной бестоковой паузы, то на основе рассматриваемого принципа вполне можно построить эффективные защиты от ОЗЗ. Это подтверждает опыт эксплуатации нескольких сотен экземпляров направленной токовой защиты от ОЗЗ, разработанной одним из авторов настоящей статьи [10], и установленной при участии обоих авторов

в некоторых энергосистемах России. Как производственные испытания с имитацией перемежающейся дуги, так и опытная эксплуатация защит дали положительные результаты.

Международный опыт эксплуатации направленных защит линий от ОЗЗ так же подтвердил их эффективность, но некоторые разновидности таких защит по признанию самих разработчиков и изготовителей ведут себя неудовлетворительно при ОЗЗ с перемежающимися дугами.

### *Литература*

1. Бухтояров В.Ф., Маврицын А.М. Защита от замыканий на землю электроустановок карьеров. М.: Недра, 1986. 184 с.
2. Шалин А.И. Замыкания на землю в сетях 6-35 кВ. Направленные защиты. Характеристики, особенности применения / Новости ЭлектроТехники, №6 (36). 2005.
3. Шалин А.И. Замыкания на землю в сетях 6-35 кВ. Направленные защиты. Пример расчёта уставок / Новости ЭлектроТехники, №4 (34). 2005.
4. Шалин А.И. Замыкания на землю в сетях 6-35 кВ. Особенности возникновения и приборы защиты / Новости ЭлектроТехники, №1 (31). 2005.
5. Вайнштейн Р.А., Головки С.И. О гармоническом составе токов нулевой последовательности в сетях с компенсацией ёмкостного тока при замыкании на землю через перемежающуюся дугу // Изв. вузов. Сер. Энергетика. – 1978. № 12. С. 14-19.
6. Фальк Ю.П. Усовершенствование защиты от замыканий на землю в сетях 6-10 кВ на основе исследования вероятностных характеристик электрических величин при перемежающихся дуговых замыканиях. Дисс. на соискание степени к.т.н. Защищена 30.05.87; Новосибирск, 1987. – 208 с.
7. Шестакова В.В. Усовершенствование защиты от замыканий на землю в сетях с компенсацией ёмкостного тока и в сетях постоянного оперативного тока. Дисс. на соискание степени к.т.н. Защищена 13.06.2000 г.; Новосибирск, 2000. – 168 с.
8. Шуин В.А., Гусенков А.В. Защиты от замыканий на землю в электрических сетях 6-10 кВ. – М.: НТФ Энергопрогресс. 104 с.
9. Жежеленко И.В. Высшие гармоники в системах электроснабжения промпредприятий. – М.: Энергоатомиздат, 2004. 259 с.
10. Патент 2157038 (Российская Федерация). Устройство для выявления присоединения с замыканием на землю в сети с изолированной нейтралью / Шалин А.И. – Оpubл. в Бюллетене № 27, 2000 г.