

ОБ ОГРАНИЧЕННОСТИ ТЕОРИИ ПЕТЕРСЕНА ДЛЯ ИССЛЕДОВАНИЯ ДУГОВЫХ ПЕРЕНАПРЯЖЕНИЙ В ГОРОДСКИХ ЭЛЕКТРИЧЕСКИХ СЕТЯХ 6-10 КВ

А.Х. Мусин, А.И. Козлов, Е.С. Никитина, В.С. Степаков

Городские электрические сети 6-10 кВ выполняются в основном кабельными. Для поддержания этих сетей в работоспособном состоянии осуществляется комплекс мероприятий, основным из которых является их техническое обслуживание.

Существующая в настоящее время технология технического обслуживания базируется на периодическом проведении плановых профилактических работ и является системой обслуживания по времени наработки (календарному принципу). В соответствии с установленными нормами каждая кабельная линия должна быть выведена через заданные промежутки времени (обычно один год), из работы и подвергнута испытаниям повышенным напряжением. Линии, выдержавшие испытания, включаются в дальнейшую работу, не выдержавшие – отбраковываются. Причем выбор линии для испытаний осуществляется без учета ее фактического состояния. Такая технология имеет много недостатков и уже не может считаться удовлетворительной по следующим причинам.

Во-первых, она высокзатратна. Затраты на техническое обслуживание городских систем электроснабжения составляют около 70% от эксплуатационных расходов, что очень много.

Во-вторых, она малоэффективна. Из практики известно, что относительная частота выявления дефектов составляет только 2 – 5%.

В-третьих, существующая технология устарела морально и практически исчерпала свои потенциальные возможности.

С развитием науки создаются новые более совершенные способы диагностики состояния изоляции кабельных линий. Одним из таких способов является способ технического обслуживания высоковольтных кабельных линий по

реальной потребности, предложенный в патенте на изобретение № 2125271 [1].

Предлагаемый способ диагностики изоляции под рабочим напряжением основан на наложении на диагностируемую сеть зондирующих электрических сигналов от специального автономного источника - параметрического генератора (ПГ), включенного между нейтральной точкой сети и землей. Измеряя параметры зондирующих электрических сигналов можно осуществить диагностику по одному из диагностических параметров: току утечки или сопротивлению изоляции.

При замене существующих методов технического обслуживания кабельных линий (по календарному принципу) на более эффективные (по реальной потребности) необходимость в обслуживании и ремонте будет определяться исходя из действительного состояния объекта.

Но, с переходом к новому способу обслуживания, возникает задача, связанная с неизученностью вопроса о возможных негативных влияниях на параметрический генератор ненормальных режимов, возникающих в кабельных электрических сетях. В связи с чем, необходимо:

- во-первых, подробно изучить процессы возникновения дуговых перенапряжений;
- во-вторых, выяснить их влияние на параметрический генератор;
- в-третьих, обеспечить безопасную работу нового оборудования.

Процессы возникновения дуговых перенапряжений исследовались различными авторами. На сегодняшний день существуют три теории возникновения дуговых перенапряжений, обозначаемые фамилиями их авторов: теория Петерсена, теория Петерса и Слепяна, теория Белякова. В основе каждой теории лежат различные допущения, идеализирующие дуговой процесс. Обоснованность этих допущений требует подтверждения. С этой целью нами произведено компьютерное моделирование процесса возникновения дуговых

перенапряжений. В результате которого получена новая информация об особенностях изучаемого процесса.

В данной статье исследуется обоснованность допущений по теории Петерсена.

Согласно теории Петерсена [2], погасание дуги в месте повреждения кабеля происходит при первом прохождении через нуль тока высокочастотных колебаний (свободной составляющей) и дуга вновь зажигается через полпериода в момент максимума напряжения на поврежденной фазе. Это предположение основано на том, что электрическая прочность дугового промежутка непосредственно после прохождения тока дуги через нуль становится больше высокочастотного максимума восстанавливающегося напряжения.

С использованием компьютерной программы Electronics Workbench, нами смоделирована реально существующая кабельная сеть с номинальным напряжением 6 кВ (фазное напряжение 3,5 кВ). Также учтено продольное сопротивление каждой жилы кабеля. Замыкание одной из фаз на землю осуществлялось с помощью специального ключа, управляемого логической схемой.

При исследовании процесса дугового перенапряжения варьировался момент повреждения на синусоиде напряжения фазы А электрической сети. В результате чего были получены осциллограммы, наиболее важные из которых представлены ниже. На рис. 1 представлена осциллограмма напряжения U_A в фазе А, и осциллограмма тока в дуге I_d (I_{33}) при замыкании на землю.

Замыкание произошло в момент, соответствующий 45° относительно начала положительной полуволны напряжения фазы А. Из графика видно, что горение

дуги, согласно теории Петерсена, прекратилось с переходом через нуль тока высокочастотной составляющей.

По теории Петерсена, максимальные перенапряжения и смещение нейтрали растут от полупериода к полупериоду, но темп роста постепенно замедляется. Это объясняется тем, что параллельно с накоплением зарядов на емкостях после каждого погасания дуги происходит стекание зарядов в землю за время горения дуги. Эти два противоположных процесса должны привести к тому, что рост перенапряжений прекратится.

В результате изучения осциллограмм переходных процессов было обнаружено, что с перемещением момента замыкания фазы на землю к началу полуволны, теория Петерсена не предусматривает случай представленный на рис. 2. Из рис. 2 видно, что если пробой произойдет в начале полуволны напряжения фазы А U_A (возможен при механическом повреждении фазы), то высокочастотная составляющая тока дуги оказывается значительно меньше составляющей промышленной частоты. Кривая полного тока дуги I_{33} оказывается смещенной относительно оси времени в область положительных значений. В результате дуга будет гореть до перехода через нуль тока промышленной частоты, а не тока высокочастотной составляющей, как предполагает Петерсен. Интервал, на котором не выполняется допущение Петерсена, определяется ёмкостью между фазой электрической сети и землёй и сопротивлением дуги R_d (см. табл. 1).

Ёмкость между фазой и землёй определяется протяженностью кабельной сети. Сопротивление дуги R_d может изменяться в широких пределах в зависимости от случайных факторов в месте замыкания: удельной проводимости грунта, площади соприкосновения провода с землей, влажности породы и т. д. [3].

ОБ ОГРАНИЧЕННОСТИ ТЕОРИИ ПЕТЕРСЕНА ДЛЯ ИССЛЕДОВАНИЯ ДУГОВЫХ ПЕРЕНАПРЯЖЕНИЙ
В ГОРОДСКИХ ЭЛЕКТРИЧЕСКИХ СЕТЯХ 6-10 КВ

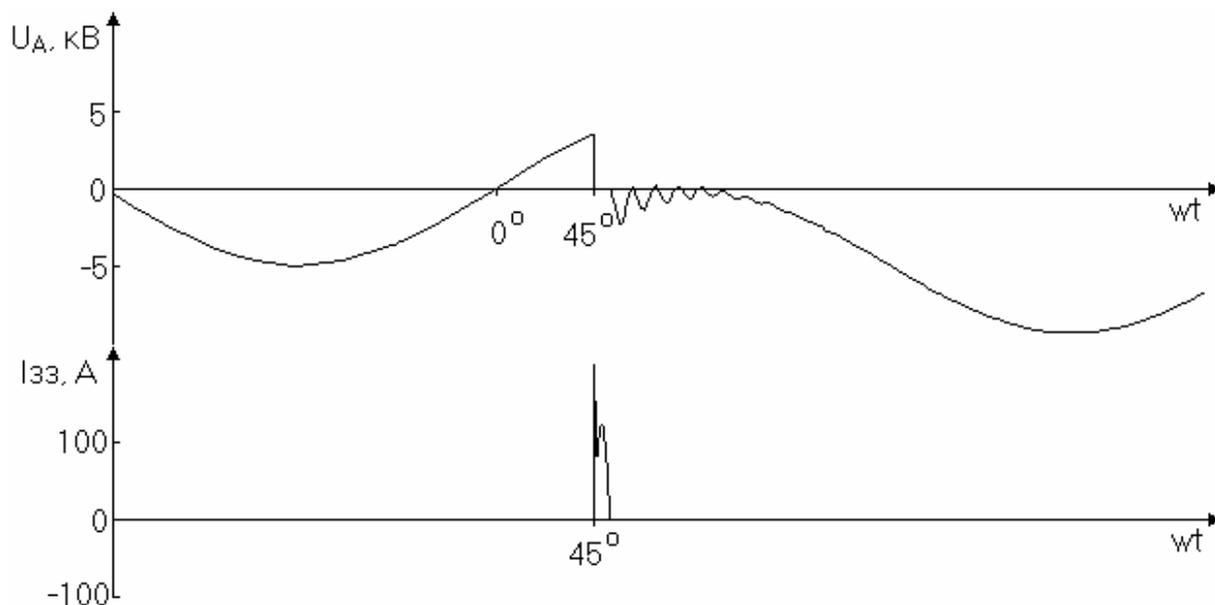


Рис. 1. Осциллограмма напряжения в фазе А и тока замыкания на землю.

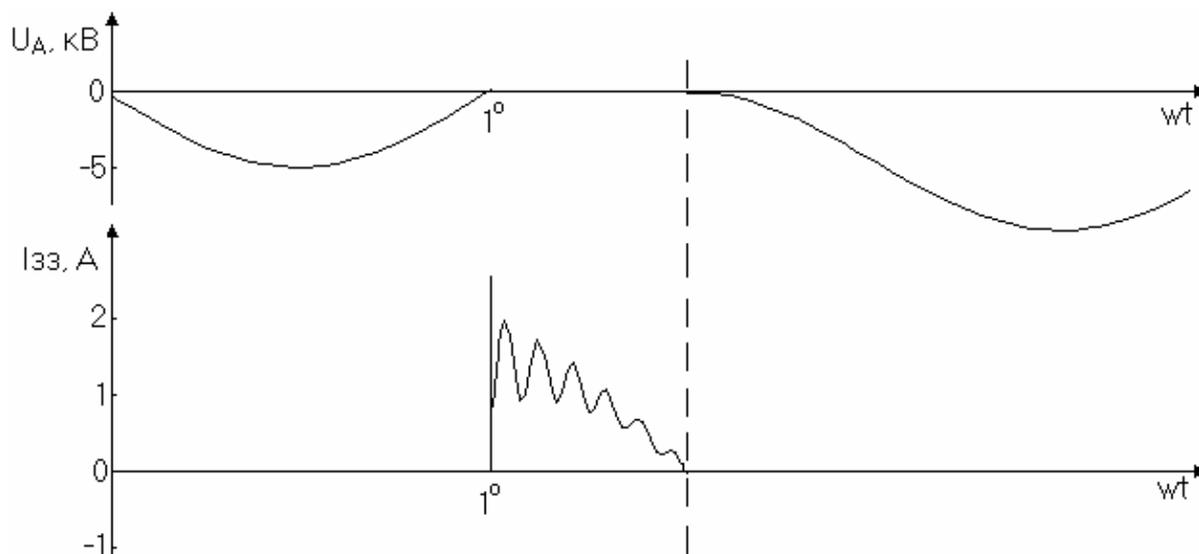


Рис. 2. Форма тока в случае пробоя фазной изоляции в начале полуволны напряжения фазы А.

В последней колонке табл. 1 приведен интервал, в котором не выполняется допущение Петерсена. Данный интервал измерен в градусах фазового угла по рис. 2. При этом принято допущение, что сопротивление дуги постоянно и равно 7,6 Ом.

Таблица 1

$I_{сА}$, А	Ёмкость между фазой и землей,	Интервал, град.
--------------	-------------------------------	-----------------

	мкФ.	
9,9	3,0	7
21,7	6,5	15
29,8	9,0	39

Как видно из табл. 1, при ёмкости между фазой и землёй 3,0 мкФ (ёмкостный ток $I_{сА} = 9,9$ А), этот интервал составляет 7 градусов от начала положительной полуволны напряжения фазы А (см. рис. 3,а).

При ёмкости между фазой и землёй 6,5 мкФ (ёмкостный ток $I_{сд} = 21,7$ А) этот интервал увеличивается до 15° (см. рис. 3б). А при ёмкости между фазой и землёй 9,0 мкФ (ёмкостный ток $I_{сд} = 29,8$ А) этот интервал увеличивается до 39° (см. рис. 3,в).

В табл. 2 дана зависимость изменения интервала от сопротивления дуги при постоянной ёмкости кабельной сети 6,5 мкФ.

Таблица 2

Сопротивление дуги, Ом.	Интервал, град.
5	17
10	30
15	50
20	77

По данным табл. 1 и 2 построены графики изменения интервала, на котором не выполняются допущения теории Петерсена в зависимости от ёмкости кабельной сети (рис. 4), и в зависимости от сопротивления дуги (рис. 5).

Дальнейшее увеличение ёмкости (длины) кабельной сети до 9 мкФ и сопротивления дуги до 20 Ом даёт осциллограмму представленную на рис. 6. При этом, в случае замыкания фазы на землю вблизи максимума напряжения фазы А (фазовый угол $80^\circ - 90^\circ$), амплитуда высокочастотной составляющей тока замыкания на землю принимает такие значения, что ток дуги гаснет не при переходе через нуль тока промышленной частота, а при первом же переходе через нуль высокочастотной составляющей.

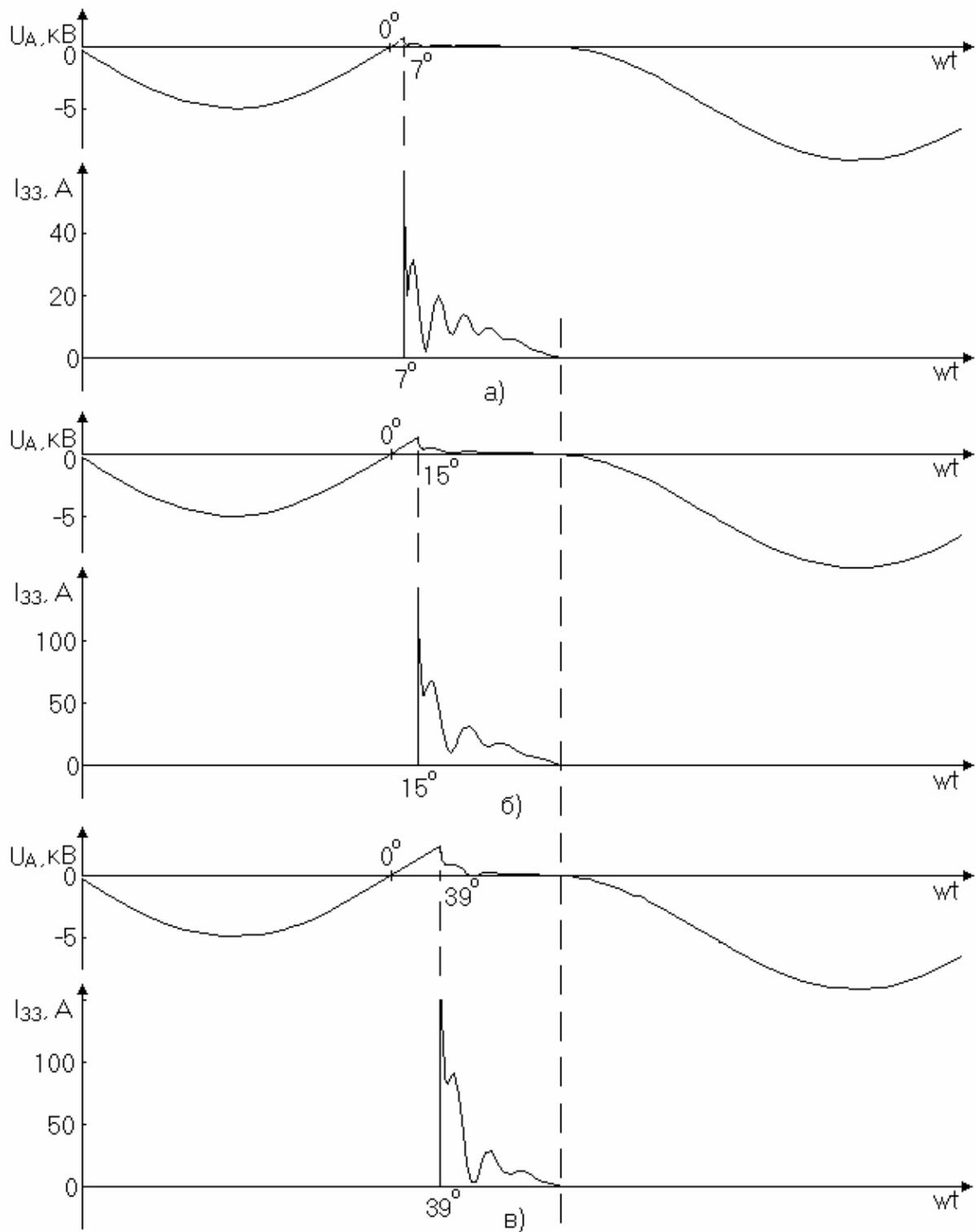


Рис. 3. Изменение интервала в зависимости от ёмкости кабельной сети ($R_d = \text{const} = 7,6 \text{ Ом}$):
 а) ёмкость между фазой и землёй 3,0 мкФ (соответствует кабельной сети протяженностью 12 км);
 б) ёмкость между фазой и землёй 6,5 мкФ (26 км);
 в) ёмкость между фазой и землёй 9,0 мкФ (36 км).

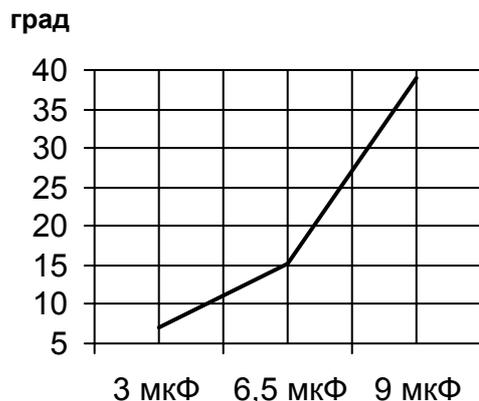


Рис. 4. График изменения интервала в зависимости от ёмкости кабельной сети ($R_d = \text{const} = 7.6 \text{ Ом}$).

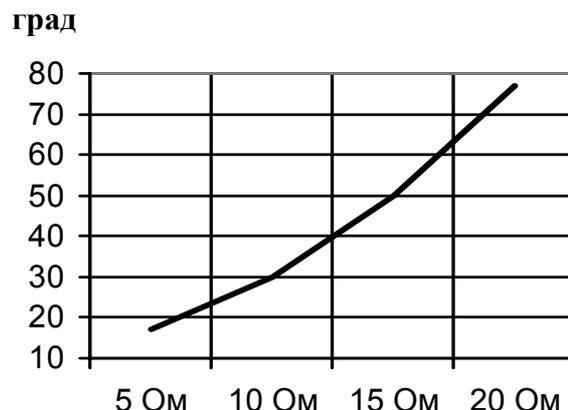


Рис. 5. График изменения интервала в зависимости от сопротивления дуги ($C = \text{const} = 6.5 \text{ мкФ}$).

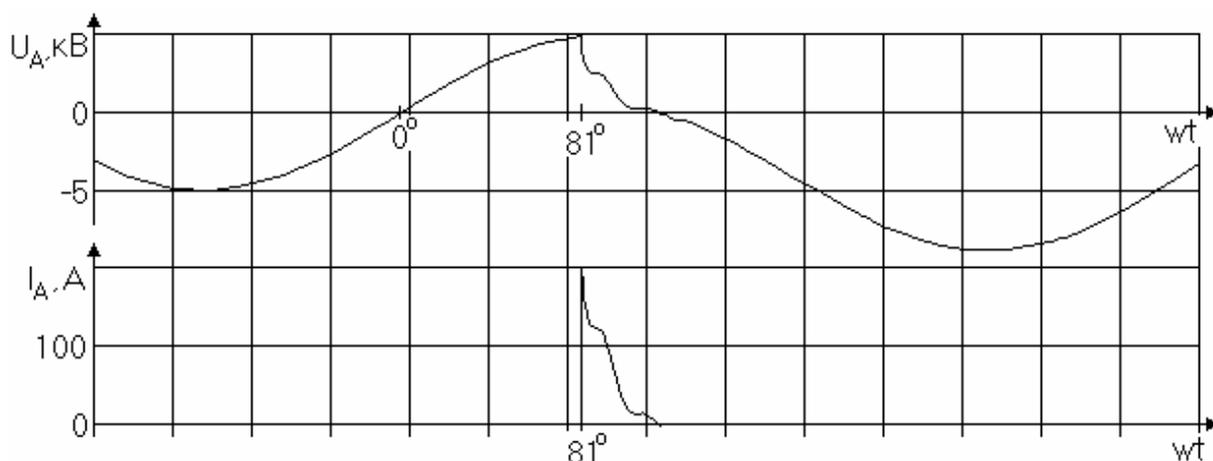


Рис. 6. Замыкание на землю фазы А, при фазовом угле 81° градуса ($C=9,0 \text{ мкФ}$, $R_d=20 \text{ Ом}$).

Как видно из вышеизложенного, интервал, на котором не выполняются допущения теории Петерсена, определяется протяженностью кабельной сети и сопротивлением дуги.

На основании изложенного можно сделать выводы:

- об ограниченности теории Петерсена, как не учитывающей режимы, когда высокочастотная составляющая тока замыкания на землю не имеет переходов через нуль при замыкании на землю;
- о непригодности данной теории для изучения процессов возникновения дуговых перенапряжений на начальном участке полуволны напряжения (что возможно при порыве кабельной линии);
- о необходимости рассмотрения других теорий дуговых перенапряжений.

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. Мусин А. Х. Системы электроснабжения городов: технология ресурсосберегающего обслуживания по реальной потребности. Научно-производственное издание / Алт. гос. техн. ун-т им. И.И. Ползунова. – Барнаул: Изд-во АлтГТУ, 1999. 148 с.
2. Техника высоких напряжений. Учебник для студентов электротехнических и электроэнергетических специальностей вузов. Под общей ред. Д.В. Резевица. Изд. 2-е, перераб. и доп. М.: Энергия, 1976.
3. Защитное шунтирование однофазных повреждений электроустановок / В.И. Шуцкий, В.О. Жидков, Ю.Н. Ильин – М.: Энергоатомиздат, 1986. – 152 с.: ил.