

УДК 621.31

## **ВЛИЯНИЕ ПЕРЕХОДНОГО СОПРОТИВЛЕНИЯ НА ПАРАМЕТРЫ АВАРИЙНОГО РЕЖИМА В РАСПРЕДЕЛИТЕЛЬНОЙ СЕТИ НАПРЯЖЕНИЕМ 6-10 КВ**

**Б.Б. Утегулов,**

*Павлодарский государственный университет*

*им. С. Торайгырова,*

**И.В. Кошкин**

*Костанайский государственный университет*

*им. А.Байтурсынова, г. Костанай*

При эксплуатации электрической сети имеют место случайные повреждения, такие как однофазные или многофазные замыкания, обрывы проводов и другие повреждения. Одной из важных задач эксплуатации электрической сети является быстрое определение места повреждения и проведение ремонтно-восстановительных работ. При большой протяженности и разветвленности распределительных сетей напряжением 10 кВ задача поиска и локализации аварийного режима может эффективно решаться только при использовании специальных технических средств, определяющих поврежденную линию, место и расстояние до повреждения.

Технические устройства для определения места повреждения (ОМП) широко используются при эксплуатации линий электропередачи всех классов напряжений. В зависимости от класса напряжения устройства поиска дефекта можно разделить на два вида: средства ОМП в сетях с большими токами замыкания на землю (110-220 кВ) и средства ОМП в сетях с малыми токами замыкания на землю (6...35 кВ).

При повреждении на контролируемой линии средства ОМП осуществляют в темпе процесса лишь функции измерения и запоминания токов и напряжений аварийного режима. Обработка результатов измерения выполняется уже после отключения линии релейной защитой.

В настоящее время в качестве устройств определения мест повреждения кабельных и воздушных линий распределительных сетей напряжением 6-35 кВ широкое распространение получают аварийные осциллографы, фиксирующие параметры аварийных режимов (ПАР) – начальные значения апериодической слагающей тока или напряжения нулевой последовательности, при одностороннем или двустороннем измерении. Используя их, можно ориентировочно определить место повреждения в линии, опираясь на кривые спада тока нулевой последовательности, либо на зависимость расстояния до места повреждения от ПАР. В соответствии с этим главной целью настоящего исследования будет аналитическое выявление зависимости ПАР (тока  $I_0m$ ) и расстояния до места повреждения ЛЭП  $x = f(I_0m)$  с учетом переходных сопротивлений в месте аварии.

Современные программные средства для моделирования режимов электрических цепей позволяют представить электрическую сеть и изменять режимы ее работы, иметь при этом возможность в режиме реального времени фиксировать изменения электрических величин.

Процесс создания модели электрической сети 6-10 кВ состоит из следующих этапов:

1. Составляется главная схема исследуемой сети. Для этого определяются число и мощности потребителей и места их присоединения к сети; длина линий электропередачи (ЛЭП); сечения проводов в линиях; напряжение системы электроснабжения; параметры нейтрали.

2. По главной схеме составляется схема замещения моделируемой системы.

3. По справочникам и каталожным данным на электрооборудование определяются параметры ЛЭП, потребителей и источника питания.

4. Схема замещения с рассчитанными значениями переносится в программную среду моделирования.

Модель энергосистемы в программной среде может быть использована для исследования значений электрических величин в рабочих и ненормальных режимах. В ней можно наглядно представить переходные процессы в системе, изменения значений напряжений и токов при изменении емкостей и индуктивностей системы, параметров нейтрали и т.д [2].

Компьютерная модель сети, отображенная на рисунке 1, представлена радиальной конфигурацией ВЛ-10 кВ протяженностью 10 км, выполненной проводом марки АС-95, питающей потребитель мощностью  $P_{нагр} = 800$  кВт с коэффициентом  $\cos\varphi = 0,85$ . Параметры модели будем считать распределенными по всей длине линии, т.е. каждому её участку с бесконечно малой протяженностью  $dx$  соответствуют конкретные значения активных, индуктивных и ёмкостных параметров.

Были рассчитаны параметры схемы замещения рисунка 1. Удельное активное сопротивление  $r_0$  вычислили по выражению 1:

$$r_0 = \frac{1}{\gamma \cdot F}, \quad (1)$$

где  $\gamma$  – удельная электрическая проводимость провода, км/Ом мм<sup>2</sup>;

$F$  – номинальное сечение провода, мм<sup>2</sup>.

Получили 
$$r_0 = \frac{1}{32 \cdot 95} = 0,329 \text{ Ом/км}$$

Активное сопротивление  $r/4$  продольной ветви определяется по выражению 2:

$$\frac{r}{4} = \frac{r_0 \cdot l}{4}, \quad (2)$$

где  $l$  – длина линии, км.

$$\frac{r}{4} = \frac{0,329 \cdot 10}{4} = 0,8225 \text{ Ом}$$

При расположении проводов на опорах 10 кВ треугольником примем расстояния между ними равными  $D_{12} = D_{23} = D_{13} = 80$  мм. Среднее геометрическое расстояние между проводами  $D_{cp}$  составит:

$$D_{cp} = \sqrt{D_{12} \cdot D_{23} \cdot D_{13}}, \quad (3)$$

$$D_{cp} = \sqrt{80 \cdot 80 \cdot 80} = 715.54 \text{ мм}$$

Удельное индуктивное сопротивление  $x_0$  определили по формуле:

$$x_0 = 0,145 \cdot \lg \frac{2 \cdot D_{cp}}{d} + 0,016, \quad (4)$$

где  $d$  – расчётный диаметр провода, мм<sup>2</sup>.

$$\text{Получим } x_0 = 0,145 \cdot \lg \frac{2 \cdot 715,54}{13,5} + 0,016 = 0,310 \text{ Ом/км.}$$

Аналогично по выражениям определяются индуктивное сопротивление  $x/4$  схемы замещения, значения рабочей ёмкости  $c/4$  схемы замещения и ёмкостной проводимости:

$$\frac{x}{4} = \frac{0,31 \cdot 10}{4} = 0,775 \text{ Ом.}$$

$$\frac{c}{4} = \frac{0,01185 \cdot 10}{4} = 0,0296 \text{ мкФ.}$$

$$\frac{b_c}{4} = 314 \cdot 0,0296 = 9,294 \text{ мкСм}$$

Значение активной проводимости  $g/4$ , учитывающее утечку через линейную изоляцию, условно примем равной 10 МОм.

Компонуем по расчётным значениям элементов схемы физическую модель сети 10 кВ.

Данная модель реализует собой выполнение следующих режимов работы сети:

1. режим нормальной нагрузки потребителя;
2. режим однофазного металлического замыкания (ОЗЗ) на землю;
3. режим ОЗЗ дуговое;
4. режим ОЗЗ через большое переходное сопротивление;
5. режим двойного замыкания на землю при аварии на двух соседних фазах;
6. режим двойного замыкания на землю при аварии на одной фазе в двух местах.

При моделировании данных режимов необходимо изменять режимы нейтрали электрической сети – нейтраль замкнута через катушку или через активное металлическое сопротивление (режим компенсированной и резистивно-заземленной нейтрали) и изолирована от земли (режим с изолированной нейтралью). Режим 1 (режим нормальной нагрузки) реализуется включением схемы без коммутации замыкающих цепей. Схема состоит из осциллографов, вольтметров, амперметров, сопротивления и ёмкости ветвей, нагрузки. В ветвях протекают токи, соответствующие токам в реальной сети при заданной нагрузке потребителя. В этом режиме наблюдаются рабочие значения токов, переходные процессы при коммутации приемников электроэнергии.

Режим 2 (ОЗЗ на землю) реализуется в модели добавлением замыкающей ветви с одной из фаз на землю с установленными в ней последовательно коммутирующим устройством и резистором с небольшим сопротивлением (5-10 Ом). Сначала цепь запускается в режиме 1, а в процессе работы коммутирующим устройством производится замыкание фазы на землю.

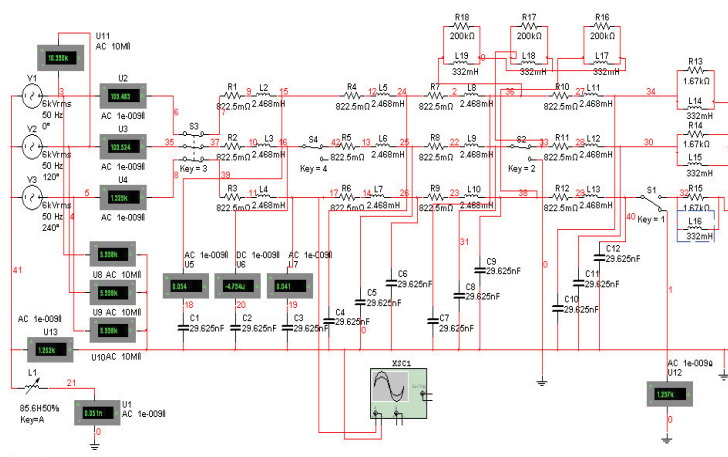


Рисунок 1 - Схема замещения электрической сети напряжением 6-10 кВ

Режимы 3 (ОЗЗ дуговое) и 4 (ОЗЗ через большое переходное сопротивление) производятся аналогично режиму 2, исключая значение сопротивления короткого замыкания (в режиме 3 сопротивление следует принимать порядка 0,5 Ом, в режиме 4 - 40 Ом и более).

Режим 5, двойное двухфазное замыкание на землю. Взяв за основу, как и в вышеописанных режимах, схему режима нормальной нагрузки, выбираем место замыкания и добавляем на две фазы замыкающие ветви с выключателями и сопротивлениями, затем имитируем замыкания выключателями.

При моделировании режима 6 (двойное однофазное замыкание на землю) на одну фазу добавляются две замыкающих цепи.

Исследуем изменение фазных токов и токов нулевой последовательности при бездуговых ОЗЗ и Кдв, металлических ОЗЗ и Кдв и дуговом ОЗЗ с частотой  $f = 20$  Гц. Снятие осциллограмм производится отдельно для ОЗЗ фазы С на расстоянии  $l \approx 2,5$  км от источника питания ИП через переходное сопротивление  $Z_{п1}$  и последующего двойного замыкания на землю (сначала происходит ОЗЗ фазы С на расстоянии 2,5 км от ИП, затем происходит замыкание на землю фазы В на расстоянии  $l \approx 7,5$  км через  $Z_{п2}$ ).

Определим индуктивность ДГР, исходя из параметра ёмкости, рассчитанного выше. Режим резонанса токов возникает, когда проводимость ДГР  $b_{Lp}$  и ёмкостная проводимость  $b_C$  равны:

$$b_{Lp} = b_C, \tag{5}$$

$$\frac{1}{\omega \cdot L_p} = \omega \cdot C, \tag{6}$$

где  $L_p$  – индуктивность реактора, Гн;

$\omega$  – угловая частота тока, рад/с

откуда

$$L_p = \frac{1}{\omega^2 \cdot C}, \tag{7}$$

$$L_p = \frac{1}{314^2 \cdot 0,1185 \cdot 10^{-6}} = 85,6 \text{ Гн} \quad (8)$$

Исследуя влияние параметров трёх аварийных режимов (бездуговых ОЗЗ, двойных КЗ и дуговых ОЗЗ), выяснили при этом ориентировочные границы переходных сопротивлений и частоты коммутации петли ОЗЗ, которая в модели представляет собой фактическую частоту колебаний между индуктивными и ёмкостными параметрами сети.

Анализ осциллограмм изменения тока  $I_0$  при металлическом ОЗЗ и Кдв (рисунок 2 и рисунок 3) показывает, что в случае металлического ОЗЗ ток нулевой последовательности  $I_0 = 524 \text{ мА}$ , что объясняется достоверной настройкой ДГР, однако при Кдв (закрывается ключ S1, затем дополнительный S2) значение  $I_0 = 1330 \text{ мА}$ , хотя в действительности должно составлять несколько десятков ампер.

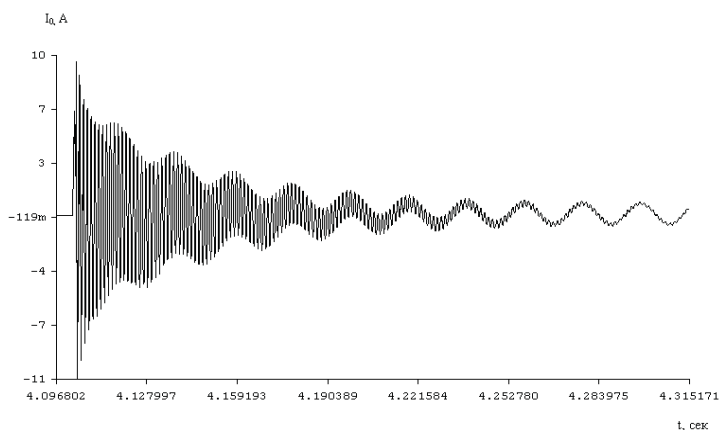


Рисунок 2 - Осциллограмма тока нулевой последовательности при металлическом замыкании на землю фазы С

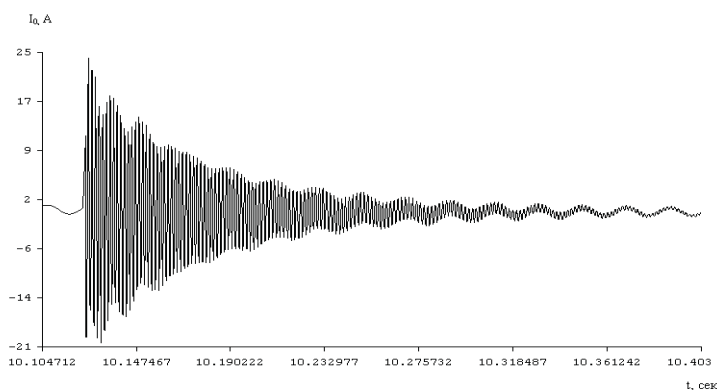


Рисунок 3 - Осциллограмма тока нулевой последовательности при двойном металлическом замыкании на землю

Бездуговые ОЗЗ и Кдв, происходят через переходные сопротивления  $Z_{п1}$  и  $Z_{п2}$ . В случае ОЗЗ фазы С (замкнулся ключ S1) через переходное сопротивление  $Z_{п1} = 39 \text{ Ом}$

ток  $I_{ф.С}$  составляет несколько сот мА, при Кдв (замкнулся дополнительный ключ S2) через переходные сопротивления  $Z_{п1} = 39 \text{ Ом}$ ,  $Z_{п2} = 40 \text{ Ом}$ .

Дуговые однофазные и двойные короткие замыкания на землю.

Спецификой такого рода повреждений является то обстоятельство, что в месте замыкания фазы имеется нелинейное переходное сопротивление в виде дуги, которое зависит от мощности источника питания и от частоты качаний между индуктивностью и ёмкостью сети. Однозначно определить комплексное сопротивление дуги при анализе ПАР с практической точки зрения задача трудная; здесь не удаётся учесть влияние таких факторов, как влажность грунта, длина дуги и пр., которые также определяют её сопротивление [1].

Повторно-кратковременные дуговые замыкания на землю, существующие длительное время, с повышением частоты коммутации ключа S1 от 5 до 20 Гц приводят к увеличению амплитуд  $I_0$  при переходном процессе, являющихся причиной повышения кратности перенапряжений ( $k = 3 \dots 5$ ). Из соображений наглядности осциллограмм нами были рассмотрены дуговые замыкания на низких частотах, однако в действительности в сети происходят колебания между электрическим и магнитным полями на более высоких частотах порядка 200-500 Гц. Результаты моделирования свидетельствуют о том, что уже на низких частотах (20-80 Гц) появляются гармоники высших порядков, наличие которых ускоряет процесс старения изоляции электрооборудования.

Исследуем, как изменяются значения  $I_0$  при дуговых замыканиях на землю с различной частотой коммутации петли ОЗЗ. В нашей модели перемежающаяся дуга представлена в виде ВЧ-генератора, сигнал с которого подаётся на катушку электромагнита постоянного тока, причём контакты последнего периодически закорачивают и раскорачивают петлю ОЗЗ, имитируя этим повторные зажигания и гашения дуги.

Дуговые ОЗЗ, особенно на высокой частоте, часто приводят к пробое линейной изоляции неповреждённых фаз, особенно в местах её ослабления или повышенного старения. Это и приводит к двойным коротким замыканиям на землю. Рассмотрен такой случай (рисунки 4 и 5), когда при имеющемся дуговом замыкании фазы С с частотой 20 Гц происходит пробой изоляции фазы В. Опыт показывает, что значение  $I_0$  как до, так и после Кдв не превышает 25 А.

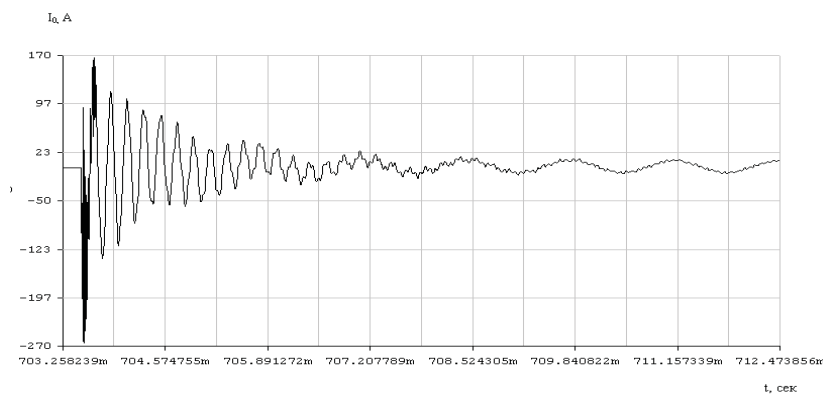


Рисунок 4 - Осциллограмма тока нулевой последовательности при дуговом ОЗЗ с частотой  $f = 20 \text{ Гц}$

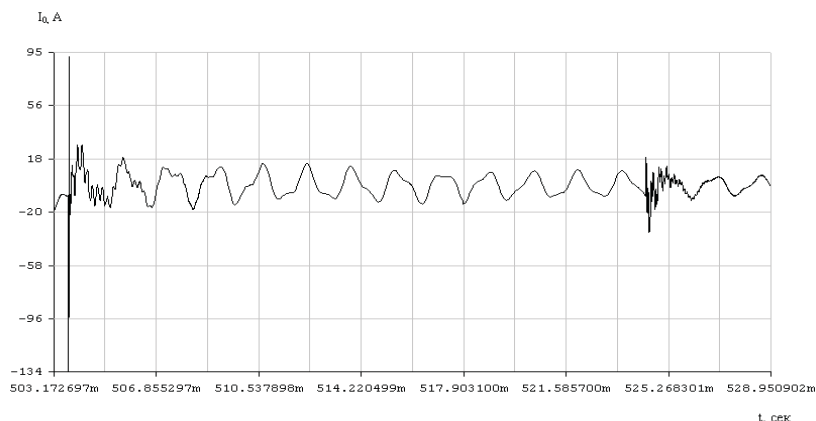


Рисунок 5 - Осциллограмма тока нулевой последовательности при двойном замыкании на землю при имеющемся дуговом ОЗЗ фазы С с частотой  $f = 20$  Гц

В результате моделирования различных аварийных режимов нами наблюдается снижение  $I_0$  при возрастании значений  $Z_{п}$  (при бездуговом металлическом ОЗЗ  $I_0 = 524$  мА, при ОЗЗ через переходное сопротивление  $Z_{п1} = 39$  Ом  $I_0 = 489$  мА) и при возрастании частоты коммутации петли ОЗЗ (при дуговом ОЗЗ с частотой  $f = 20$  Гц  $I_0 = 8,78$  А; на частоте  $f = 25$  Гц  $I_0 = 59,0$  А). Для Кдв наблюдается аналогичная зависимость изменения  $I_0$ . Так, при металлическом Кдв  $I_0 = 1330$  мА, при Кдв через переходные сопротивления  $Z_{п1} = 39$  Ом,  $Z_{п2} = 40$  Ом  $I_0 = 984$  мА, при дуговом замыкании фазы С с частотой  $f = 20$  Гц и последующем замыкании фазы В  $I_0 = 8,44$  А.

Используя физическую модель ВЛ-10 кВ, построим кривые спада тока  $I_0$  по всей длине линии, опираясь на значения  $I_{0m}$  при экспериментах ОЗЗ на расстоянии 2,5 км, 5 км, 7,5 км и 10 км от источника питания.

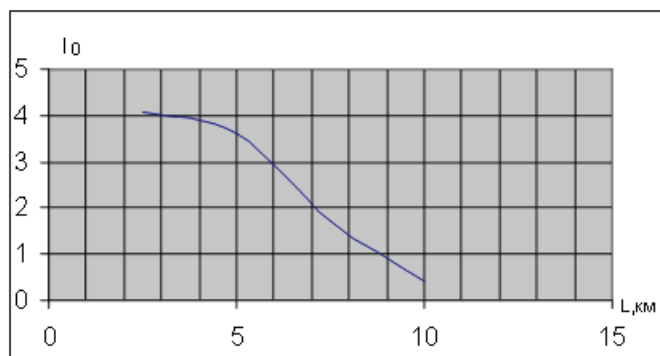


Рисунок 6 - Зависимость тока нулевой последовательности  $I_0$  по длине ВЛ-10 кВ при ОЗЗ ( $Z_{п} = 50$  Ом)

Для установления аналитической зависимости  $x = f(I_{0m})$  необходимо решить систему телеграфных уравнений, описывающих распространение волн тока и напряжения по проводам неоднородной линии с распределёнными параметрами.

ЛИТЕРАТУРА

1. Шалыт Г.М. Определение мест повреждения в электрических сетях. [текст]/ Шалыт Г.М. -М.: Энергоиздат, 1982. – С 310.
2. Идельчик В.И. Электрические сети и системы. [текст]/ Идельчик В.И. -М.: Энергоатомиздат, 1989. – С 592.

***Түйіндеме***

*6-10 кВ апаттық тәртіптердің еліктеуіне арналған үлгі бөліп тұратындарды ауларда таңдаумен және нақтылы параметрлерінің күйге келтіруімен көрсетілген. Жұмыс мақсаты 6-10 кВ торапта мүмкін апаттық жағдайлардың талдауы келеді ау лабораториялық үлгілері анықтама мақсатымен апат орындары көрсетілген.*

***Resume***

*A model to simulate the emergency operation in distribution networks 6-10 kV with a choice and configuration of specific network settings. The objectives of the work are the analysis of possible emergency situations in the 6-10 kV networks in a laboratory model of the network to determine the place of the accident.*