

2. ГОСТ 30323-95. Короткие замыкания в электроустановках: Методы расчета электродинамического и термического действия токов короткого замыкания. – Введ. 01.03.1999. – Мн.: 1999. – 57 с.

3. Сергей И. И., Стрелюк М. И. Динамика проводов электроустановок энергосистем при коротких замыканиях: Теория и вычислительный эксперимент. – Мн.: ВУЗ-ЮНИТИ, 1999. – 252 с.

4. Бошнякович А. Д. Расчет проводов подстанций и больших переходов ЛЭП. – Л.: Энергия, 1975. – 248 с.

Представлена кафедрой
электрических станций

Поступила 28.01.2004

УДК 621.313.314

ОПРЕДЕЛЕНИЕ ТОКОВ УТЕЧКИ ЧЕРЕЗ СУХОЕ ИЗОЛЯЦИОННОЕ ПОКРЫТИЕ ПРОВОДОВ ВЛП 10 кВ ПРИ КАСАНИИ ДЕРЕВЬЕВ И ДРУГИХ ЗАЗЕМЛЕННЫХ ПРЕДМЕТОВ

Докт. техн. наук, проф. СТЕПАНЧУК К. Ф.,
кандидаты техн. наук, доценты КЛИМОВИЧ Г. С., КРАСЬКО А. С.,
инж. ЛАМАН М. С.

Белорусский национальный технический университет

Исследования, проведенные на макете ВЛП при схлестывании проводов и попадании на них упавших деревьев, других заземленных предметов, показали, что в таком режиме ВЛП может работать длительное время [1, 2]. Однако при попадании на провода заземленных предметов за счет токов утечки через покрытие провода и заземленный предмет могут появиться высокие потенциалы на этом предмете и вокруг него, т. е. могут возникнуть напряжение прикосновения и шаговое напряжение, опасные для людей и животных. Поэтому с позиции техники безопасности очень важно оценить величины токов утечки через покрытие провода в сухом состоянии провода и под дождем. Данная работа посвящена теоретическому и экспериментальному исследованию этой задачи.

Расчетная схема для определения тока через полиэтиленовое покрытие при касании заземленным предметом проводов ВЛП представлена на рис. 1, где C_0 – емкость между проводом и заземленным предметом; C_1 и R_1 – емкость и объемное сопротивление покрытия на единицу длины провода; C_2 и R_2 – удельная поверхностная емкость и поверхностное сопротивление покрытия. Величины токов утечки и распределение напряжения в полиэтиленовом покрытии провода ВЛП определяются значениями этих параметров. Для анализа расчетной схемы необходимо оценить эти величины.

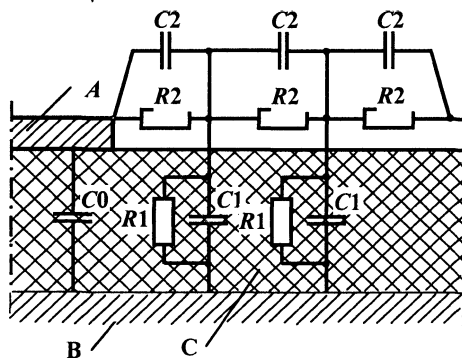


Рис. 1. А – заземленный предмет; В – жила провода;
С – полиэтиленовое покрытие

Первая серия экспериментов выполнялась с целью определения величины полного тока утечки через сухое покрытие и его зависимости от напряжения.

Образцы представляли собой отрезки провода АСИ-70 длиной 2 м (образцы 1–5) и 6 м (образцы 6, 7). Электроды из фольги плотно наматывались в середине образца на покрытие и прижимались проволочным бандажом. Ширина электродов принималась равной 10 см. Напряжение от установки переменного тока 110 кВ подавалось на жилу и измерялось электростатическим киловольтметром С-100. Для измерения токов утечки использовался электронный вольтметр В7-27 с шунтом $R_{ш}$, который включался в цепь заземления. Шунт – образцовый магазин сопротивлений класса 0,5. Сопротивление шунта менялось от 1 до 50 кОм, что позволяло надежно измерять токи до 1 нА. Испытательное напряжение изменялось ступенями до 35 кВ, что соответствует возможному уровню внутренних перенапряжений в сетях 10 кВ (табл. 1).

Таблица 1

Зависимость токов утечки на частоте 50 Гц от напряжения

Образец	Ток утечки, мА, при напряжении, кВ					
	10	15	20	25	30	35
№ 1	0,16	0,27	0,42	0,49	0,65	0,83
№ 2	0,19	0,28	0,39	0,5	0,6	0,8
№ 3	0,17	0,27	0,38	0,47	0,59	0,77
№ 4	0,14	0,22	0,31	0,41	0,51	0,66
№ 5	0,15	0,24	0,32	0,43	0,54	0,7
№ 6	0,16	0,25	0,33	0,43	0,54	0,69
№ 7	0,16	0,24	0,32	0,43	0,53	0,69

Как видно, величина токов утечки во всем диапазоне испытательных напряжений не превышает 1 мА. Результаты хорошо повторяются для всех образцов. По величине тока утечки было рассчитано полное сопротивление изоляции, которое изменяется от 62,8 до 48,4 МОм в зависимости от напряжения (табл. 2).

Зависимость полного сопротивления изоляции на частоте 50 Гц от напряжения

Образец	Полное сопротивление изоляции, Мом, при U , кВ					
	10	15	20	25	30	35
№ 1	62,5	55	48	51	46	42
№ 2	53	54	51	50	48	44
№ 3	59	56	53	53	51	45
№ 4	72	67	64	61	59	53
№ 5	68	63	62	58	55	50
№ 6	62,5	60	61	58	56	51
№ 7	62,5	62,5	62,5	58	57	51
Среднее значение	62,8	59,6	57,4	55,6	53,1	48,4

Ток и полное сопротивление не зависят от длины образца.

Чтобы оценить влияние активных сопротивлений R_1 и R_2 на ток через покрытие, были проведены измерения тока на постоянном напряжении, что исключало влияние емкостей C_0 , C_1 и C_2 . Использовалась высоковольтная выпрямительная установка ЭАЯ-160 с выходным напряжением 50 кВ. Напряжение подавалось на жилу провода АСИ-70 и измерялось киловольтметром С-100. На покрытие накладывался электрод из фольги шириной 10 см, заземленный через вольтметр В7-27, который работал в режиме микроамперметра. При напряжении 35 кВ ток утечки был менее 1 нА. Очевидно, что активная составляющая тока утечки на два-три порядка меньше, чем емкостная составляющая. Следовательно, при сухой поверхности покрытия влиянием активных сопротивлений можно пренебречь, на переменном напряжении ток утечки через покрытие определяется только емкостями C_0 , C_1 и C_2 .

Чтобы сравнить влияние этих емкостей на токи утечки и полное сопротивление изоляции провода, были проведены испытания при ширине электродов 10, 20 и 40 см. Измерялись токи. По величине тока и приложенному напряжению была рассчитана эквивалентная емкость образцов

$$C = \frac{I}{2\pi f U},$$

где I – ток через покрытие; f – частота, равная 50 Гц; U – напряжение.

Результаты измерений и расчетов приведены в табл. 3

Таблица 3

Зависимость токов утечки и эквивалентной емкости образцов от ширины электрода

Ширина электрода, см		Ток утечки и эквивалентная емкость образца при U , кВ					
		10	15	20	25	30	35
10	I , мА	0,16	0,27	0,42	0,49	0,65	0,83
	C , нФ	0,05	0,05	0,06	0,06	0,07	0,07
20	I , мА	0,25	0,4	0,54	0,7	0,86	1,1
	C , нФ	0,08	0,09	0,08	0,09	0,09	0,10
40	I , мА	0,44	0,68	0,9	1,1	1,38	1,74
	C , нФ	0,14	0,15	0,14	0,14	0,15	0,16

Емкость системы провод – электрод может быть рассчитана по формуле для цилиндрического конденсатора [3]

$$C_0 = \frac{2\pi\epsilon\epsilon_0 l}{\ln(r_2/r_1)},$$

где ϵ_0 – диэлектрическая постоянная; $\epsilon_0 = \frac{1}{36\pi \cdot 10^9}$ Ф/м; $\epsilon = 2,3$ – относительная диэлектрическая проницаемость шитого полиэтилена [4]; l – ширина электрода, м; r_1 и r_2 – радиусы провода и провода с покрытием, равные соответственно 5,5 и 7,5 мм при толщине покрытия 2 мм [5].

По результатам расчетов при ширине электрода 10, 20 и 40 см емкость цилиндрического конденсатора при заданных размерах электродов составляет 0,04, 0,08 и 0,16 нФ. Эти величины практически совпадают с емкостями, рассчитанными по измеренным токам. Следовательно, при соприкосновении сухой поверхности провода с заземленным предметом ток утечки определяется только емкостью провод – заземленный предмет C_0 , емкости C_1 и C_2 в этом случае можно не учитывать.

Сопротивление изоляции слабо зависит от испытательного напряжения. При изменении напряжения от 10 до 35 кВ при ширине электрода 10 см оно изменяется приблизительно на 30 %, при 20 см – на 25, а при 40 см – только на 10 %.

В реальных условиях дерево лежит или опирается на провод ВЛП. В этом случае ток утечки определяется общим сопротивлением изоляционного покрытия, дерева и его корневой системы. Чтобы выяснить влияние сопротивления дерева на ток утечки, было выполнено несколько серий опытов.

В первой серии образец дерева с установленными через 1 м проволочными электродами прикасался к проводу, поверхность которого была обмотана электродом из фольги шириной 10 см. Результаты измерения токов утечки и рассчитанные полные сопротивления приведены в табл. 4

Таблица 4

Зависимость токов утечки и сопротивления изоляции при контакте дерева с электродом на изоляционном покрытии провода ВЛП от напряжения

Образец	Испытательное напряжение, кВ					
	10	15	20	25	30	35
№ 1, Ø 6,5 см:						
I , мА	0,17	0,26	0,36	0,48	0,63	0,82
Z , МОм	59	58	56	52	48	43
№ 2, Ø 12 см:						
I , мА	0,17	0,26	0,37	0,48	0,63	0,73
Z , МОм	59	58	54	52	48	48
Заземленный электрод без дерева:						
I , мА	0,16	0,27	0,42	0,49	0,65	0,83
Z , МОм	62	55	48	51	46	42

Сравнение результатов с данными измерений токов утечки и сопротивления изоляции изоляционного покрытия провода (последние строки

в табл. 4) показывает, что влияние сопротивления дерева на токи утечки незначительно. Это вполне объяснимо, так как сопротивление живого дерева составляет 80 кОм/м, а полное сопротивление системы покрытый провод – дерево – 40...60 МОм. Основная нагрузка лежит на покрытии провода.

Как показано ранее, величина тока утечки через изолирующее покрытие провода практически полностью определяется емкостью провод – электрод на покрытии. Поэтому во второй серии опытов условия измерений были приближены к реальным. Образец дерева накладывался на покрытый провод без дополнительных электродов на проводе. На втором конце образца дерева через 1 м наложен бандаж из проволоки, который заземлялся через шунт. Результаты измерений и расчетов приведены в табл. 5.

Таблица 5

Токи утечки и сопротивление системы дерево – провод

Образец	Испытательное напряжение, кВ					
	10	15	20	25	30	35
№ 1: <i>I</i> , мА <i>Z</i> , МОм	0,05 200	0,09 167	0,13 154	0,18 139	0,26 115	0,36 97
№ 2: <i>I</i> , мА <i>Z</i> , МОм	0,05 200	0,09 167	0,13 154	0,19 132	0,25 120	0,35 100
№ 3: <i>I</i> , мА <i>Z</i> , МОм	0,055 182	0,09 167	0,13 154	0,18 139	0,25 120	0,36 97

Их сравнение с результатами, приведенными в табл. 4, свидетельствует о том, что в реальных условиях, когда дерево касается поверхности провода, ток утечки уменьшается в 2...3 раза по сравнению с током утечки через электрод. Очевидно, это вызвано уменьшением емкости дерево – провод по сравнению с емкостью провод – электрод из фольги.

Из изложенного выше следует, что при сухой поверхности покрытия ток утечки практически не зависит от сопротивления дерева, а полностью определяется сопротивлением полиэтиленовой пленки покрытия. При рабочем напряжении и возможных внутренних перенапряжениях он не превышает 0,5 мА.

ВЫВОДЫ

1. Проведены теоретический анализ и оценка возможных токов утечки при соприкосновении провода с заземленным предметом (деревом).

2. В результате теоретических расчетов и проведенных опытов по оценке токов утечки при соприкосновении заземленного предмета (дерева) с проводом доказано, что при качественном покрытии активная составляющая тока утечки через покрытие пренебрежимо мала и активное сопротивление R_1 в схеме замещения образца при расчетах можно не учитывать. Для сухой поверхности покрытия можно не учитывать и поверхностное сопротивление R_2 .

3. При сухой поверхности полиэтиленового покрытия ток утечки на заземленный предмет и сопротивление изоляции определяются емкостью

системы электрод – провод (емкость C_0), которые практически не зависят от длины образца. Таким образом, можно считать, что при сухой поверхности измеренные значения токов утечки и сопротивление изоляции в системе заземленный электрод – провод справедливы для реальных пролетов ВЛП. Ток утечки не превышает 1 мА, а полное сопротивление изоляции – не менее 50 МОм при любой длине пролета.

ЛИТЕРАТУРА

1. Степанчук К. Ф., Климович Г. С., Красько А. С. Срок службы изоляции покрытых проводов ВЛП 10 кВ при касании веток деревьев и других заземленных предметов // Энергетика... (Изв. высш. учеб. заведений и энерг. объединений СНГ). – 2002. – № 5. – С. 28–34.

2. Степанчук К. Ф., Климович Г. С., Красько А. С. Срок службы изоляции покрытых проводов ВЛП 10 кВ при схлестывании // Энергетика... (Изв. высш. учеб. заведений и энерг. объединений СНГ). – 2002. – № 3. – С. 22–26.

3. Техника высоких напряжений / Под ред. М. В. Костенко. – М.: Высш. шк., 1973. – С. 528.

4. Фимкель Э. Э., Брагинский Р. П. Нагревостойкие провода и кабели с радиационно-модифицированной изоляцией. – М.: Энергия, 1975.

5. Провод с изолирующей оболочкой для воздушных линий электропередачи до 20 кВ типа АСИ: Технические условия: ТУ РБ 00114241–99. – Мн., 1999.

Представлена кафедрой
электрических станций

Поступила 23.09.2003

УДК 621

АНАЛИЗ ЦЕЛЕСООБРАЗНОСТИ ПРИМЕНЕНИЯ МОДЕЛИ LCL С ИСТОЧНИКОМ ВЫСШИХ ГАРМОНИЧЕСКИХ ТОКА ПРИ ИССЛЕДОВАНИИ ЯВЛЕНИЙ РЕЗОНАНСА В СЕТЯХ ПИТАНИЯ

**Канд. техн. наук ПАВЛОВСКИ М.,
докт. техн. наук, проф. ШИМАНСКИ А., канд. техн. наук ФИАЛКОВСКИ З.**

Вроцлавский технический университет (Польша)

Рост мощности нелинейных приемников, включаемых в электроэнергетическую сеть, вызывает значительные искажения синусоидальности питающего напряжения. Проведенный анализ [1] и [2] показывает, что степень искажения питающего напряжения возрастает в определенное время дня. Это касается потребительских сетей, когда число подключаемых мелких потребителей, например персональных компьютеров, значительно увеличивается.

Также к этому необходимо добавить значительный рост числа нелинейных приемников в промышленности. В такой ситуации сложно рекомендовать эффективные предохранительные методы. Применение батарей