

Новые импульсно-дуговые методы обнаружения мест повреждения КЛ, реализованные в инновационной электротехнической лаборатории АЛЬФА

Более половины вырабатываемой в РФ электроэнергии распределяется потребителям систем промышленного и городского электроснабжения через кабельные сети среднего напряжения. Изношенность инфраструктуры распределительных сетей составляет более 60% почти в каждом регионе и федеральном округе.

Кондратьев Ю.А.,
к.т.н., главный научный сотрудник ООО «СЕБА ИНЖИНИРИНГ»

Золотарев И.Д.,
руководитель отдела разработок ООО «СЕБА ИНЖИНИРИНГ»

Тимофеев В.И.,
генеральный директор ООО «Меггер»

Захаров М.А.,
заместитель коммерческого директора ООО «СЕБА ИНЖИНИРИНГ»

Если анализировать статистику отказов КЛ различных напряжений и степень их влияния на возникающие убытки, то наибольшие убытки возникают при отказах КЛ 6–10 кВ, на которые приходится около 70 % всех нарушений электроснабжения потребителей. Следствием такой ситуации становятся очень частые случаи аварийных отключений линий, для быстрого восстановления которых требуется сокращение времени определения мест повреждения кабелей. Особенно это важно при отыскании высокоомных, заплывающих повреждений и при работе с длинными и/или влажными кабелями. Таким образом, разработка и реализация новых, более эффективных беспрожиговых методов обнаружения мест повреждения КЛ является чрезвычайно актуальной задачей.

Нами разработаны два новых метода беспрожигового предварительного определения мест повреждения кабелей (кабельных линий, КЛ), основанных на

широко применяемом импульсно-дуговом методе (ИДМ). Новые методы успешно реализованы в инновационной лаборатории АЛЬФА производства ООО «СЕБА ИНЖИНИРИНГ».

Первый метод заключается в автоматической подаче серии импульсов генератора импульсных напряжений (в общепринятой терминологии ГИН) на контролируемый кабель с также автоматической реализацией в конце этой серии стандартной процедуры ИДМ для получения рефлектограмм и определения места повреждения КЛ. Количество и амплитуда подаваемых импульсов в этом случае могут быть выбраны оператором исходя из априорной информации о параметрах КЛ, возможном характере дефекта и т.д. При этом сам процесс генерации импульсов и реализация ИДМ происходит, как уже указывалось, полностью автоматически, без участия оператора. Для определенности будем в дальнейшем называть этот беспрожиговый ме-

тод определения места повреждения *кабеля многоимпульсным дуговым методом (МИДМ)*.

Физической основой указанного метода являются два фактора.

Первый фактор заключается в известном свойстве диэлектриков некоторых типов, состоящем в уменьшении их электрической прочности при многоимпульсном воздействии на них [1]. Так отмечается, что эффект существенного уменьшения электрической прочности для ряда диэлектриков становится значимым уже через 2–3 импульса воздействия на диэлектрический образец. Проанализированные нами работы, в которых рассматривается это явление, посвящены решению обратной для электроэнергетики задачи — нахождению способов сознательного уменьшения электрической прочности диэлектриков с целью их возможного дальнейшего разрушения. К сожалению, нам не удалось найти работ, посвященных исследованию данного эффекта для слож-

ных диэлектриков, однако мы предположили, что этот эффект присутствует в диэлектрической изоляции электрических кабелей, например в такой, как пропитанная бумажная изоляция. Как показали дальнейшие экспериментальные работы на реальных КЛ, выполненные нами с помощью лаборатории АЛЬФА, такое предположение оказалось верным.

Второй фактор вытекает из анализа упрощенной модели разряда ГИН на КЛ (рисунок 1) при многоимпульсном воздействии и заключается в росте напряжения на кабеле при первоначальном отсутствии пробоя:

$$U_2 = U_1 \frac{C_1}{C_1 + C_2}, \quad (1)$$

где C_1 — емкость накопителя ГИН; C_2 — емкость кабеля; U_1 — напряжение на емкости ГИН в момент $t=0$ непосредственно до замыкания разрядного ключа S_1 ; U_2 — напряжение на кабеле.

Строго говоря, задача нахождения напряжения U_2 на емкости кабеля в момент $t=0$ непосредственно после замыкания ключа (рисунок 1) является «некорректной», так как для упрощенной модели не выполняется закон коммутации, в соответствии с которым напряжение на емкостях в моменты времени $t=0$ и $t=0$ должно быть равным. Это противоречие легко преодолевается, если применить так называемый обобщенный закон коммутации [2], определяющий равенство зарядов в указанные моменты времени. Исходя из этого, нетрудно получить известную формулу (1).

Здесь необходимо обратить особое внимание на чрезвычайно важный, по нашему мнению, факт — из выражения (1) следует, что напряжение на кабеле всегда меньше амплитуды импульса ГИН, даже без учета дополнительных потерь, естественно возникающих в реальных условиях. На рисунке 2 приведен график величины расчетного коэффициента уменьшения напряжения на кабеле в зависимости от емкости (длины) кабеля $K=f(C_2)$ для различных емкостей ГИН.

Обращает на себя внимание значительное уменьшение напря-

жения на кабеле уже при сравнительно небольших его емкостях (длинах). Очевидно, этот факт зачастую и приводит к ограничению возможностей стандартного ИДМ, реализуемого в обычных лабораториях, что особенно проявляется при работе с влажными кабелями и при наличии заплывающих повреждений.

Последовательно применяя выражение (1) для многоимпульсного режима, получим выражение для напряжения на емкости кабеля для этого случая:

$$U_{2n} = U_1 \frac{C_1}{C_1 + C_2} \left[1 + \left(\frac{C_2}{C_1 + C_2} \right) + \dots \right] = U_1 \frac{C_1}{C_1 + C_2} \left[\sum_{n=1}^{\infty} \left(\frac{C_2}{C_1 + C_2} \right)^{n-1} \right]. \quad (2)$$

Нетрудно видеть, что ряд в квадратных скобках представляет из себя геометрическую прогрессию стандартного вида из n членов, предел суммы которой при $n \rightarrow \infty$ равен [3]:

$$\lim_{n \rightarrow \infty} \sum_{n=1}^{\infty} \left(\frac{C_2}{C_1 + C_2} \right)^{n-1} = \frac{C_1 + C_2}{C_1}. \quad (3)$$

Таким образом, с учетом (2) и (3) получим выражение, определяющее величину максимального напряжения на кабеле для многоимпульсного режима:

$$U_{2n \max} = U_1. \quad (4)$$

На рисунке 3 приведены расчетные значения напряжения на

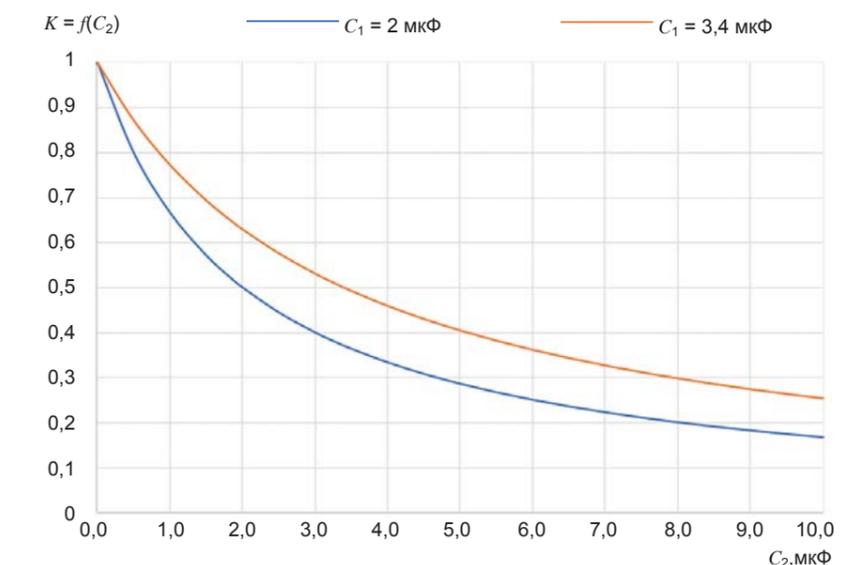


Рис. 2. Коэффициент уменьшения напряжения на кабеле в зависимости от емкости (длины) кабеля

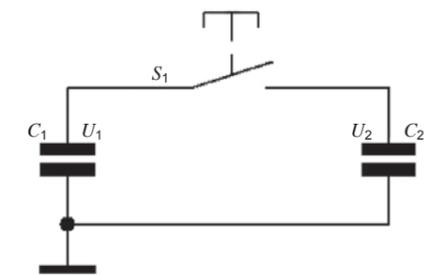


Рис. 1. Схема разряда ГИН на КЛ при многоимпульсном воздействии

кабеле для многоимпульсного режима в зависимости от емкости (длины) кабеля C_2 при использовании ГИН с емкостью C_1 , равной 4 мкФ, и напряжением 32 кВ. Проанализировав полученные результаты, можно увидеть значительное увеличение напряжения на кабеле спустя несколько импульсных воздействий. Этот факт, на наш взгляд, имеет важное значение, так как именно на средних и длинных кабелях зачастую проявляются ограничения применения обычного ИДМ.

Описанный выше новый ИДМ был реализован нами в лаборатории АЛЬФА, с использованием которой были проведены многочисленные натурные испытания этого метода на различных марках и длинах кабелей. Данный новый метод показал существенно лучшие результаты предварительного обнаружения мест повреждения кабелей по сравнению обычным ИДМ. Преимущество данного метода особенно

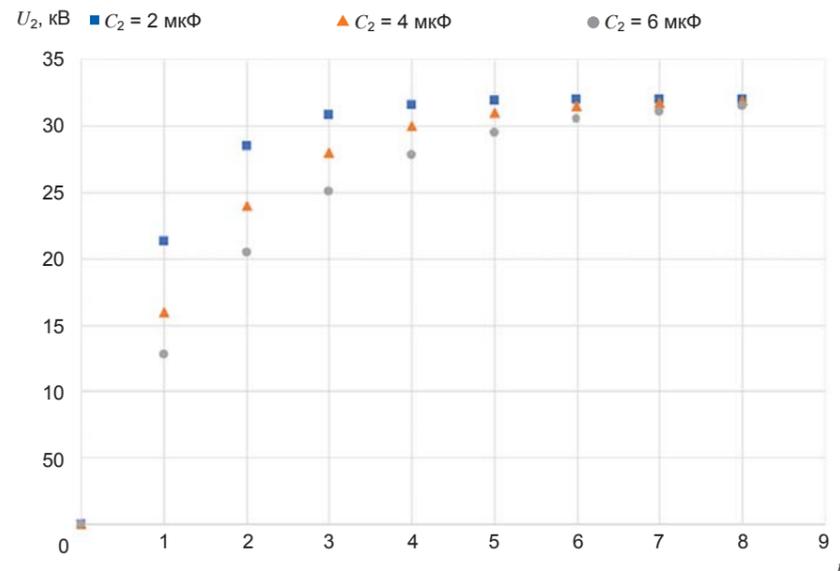


Рис. 3. Расчетные значения напряжения на кабеле для многоимпульсного режима в зависимости от емкости (длины) кабеля

значимо проявились на кабелях средней и большой длины, кабелях с заплывающими повреждениями и влажных кабелях, то есть в тех случаях, когда обычный ИДМ не приводил к положительным результатам.

Расширенные результаты применения МИДМ для поиска мест повреждения кабелей в реальных условиях мы планируем опубликовать в отдельной статье.

Здесь необходимо заметить, что полностью осуществить и использовать все функциональные особенности нового метода стало возможным только в результате реализации его в автоматизированной цифровой лаборатории АЛЬФА, благодаря большим ал-

горитмическим, вычислительным и коммутационным возможностям этой лаборатории.

Второй новый метод беспрожогового определения мест повреждения кабелей заключается в автоматической подаче серии импульсов ГИН с также автоматической реализацией в конце этой серии стандартной процедуры ИДМ для получения рефлектограмм и определения места повреждения КЛ. Однако в данном случае напряжение ГИН подается не напрямую на контролируемый кабель, а через специальный индуктивный реактор, обладающий большой индуктивностью и малыми потерями.

Происходящие при этом процессы можно проанализировать на основе упрощенной схемы, представленной на рисунке 4. Используя классический метод расчетов переходных процессов, можно получить выражение для напряжения на кабеле как функцию времени $U_2=f(t)$.

$$U_2(t) \cong U_1 \frac{C_1}{C_1 + C_2} (1 - e^{-\delta t} \cos \omega_0 t), \quad (5)$$

где U_1 — напряжение на накопительной емкости C_1 в момент времени $t=0$, непосредственно предшествующий замыканию ключа S_1 ; C_2 — емкость кабеля; L_1 — разрядная индуктивность; $\delta=R_1/2L_1$ — коэффициент затухания; R_1 — сопротивление потерь; ω_0 — Томпсоновская круговая частота контура, образовавшегося в результате замыкания ключа.

Данное выражение получено в стандартных приближениях для случая высокочастотного контура. Выполнению требований указанного приближения в реальных условиях нами было уделено особое внимание — был разработан индуктивный реактор, обладающий большой величиной индуктивности и малыми потерями при сравнительно наибольших габарите и весе, что позволило в дальнейшем полностью реализовать все преимущества этого метода в лаборатории АЛЬФА.

Исходя из образующейся при реализации этого метода импульсной последовательности

с затухающей амплитудой напряжения каждого из импульсов, мы условно назвали этот новый метод *импульсно-затухающим дуговым методом* или *сокращенно ИЗДМ*.

Анализируя полученное выражение (5), мы легко можем сформулировать преимущества данного метода по сравнению с обычным ИДМ. Как и в предыдущем методе, ИЗДМ позволяет осуществить повторяющееся воздействие на кабель, при этом максимумы колебаний напряжения на кабеле $U_2(t)$ всегда больше, чем на выходе ГИН и достигают величины, почти в два раза превышающей напряжение на кабеле при применении обычного ИДМ. Простой расчет показывает, что, например, при применении стандартного ГИН на диапазоне максимального напряжения 32 кВ (разрядная емкость $C_1 = 3,6$ мкФ) и индуктивности $L_1 = 1,4$ Гн с потерями 19 Ом величина первого максимума напряжения на кабеле длиной 8,6 км (измеренная емкость кабеля $C_2 = 2,75$ мкФ) будет равна 60,2 кВ. В данном расчете приведены параметры ГИН и реального кабеля, использованного нами в одном из экспериментов.

Экспериментально измеренная величина указанного напряжения составила 56,4 кВ. Величина измеренного напряжения на этом же кабеле при подаче импульса 32 кВ с ГИН напрямую на кабель составила всего 18 кВ (расчетная величина 18,54 кВ). Такие значения амплитуд напряжений не только позволяют реализовать широчайшие многоимпульсные возможности данного метода при отыскании мест повреждения

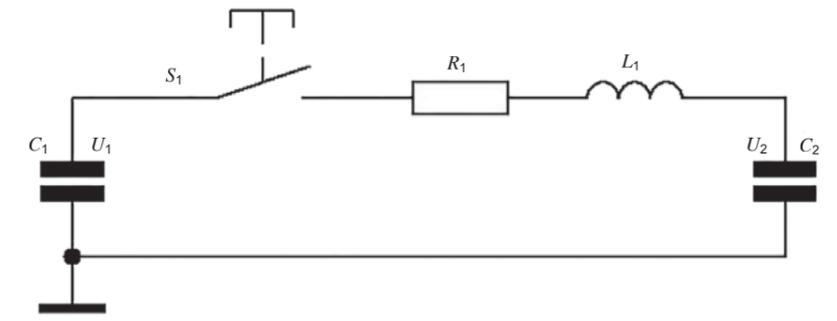


Рис. 4. Схема метода ИЗДМ

различных, особенно влажных и с заплывающими повреждениями кабелей, но и зачастую дают возможность отказаться от высоковольтного прожига, являющегося деструктивным методом воздействия на весь кабель.

Еще одним достоинством указанного метода является тот факт, что рост напряжения на кабеле происходит «медленно» по сравнению с возможным ростом этого напряжения при подаче импульсов с ГИН непосредственно на кабель. Время фронта в режиме ИЗДМ определяется временем половины периода образующихся затухающих колебаний и находится для разных типов и длины кабелей в диапазоне 1÷20 мсек. Это величина значительно (больше, чем на 1÷2 порядка) превышает величину фронта импульсов ГИН и тем самым снимает ограничения на величину напряжения на кабеле вплоть до испытательных напряжений ДС. Необходимо заметить, что выше названное ограничение связано с известным явлением аномального понижения электрической прочности диэлектриков [4] при воздействии на них высоковольтных импульсов с нахо-

дящимся в определенном диапазоне временем нарастания фронтов этих импульсов.

Таким образом, импульсно-затухающий дуговой метод позволяет значительно расширить возможности применения представленного выше метода МИДМ

в области увеличения диапазона применяемых напряжений при сохранении неразрушающего воздействия на кабель, что, в свою очередь, позволяет существенно повысить вероятность обнаружения мест повреждения кабелей без применения деструктивных методов (таких как прожиг), отрицательно влияющих на состояние изоляции всего обследуемого кабеля.

Здесь также необходимо отметить, что, как и в предыдущем случае, воплощение данного метода в полностью автоматическом режиме с осуществлением всей необходимой высоковольтной коммутации, точных измерений основных и дополнительных параметров, сложных и быстрых вычислений стало возможным только благодаря реализации всех указанных функций в автоматической цифровой лаборатории АЛЬФА. P



Инновационная электротехническая лаборатория АЛЬФА

ЛИТЕРАТУРА

1. Усов А.Ф., Семкин Б.В., Зиновьев Н.Т. Переходные процессы в установках электроимпульсной технологии. СПб.: Наука, 2000. 160 с.
2. Бакалов В.П., Дмитриков В.Ф., Крук Б.И. Основы теории цепей. М.: Горячая линия – Телеком, 2007. 597 с.
3. Двайт Г.Б. Таблицы интегралов и другие математические формулы. М.: Наука, 1973. 228 с.
4. Каляцкий И.И., Панин В.Ф. О методе определения параметров наиболее опасных для изоляции импульсных перенапряжений // Известия Томского политехнического института, 1971, т. 180. С. 178–184.



ООО «СЕБА ИНЖИНИРИНГ»
+7 (499) 683-02-50
info@sebaeng.ru
www.sebaeng.ru