

А.В.Беспрозванных, канд.техн.наук (Национальный технический университет «ХПИ», Харьков)

ФИЗИЧЕСКАЯ ИНТЕРПРЕТАЦИЯ КРИВЫХ ВОССТАНАВЛИВАЮЩЕГОСЯ НАПРЯЖЕНИЯ НА ОСНОВЕ СХЕМ ЗАМЕЩЕНИЯ НЕОДНОРОДНОГО ДИЭЛЕКТРИКА

Предложено отмечать три параметра кривых восстанавливающегося напряжения для оценки состояния изоляции: амплитуду, момент максимума и постоянную времени саморазряда. Установлены критические уровни этих параметров для кабелей с бумажно-масляной изоляцией.

Запропоновано визначати три параметри кривих напруги, за якими оцінюється стан ізоляції: амплітуду, момент максимуму та сталу часу саморозряду. Встановлено критичні рівні цих параметрів для кабелів з паперово-масляною ізоляцією.

Введение. Идея использования для контроля состояния изоляции абсорбционных характеристик, в частности метода восстанавливающегося напряжения, известна давно [2,3,6]. Интерес к методу возрос после внедрения полимерной изоляции, деградация которой протекает скрытно и сопровождается накоплением объемных зарядов (ОЗ). После появления автоматизированных приборов [4] возникли предпосылки для широкого внедрения метода, причем не только для полимерной, но и для традиционной бумажно-масляной изоляции (БМИ) [7].

Суть метода состоит в том, что ненагруженный кабель длительно подключается на постоянное напряжение. При этом в изоляции образуются ОЗ. Затем производится кратковременное закорачивание кабеля, в течение которого свободные заряды на электродах успевают нейтрализоваться, а ОЗ в толще диэлектрика – нет. После снятия закоротки объемные заряды освобождаются из ловушек, и на кабеле появляется т.н. *восстанавливающееся напряжение* U_v . Чем больше величина *восстанавливающегося напряжения* U_v по отношению к зарядному напряжению E , тем больше неоднородность изоляции, тем хуже ее качество.

Физическую интерпретацию кривых восстанавливающегося напряжения рассмотрим на примере силовых кабелей с бумажно-масляной изоляцией. Так, кабели типа ААШВ, ААШвУ, ЦААБнЛГ и др. с непрерывным режимом эксплуатации являются основными в сетях 6 кВ «чистых» зон энергоблоков АЭС. Для состаренных кабелей обследования путем подачи высоких постоянных испытательных напряжений $U_{исп}$, достигающих $6U_n$ (где U_n – номинальное напряжение сети), не полностью выявляют дефекты изоляции. При этом они часто приводят к необратимым повреждениям изоляции.

Цель статьи – выявление параметров кривых восстанавливающегося напряжения, чувствительных к процессам старения изоляции кабелей.

Математическая модель двухслойной изоляции. Бумажно-масляная изоляция кабелей представляет собой двухкомпонентную систему, содержащую последовательно включенные слои твердой и жидкой фаз: клетчатки целлюлозы и пропиточного маслоканифоляного состава. Твердая фаза имеет более высокую диэлектрическую проницаемость и электрическую прочность. Продукты термической деструкции бумаги попадают в жидкую фазу, приводя к снижению сопротивления последней. В результате на границе раздела твердой и жидкой фаз накапливается все больший заряд, обусловленный растущим со временем различием диэлектрических характеристик компонентов. Оценим характер изменения кривых $U_v(t)$ в ходе старения БМИ.

Каждый из двух последовательно включенных слоев [5] бумажно-масляной изоляции представим схемой замещения (рис. 1, а): емкостями быстрых видов поляризации C_1, C_2 ; RC-цепочками замедленных видов поляризации $R_{11}-C_{11}; R_{22}-C_{22}$; сопротивлениями утечек R_1, R_2 . Дискретная резистивная схема замещения (ДРСЗ) имеет вид рис. 1, б. Стрелками указаны выбранные положительные направления токов в ветвях. На малый промежуток времени h каждая емкость C заменена резистором $R_C = h/C$ и идеальным источником ЭДС E_C , который направлен против тока и в котором «запоминается» напряжение на емкости в предыдущий момент времени.

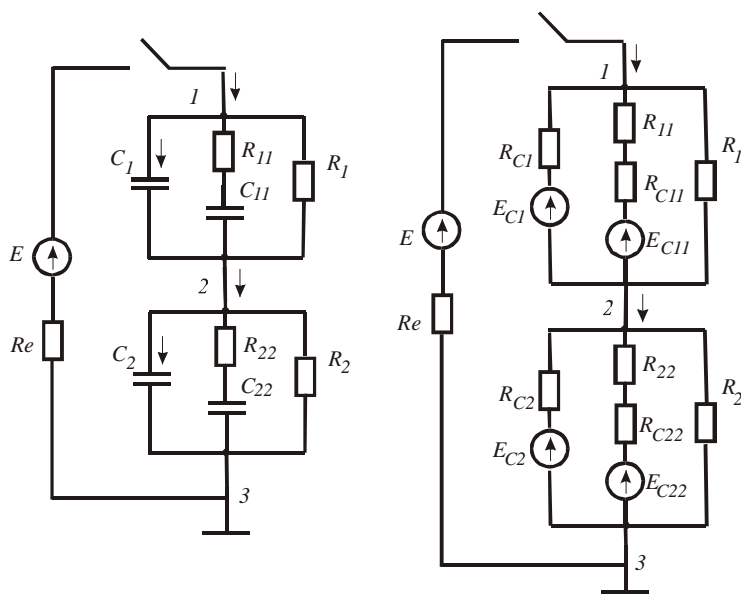


Рис. 1, а, б

Требуется найти, как изменяются напряжения на элементах схемы при ее подключении к источнику ЭДС E с внутренним сопротивлением R_e .

В начальный момент известны напряжения на всех емкостях: U_{C1} , U_{C11} , U_{C2} , U_{C22} . Каким будет состояние схемы через время h ? Для ответа на этот вопрос воспользуемся методом узловых потенциалов [1]. Потенциал узла 3 примем нулевым (рис. 1). Тогда неизвестные потенциалы φ_1 , φ_2 узлов 1 и 2 найдутся в результате решения системы линейных алгебраических уравнений второго порядка (рис. 1, б)

$$\begin{pmatrix} G_{11} & G_{12} \\ G_{21} & G_{22} \end{pmatrix} \cdot \begin{pmatrix} \varphi_1 \\ \varphi_2 \end{pmatrix} = \begin{pmatrix} J_1 \\ J_2 \end{pmatrix}, \quad (1)$$

где $G_{11}=1/R_e+1/R_{C1}+1/(R_{11}+R_{C11})+1/R_1$ и $G_{22}=1/R_{C1}+1/(R_{11}+R_{C11})+1/R_1+1/R_{C2}+1/(R_{22}+R_{C22})+1/R_2$ – узловые проводимости первого и второго узла; $G_{12}=-1/R_{C1}+1/(R_{11}+R_{C11})+1/R_1$ – взаимная проводимость между 1-м и 2-м узлами; $G_{21}=G_{12}$; $J_1=E/R_e+E_{C1}/R_{C1}+E_{C11}/(R_{11}+R_{C11})$ и $J_2=E_{C2}/R_{C2}+E_{C22}/(R_{22}+R_{C22})-E_{C1}/R_{C1}-E_{C11}/(R_{11}+R_{C11})$ – узловые токи первого и второго узлов.

Определив потенциалы узлов, найдем токи в ветвях и новые напряжения на емкостях:

$$\begin{aligned} i_{11} &= (\varphi_1 - \varphi_2 - E_{C11}) / (R_{11} + R_{C11}); & U_{C11} &= i_{11} \cdot R_{C11} + E_{C11}; & U_{C2} &= \varphi_2; \\ i_{22} &= (\varphi_2 - E_{C22}) / (R_{22} + R_{C22}); & U_{C22} &= i_{22} \cdot R_{C22} + E_{C22}. \end{aligned} \quad (2)$$

Циклическое использование формул (1), (2) позволяет шаг за шагом находить состояния схемы в каждый новый момент времени *на участке разряда*.

Для расчета участка разряда принимают: $E=0$; $R_e=R_p$, где R_p – величина разрядного сопротивления. Для расчета участка *восстанавливающегося напряжения*: $E=0$; $R_e=R_v$, где R_v – величина внутреннего сопротивления электрометра.

Выполним ряд расчетов схемы, включая три стадии: – длительную зарядку (60 с от единичного источника ЭДС с внутренним сопротивлением 10 Ом); – кратковременный разряд (в течение 2 с на резистор 5 кОм); – длительное наблюдение восстанавливающегося напряжения (в течение 500 с).

Зададимся постоянными времени клетчатки, например, $\theta_1=R_1 \cdot C_1=500$ с; $\theta_{11}=R_{11} \cdot C_{11}=500$ с. Постоянную времени слоя пропитки $\theta_2=R_2 \cdot C_2$ примем свободным параметром, изменяющимся от сотен секунд (в исходном состоянии пропитывающего состава) до единиц секунд (после длительного старения кабеля).

Пусть емкости слоев отличаются в 5 раз (например, $C_1=100$ пФ, $C_2=500$ пФ), а доля замедленных видов поляризации составляет 20 % от быстрых видов, т.е. $C_{11}=0,2C_1$. (Последнее предположение вытекает из того, что емкость БМИ возрастает примерно на 20% при переходе от переменного напряжения к постоянному).

На рис. 2 показаны результаты расчетов (рис. 2, а: по оси абсцисс – линейный масштаб, по оси ординат – полулогарифмический; рис. 2, б: по оси абсцисс и по оси ординат – логарифмические масштабы) – кривые восстанавливающегося напряжения при варьировании параметра θ_2 (кривая 1 – $\theta_2 = 80$; 2 – 40; 3 – 20; 4 – 10; 5 – 5; 6 – 2,5 с). Как видим, восстанавливающиеся напряжения изменяются по кривым с максимумами, причем момент t_m достижения максимума монотонно уменьшается по мере уменьшения θ_2 . Амплитуда восстанавливающегося напряжения сначала нарастает (при уменьшении θ_2 от 80 до 10 с), достигает наибольшего значения при $\theta_2 = 10$ с (что составляет 1/50

от постоянной времени первого слоя $\theta_1=500$ с), а затем уменьшается (когда θ_2 составляет менее, чем $\theta_1/50$).

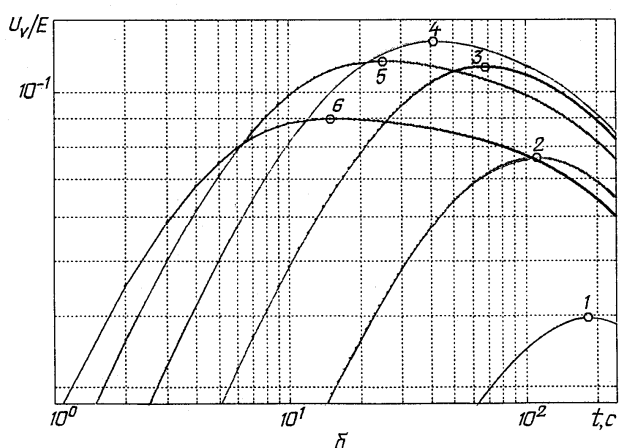
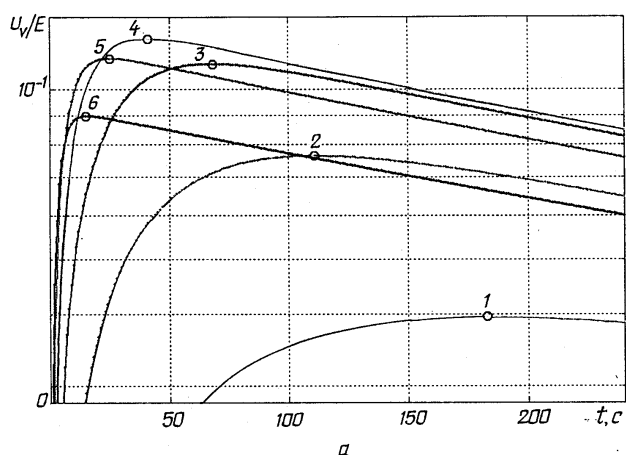


Рис. 2

рения изоляции: чем меньше наклон, тем более качественная изоляция. И, наоборот, чем больше наклон, тем менее качественная изоляция. *Постоянная времени саморазряда* $\theta=R \cdot C$ этого участка – т.е. время, в течение которого уровень U_v снижается в $e=2,71828\dots$ раз, определяется по наклону „хвоста” кривой восстанавливающегося напряжения (рис. 2, а).

Зная емкость C промежутка, находят сопротивление изоляции $R=\theta/C$. Особенностью этой характеристики изоляции является то, что она определяется при весьма низком остаточном напряжении – около 20 В, поэтому данную характеристику обозначим как R_{20} . При низких напряжениях не происходит активации примесей в изоляции, способных диссоциировать на ионы. Поэтому сопротивление R_{20} значительно выше того, которое определяется, скажем, при напряжении 2500 В – R_{2500} .

Отношение сопротивлений R_{20}/R_{2500} может быть также использовано в качестве меры *старенности* изоляции. Чем сильнее она состарена, тем больше в ней примесей, способных диссоциировать на ионы, тем выше будет отношение R_{20}/R_{2500} .

Таким образом, из кривой восстанавливающегося напряжения получают **три параметра**, по которым выполняется оценка технического состояния изоляции.

Симметричный характер кривых восстанавливающегося напряжения в двойном логарифмическом масштабе наблюдается не всегда. Если внутреннее сопротивление вольтметра недостаточно высоко (как в аппаратуре фирмы SEBA KMT, Германия), то будет наблюдаться «ускоренный» спад кривой в правой части графика, соответствующей большим временам наблюдения. В этом случае параметры «хвоста» саморазряда будут определяться с большой погрешностью.

В табл. 1 приведены результаты исследований образцов трехжильных кабелей с бумажно-масляной изоляцией в металлической оболочке в исходном состоянии и после дополнительного теплового старения при температуре 120°C в течение недели. Обследования выполнены по схемам:

Нарастание амплитуды восстанавливающегося напряжения при уменьшении постоянной времени θ_2 (от 80 до 10 с) связано с ростом различия диэлектрических свойств слоев, из-за чего на их границе накапливается все больший заряд. Уменьшение амплитуды восстанавливающегося напряжения при уменьшении постоянной времени θ_2 (ниже 10 с) связано с уменьшением падения напряжения на втором слое при росте его проводимости.

Параметры кривых восстанавливающегося напряжения кабелей с БМИ. В процессе старения БМИ кабелей происходит монотонное увеличение проводимости пропитки. Поэтому сначала наблюдается *рост* амплитуды восстанавливающегося напряжения U_m/E , а затем – *снижение*.

Как видим, знания одного параметра U_m/E недостаточно для однозначной оценки технического состояния БМИ. Требуется еще и фиксация второго параметра – момента достижения максимума t_m . В процессе старения изоляции наблюдается смещение этого параметра в область меньших значений времен (сравним кривые 1 и 6 рис. 2, б: значение t_m уменьшилось на порядок).

Анализ модельных кривых показывает, что наклон участка саморазряда кривых восстанавливающегося напряжения разный (рис. 2, а). Очевидно, он также является информативным параметром и связан с процессом старения

каждая из трех жил относительно всех остальных и металлической оболочки, соединенных вместе, обозначенными как: $r-s$, $g-s$, $y-s$; три жилы, соединенные вместе, относительно металлической оболочки, обозначенными как: $r, g, y-s$.

Таблица 1

Кабель	Схема обследования	ТЭТ, с	U_m/E	t_m
ААБнЛГ – 6 кВ – 3x150	$r-s$	889	0,1612	55
	$g-s$	833	0,1507	60
	$y-s$	910	0,1531	57
	$r, g, y-s$	1370	0,1756	64
ЦААБнЛГ – 6 кВ – 3x150	$r-s$	1008	0,1643	51
	$g-s$	889	0,1612	55
	$y-s$	792	0,1500	61
	$r, g, y-s$	1061	0,1772	54
После старения				
ААБнЛГ – 6 кВ – 3x150	$r-s$	1755	0,1041	43
	$g-s$	1208	0,1124	36
	$y-s$	820	0,1145	37
	$r, g, y-s$	2576	0,1173	42
ЦААБнЛГ – 6 кВ – 3x150	$r-s$	926	0,1104	36
	$g-s$	621	0,1134	39
	$y-s$	2033	0,1232	49
	$r, g, y-s$	1544	0,1269	39

Как видим, произошло снижение параметра t_m : с 64 до 42 с – для первого образца, с 54 до 39 с – для второго. Таким образом, экспериментально доказано положение об уменьшении параметра t_m в процессе старения кабелей.

На рис. 3 показаны результаты обследований образцов кабелей с БМИ в исходном состоянии: 1 – ААШв-1-3x120/SU-08; 2 – ААШв-6-3x150/SU-08; 4 – ААВнЛ-3-3x150/SU-08 – образцы с ОП ЮУАЭС; ААШв-1-3x150/Z-08 – образец с ОП ЗАЭС-08. По величине параметра t_m они находятся на разном удалении от критической области: ближе всего образец №4, дальше всего – №1.

Дальнейшая детализация параметров изоляционных промежутков кабелей с БМИ при низком и высоком напряжениях, представленная в табл. 2, действительно подтверждает более сильную состаренность изоляции образца №4: при переходе от 20 до 2500 В сопротивление его поясной изоляции снижается более, чем в 20 раз.

На рис. 4 показаны характеристики взаимных корреляционных зависимостей трех параметров восстанавливающегося напряжения обследованных кабелей в эксплуатации: нормированной амплитуды (U_m/E), момента максимума (t_m) и постоянной времени саморазряда (θ).

Кабели находятся на разных стадиях состаренности. Как видим, между амплиту-

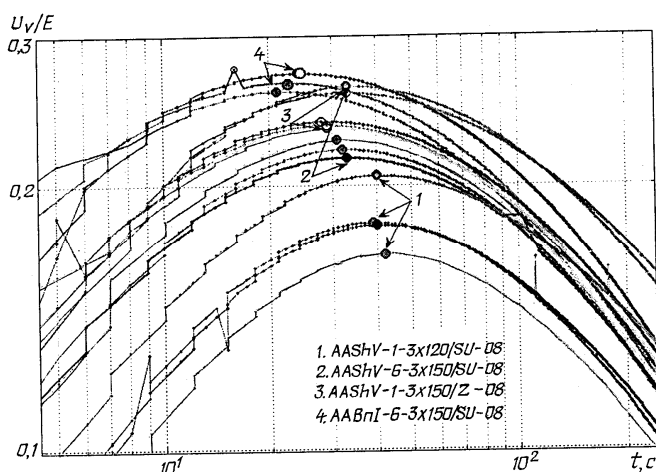


Рис. 3

дой и моментом максимума восстанавливающегося напряжения есть корреляционная связь: чем меньше t_m , тем больше U_m/E . Только при временах $t_m < 12$ с наблюдается снижение и амплитуды U_m/E . Постоянная времени саморазряда изоляции θ монотонно снижается с уменьшением момента максимума t_m . В области времен $t_m < 12$ с происходит резкое снижение постоянной времени. Поэтому значения параметра $t_m = 12$ с можно считать критическим для кабелей с БМИ. После достижения этого значения процессы деградации изоляции ускоряются.

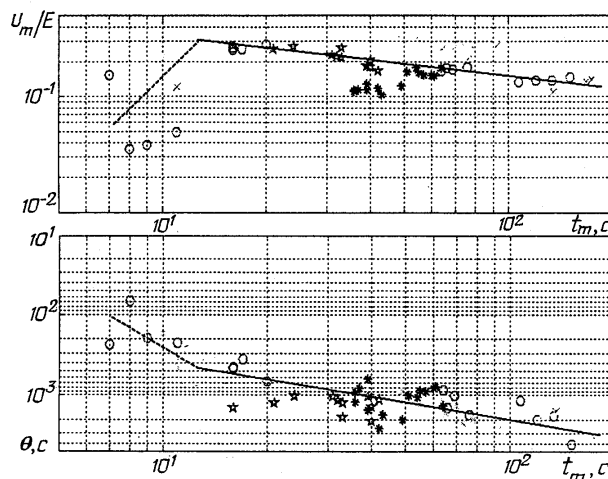


Рис. 4

Таблица 2

Образец кабеля	Схема обследования	C, пФ при 100 Гц	θ , с	R_{20} , ГОм	R_{2500} , ГОм	R_{20}/R_{2500}
1- AAShv-1- 3x120/SU-08	r-s	1582,0	1037,3	656	148	4,43
	g-s	1582,2	1131,3	715	155	4,61
	y-s	1577,5	1388,9	880	156	5,64
	r,g,y-s	2637,5	2137,2	810	91	8,90
2- AAShv-6- 3x150/SU-08	r-s	859,0	1170,4	1363	138	9,9
	g-s	889,5	1036,8	1166	143	8,2
	y-s	886,6	1257,4	1418	133	10,7
	r,g,y-s	1673,0	1888,0	1129	78	14,5
3 – AAShv-1- 3x150/Z-08	r-s	1040,78	839,48	807	144	5,60
	g-s	1076,88	1253,1	1164	150	7,76
	y-s	1027,19	1212,8	1181	158	7,47
	r,g,y-s	2023,8	2101,2	1038	71,1	14,6
4 - AABnl-3- 3x150/SU-08	r-s	798,88	1263,0	1581	131	12,1
	g-s	812,17	1027,3	1265	121	10,5
	y-s	805,81	1034,2	1283	129	10,0
	r,g,y-s	773,59	1423,0	1840	79	23,4

Наличие корреляционных связей между параметрами U_m/E , t_m и θ кривых восстанавливающегося напряжения кабелей с БМИ разной степени состаренности свидетельствует о том, что эти параметры связаны со структурой и старением диэлектрика и, возможно, с методикой измерения.

Выводы. 1. Предложено отмечать три параметра кривых восстанавливающегося напряжения для оценки технического состояния кабелей: амплитуду U_m/E , момент максимума t_m и постоянную времени саморазряда θ . Первый параметр – U_m/E – сначала растет в процессе старения БМИ, затем падает. Два других параметра монотонно снижаются в процессе старения, причем в области $t_m < 12$ с происходит резкое снижение и U_m/E , и θ , из-за чего эту область параметра t_m следует считать критической.

2. Момент достижения максимума t_m – наиболее информативный параметр технического состояния БМИ. Однако для корректного сопоставления результатов обследований надо выдерживать одинаковые режимы зарядки и разрядки кабеля.

3. По величине постоянной времени саморазряда θ определяется сопротивление R_{20} изоляционных промежутков кабелей – сопротивление при весьма малом остаточном напряжении на кабеле (около 20 В), при котором не происходит диссоциации полярных примесей в изоляции (продуктов ее термодеструкции). Сравнение величины этого сопротивления со значением R_{2500} , полученным при напряжении 2500 В, дает новый показатель степени состаренности изоляции R_{20}/R_{2500} .

4. Критические уровни параметров для БМИ следующие: момент максимума восстанавливающегося напряжения $t_m < 12$ с; амплитуда восстанавливающегося напряжения $U_m/E > 0,3$; отношение сопротивлений при 20 и 2500 В $R_{20}/R_{2500} > 30-50$.

1. Демирчян К.С., Нейман Л.Р., Коровкин Н.В., Чечурин В.Л. Теоретические основы электротехники / Учебник для вузов в 3-х томах – С-Пб.: Питер, 2003.– 463 с.

2. Канискин В.А. Неразрушающий экспресс-метод определения ресурса кабелей в условиях эксплуатации./ Тр. межд. н.-т. конф. “Электрическая изоляции – 99” С-Пб. политехн. ин-та – 1999. – С.99–100.

3. Койков С.Н. Перспективы развития неразрушающих методов диагностики электрической изоляции./ Тр. межд. н.-т. конф. “Электрическая изоляции – 99” С-Пб. политехн. ин-та – 1999. – С.12–13.

4. Система диагностики CD-31. Инструкция по эксплуатации. – Hagenuk KMT. Kabelmesstechnik GmbH, 2000. – 87 р.

5. Тареев Б.М. Физика диэлектрических материалов. – М: Энергия, 1973. – 328 с.

6. Nemeth E. The Fundamentals of Diagnostic Testing of Electrical./ Тр. межд. н.-т. конф. “Электрическая изоляции – 99” С-Пб. политехн. ин-та – 1999. – С.9–12.

7. Patrick J. Baird Non-Destructive Measurement of the Degradation of Transformer Insulating Paper // IEEE Transactions on Dielectrics and Electrical Insulation. – 2006. – Vol. 13. – №1. – Pp. 309–318.

Надійшла 08.04.2009.