

## Прогнозирование остаточного ресурса силовых кабелей по возвратному напряжению

В процессе эксплуатации изоляция кабелей стареет под влиянием тепловых и электрических полей. Номинальный срок службы изоляции 25 лет, однако, из-за различных условий эксплуатации степень старения изоляции различна. В настоящее время идет замена кабельных линий с пропитанной бумажной изоляцией на кабели со сшитой полиэтиленовой изоляцией. В связи с этим возникает вопрос об очередности замены кабельных линий. Для этого необходимо знать остаточный ресурс кабелей находящихся в эксплуатации.

Следует учитывать, что качество изоляции силовых кабелей формируется в ходе технологического процесса. Бумажную изоляцию кабелей на напряжения 1—10 кВ сушат при температуре 120°C и вакууме 10 мм рт. ст., на напряжения 20—35 кВ при 2 мм рт. ст. При этих же давлениях впускают в сушильно-пропиточный аппарат дегазированный маслоканифольный состав. Содержание канифоли 10—26% для кабелей на напряжения 1—10 кВ и 31—43% на напряжения 20—35 кВ (табл. 1). Канифоль добавляется для увеличения вязкости пропиточного состава, кроме того, канифоль уменьшает скорость окисления масла, т. е. увеличивает срок службы кабеля [1].

Кабели на напряжения более 110 кВ с бумажной изоляцией, пропитываются маслом без добавления канифоли (бумажно-масляная изоляция). В этих кабелях масло периодически меняют по мере его окисления. В процессе эксплуатации кабеля берут пробы масла и определяют у него «кислотное число», по которому судят о степени окисления масла.

Таблица 1. Параметры сушки изоляции кабелей

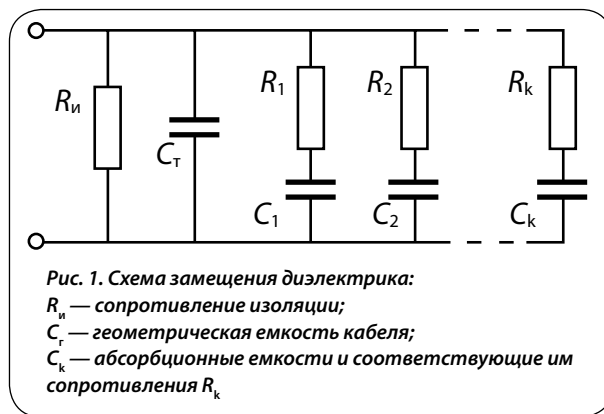
№ п/п	Тип кабеля	Напряжение, кВ	Изоляция	Сушка бумажной изоляции
1	С пропитанной бумажной изоляцией	6 и 10	Бумага К-120 пропитанная маслом «Брайтсток» с 10—26% канифоли	10 мм рт. ст. 125°C
		20 и 35	Бумага КМ-120 пропитанная маслом «Брайтсток» с 31—43% канифоли	2 мм рт. ст. 125°C
2	Маслонаполненные	110-500	Бумага КВМУ-30 пропитанная маловязким маслом МН-4 или С-220	10-4 мм рт. ст. 110°C

Диэлектрик характеризуется двумя процессами: поляризацией и проводимостью. Полный ток в диэлектрике равен:

$$j_{\text{полн}} = j_{\text{пр}} + j_{\text{см}} \quad \text{или} \quad \text{rot } H = \gamma E + \frac{\partial D}{\partial t}, \quad (1)$$

где  $j_{\text{пр}}$  — ток проводимости;  $j_{\text{см}}$  — ток смещения;  $\gamma$  — проводимость;  $H$  — напряженность магнитного поля;  $D$  — вектор электрической индукции.

Степень старения изоляции можно определить по возвратному напряжению. Для описания метода возвратного напряжения применим эквивалентную схему замещения (рис. 1).



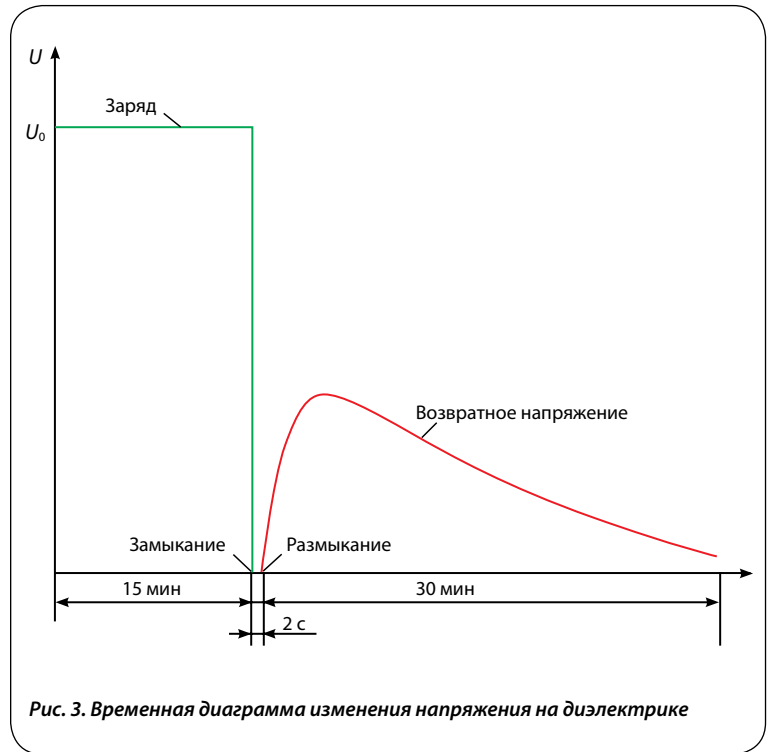
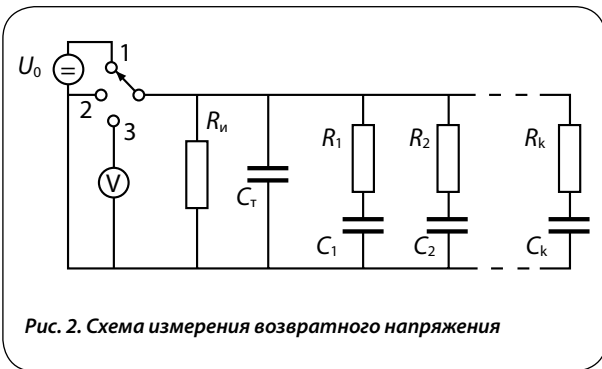
Геометрическая емкость — это емкость без учета поляризационных процессов в диэлектрике. Поляризационные процессы учитываются RC — цепочками. Основные виды поляризации представлены в табл. 2 [2]. Возвратное напряжение измеряется в течение нескольких минут, поэтому на его величину влияет только миграционная и высоковольтная поляризация.

Миграционная поляризация обусловлена накоплением заряда на границах раздела диэлектриков с разными характеристиками (проводимость, диэлектрическая проницаемость), например, бумага-масло. Высоковольтная поляризация проявляет себя вблизи электродов при высоком напряжении, т. е. в тонком слое диэлектрика, примыкающего к электроду, накапливается объемный заряд. Остальные виды поляризации не оказывают влияния на возвратное напряжение, так как они исчезают менее чем за микросекунды, под действием теплового движения молекул.

Таблица 2. Основные виды поляризации

№ п/п	Поляризация		Вид поляризации	Время установления, с	Материал
1	Электронная	Смещение электронных оболочек	Упругая	$10^{-14}$ — $10^{-15}$	Любой материал
2	Ионная	Смещение ионов	Упругая	$10^{-13}$ — $10^{-14}$	Ионные кристаллы
3	Дипольная	Поворот диполей	Релаксационная	$10^{-6}$ — $10^{-10}$	Полярные газы и жидкости, полимеры
4	Миграционная	Накопление заряда на границах раздела неоднородностей	Релаксационная	Секунды, минуты, часы	Неоднородные диэлектрики
5	Высоковольтная	Накопление заряда у электрода	Релаксационная	Секунды, минуты, часы	Диэлектрик в сильном электрическом поле

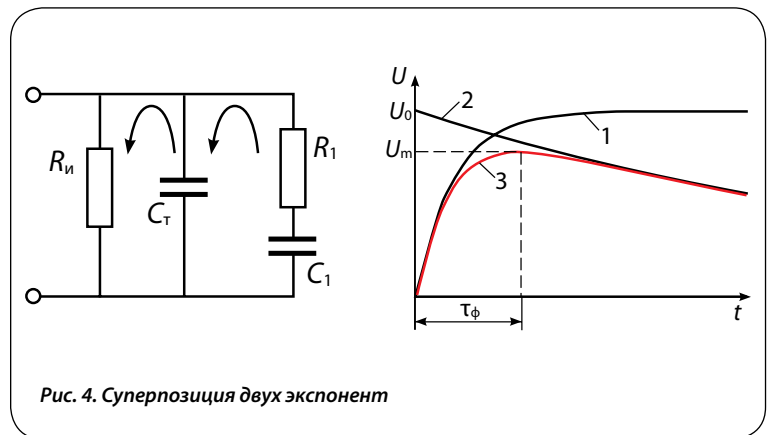
Схема измерения возвратного напряжения представлена на рис. 2. В положении переключателя 1 происходит заряд геометрической и абсорбционных емкостей. Время заряда определяется длительностью поляризационных процессов и составляет 15 мин. Затем переключатель переводится в положение 2 на короткий промежуток времени (2 с). За это время разряжается геометрическая емкость, абсорбционные емкости не успевают разрядиться. Далее переключатель переводится в положение 3, т. е. подключается к вольтметру.



Временная диаграмма изменения напряжения на диэлектрике представлена на рис. 3. После размыкания контактов (перевод из положения 2 в положение 3) возвратное напряжение возрастает, а затем медленно падает.

На рис. 4 представлен пример для простейшего случая, когда абсорбционная составляющая имеет одну RC — цепочками. Это характерно для двухслойного диэлектрика — заряд накапливается на границе раздела слоев.

После размыкания напряжение на геометрической емкости  $C_T$  возрастает за счет заряженной емкости  $C_1$  по экспоненте (кривая 1, рис. 4):



$$U = U_0(1 - e^{-\frac{t}{\tau_\phi}}), \quad (2)$$

где  $\tau_\phi = R_1 C_1$  — постоянная времени фронта волны;  $U_0$  — зарядное напряжение.

Одновременно идет разряд  $C_r$  через сопротивление изоляции  $R_{из}$  (кривая 2, рис. 4):

$$U = U_0 e^{-\frac{t}{\tau_\psi}}, \quad (3)$$

где  $\tau_\psi = R_{из} C_r$  — постоянная времени спада волны (разряда).

Суперпозиция двух экспонент дает кривую 3. На рис. 4 видно, что высота максимума (кривая 3) и его положение по оси времени определяется напряжением  $U_0$  и постоянными времени  $\tau_\phi$  и  $\tau_\psi$ .

В реальном диэлектрике, схема замещения которого представлена на рис. 1, существует несколько экспонент, поэтому спад волны идет медленнее, чем для одной экспоненты.  $RC$  — цепочки характеризуют состояние изоляции, которое определяется температурой, степенью старения и т. д.

Для исключения влияния зарядного напряжения введем коэффициент поляризации — это величина возвратного напряжения  $U_\psi$ , деленная на зарядное напряжение (в %):

$$K_n = U_\psi / U_0. \quad (4)$$

На основании статистической обработки результатов измерения возвратного напряжения на кабелях с пропитанной бумажной изоляцией на 6 кВ, получены зависимости, представленные на рис. 5.

Коэффициент поляризации зависит как от срока службы, так и температуры. По этой зависимости можно прогнозировать остаточный ресурс кабеля. Однако надо иметь в виду, что кривые дают два значения. Например, при  $K_n = 42\%$  имеем два решения: в точке 1—18 лет; в точке 2—29 лет. Для выбора правильного решения надо иметь дополнительную информацию, т.е. знать — прослужил кабель уже 18 лет или нет. При отрицательных температурах метод не работает из-за слабого изменения  $K_n$ .

## Литература

1. Третьяков В.М. Сушка и пропитка силовых кабелей/ С.Д. Холодный. — М.: Энергия, 1978. — 136 с.
2. Богородецкий Н.П. Электротехнические материалы/ В.В. Пасынков, Б.М. Тареев. — Л.: Энергия, 1977.

**Л.А. Ковригин**, д-р техн. наук

Пермский государственный технический университет

Кафедра «Конструирования и технологии электрической изоляции»

**Л.А. Сидельников**, канд. техн. наук

ОАО «Тест» г. Пермь

Рис. 5. Зависимость коэффициента поляризации от времени работы кабеля с пропитанной бумажной изоляцией на напряжение 6 кВ при различных температурах

