

А.В.Беспрозванных, канд.техн.наук (Нац. техн. ун-т «ХПИ», Харьков)

СИЛЬНОЕ ЭЛЕКТРИЧЕСКОЕ ПОЛЕ И ЧАСТИЧНЫЕ РАЗРЯДЫ В МНОГОЖИЛЬНЫХ КАБЕЛЯХ

Выполнена оценка напряжения начала частичных разрядов (ЧР) в многожильных кабелях разной структуры. Для кабелей с плотной конструкцией напряжение определяется путем построения траекторий силовых линий в воздушных зазорах между изолированными жилами. В кабелях, для которых присущи большие объемы свободного пространства между жилами разных повивов, оценка напряжения начала ЧР выполняется по напряженности поля на поверхности изоляции жил.

Виконано оцінку напруги початку часткових розрядів (ЧР) у багатожильних кабелях різної структури. Для кабелів з щільною конструкцією напруга визначається за траєкторіями силових ліній у повітряних зазорах між ізолюваними жилами. В кабелях, для яких характерні великі об'єми вільного простору між ізолюваними жилами різних повивів, оцінка напруги початку ЧР виконується за напруженістю поля на поверхні ізоляції жил.

Введение. Сильным считается такое электрическое поле, при котором в изоляции возникают новые физические явления, до этого не свойственные [2,3]:

а) частичные разряды (ЧР) – пробой слабых мест, как правило, воздушных включений; возникающие при этом каналы разрядов ведут к интенсивной деструкции органических диэлектриков (ПЭ, ПВХ, ЭПР и др.), из-за чего ЧР не допустимы в полимерной изоляции;

б) инжекция зарядов в толщу сплошного твердого диэлектрика из электродов, приводящая к появлению объемных зарядов (ОЗ); ОЗ искажают распределение электрического поля в диэлектрике, приводя к повышению локальной напряженности в 5–8 раз (!). Это ведет к необратимым изменениям твердого диэлектрика – возникновению дендритов – древовидных каналов неполного пробоя;

в) электролюминесценция (ЭЛ) – свечение твердого диэлектрика в результате рекомбинации электронов, инжектируемых в диэлектрик из электродов, и дырок; дырки – участки приповерхностных слоев диэлектрика, с положительным избыточным зарядом, возникшим из-за ухода электронов на электроды.

Конструктивной особенностью многожильных кабелей (контрольных и силовых) является *неоднородность диэлектрика* в изоляционных промежутках между жилами, жилами и экраном. В контрольных кабелях между полимерной изоляцией жил есть воздушные щелеобразные зазоры (микрорапилляры), обладающие гигроскопическими свойствами (т.е. способностью поглощать водяные пары и низкомолекулярные продукты разложения изоляции из атмосферы). В силовых кабелях с бумажно-масляной изоляцией кроме микрон неоднородностей, обусловленных различием свойств клетчатки и пропитки, есть макрон неоднородности свойств фазной и поясной изоляции, межфазного заполнения. В силовых кабелях с полимерной изоляцией есть воздушные промежутки возле жилы, в межфазном пространстве.

Неоднородность диэлектрика приводит к тому, что указанные выше пороговые явления (ЧР, ОЗ, ЭЛ) начинаются значительно раньше, чем в сплошной однородной изоляции, т.е. при меньших напряжениях. Причиной тому является перераспределение поля, из-за чего на отдельных участках возникают повышенные падения напряжения и напряженность электрического поля. Так, если в сплошной полимерной изоляции образование зарядов начинается при напряженностях $E_{OЗ}=10-20$ МВ/м, то в воздушных зазорах – при напряженностях всего 2,1 МВ/м (пробивная напряженность воздуха в миллиметровом диапазоне толщин).

Цель статьи – условия возникновения сильного электрического поля в многожильных кабелях, т.е. напряжения, при котором в воздушных зазорах возникает *критическая напряженность* $E_{кр}$ либо критическое падение напряжения $U_{кр}$, достаточные для развития частичных разрядов.

Изоляционный промежуток между двумя жилами. Это наиболее простой случай, анализ которого поможет найти подходы к решению поставленной задачи для многожильных кабелей.

Между жилами введен небольшой зазор h , чтобы на первоначальном этапе таким способом избежать проблем, связанных с ростом погрешности вычислений для близко расположенных узлов.

Плотность поверхностных зарядов на границах раздела сред найдем в результате решения СЛАУ метода вторичных источников [4–6]

$$\bar{A} \cdot \bar{\sigma} = \bar{U}, \quad (1)$$

где $\bar{\sigma}$ – матрица-столбец неизвестных расчетных плотностей вторичных зарядов, Кл/м²; \bar{U} – матрица-столбец, первые N_e членов которой отражают заданные потенциалы узлов, лежащих на электродах, а остальные равны нулю; \bar{A} – квадратная матрица коэффициентов, элементы которой a_{ij} находятся по формулам, вытекающим из интегральных уравнений Фредгольма первого рода для узлов, лежащих на электродах, и второго рода – для узлов, лежащих на границе раздела диэлектрических сред (в данном случае изоляции жил и воздушных зазоров между ними)

$$a_{ij} = \begin{cases} \left. \begin{aligned} &\frac{1}{2\pi \varepsilon_0} \ln \frac{r_0}{r_{ij}} \cdot \Delta l_j && \forall i \neq j \\ &\frac{1}{2\pi \varepsilon_0} \ln \frac{r_0}{\Delta l_j / (2e)} \cdot \Delta l_j && \forall i = j \end{aligned} \right\} & i = 1 \div N_e \\ \left. \begin{aligned} &\frac{1}{2\varepsilon_0} && \forall i = j \\ &-\beta \cdot \frac{1}{2\pi \varepsilon_0} \cdot \frac{\cos(\bar{\mathbf{r}}_{ij}, \bar{\mathbf{n}}_i)}{r_{ij}} \cdot \Delta l_j && \forall i \neq j \end{aligned} \right\} & i = N_e + 1 \div N \end{cases}, \quad (2)$$

где i – номер узла, в котором ищутся характеристики поля; j – номер узла, в котором находится вторичный заряд; r_{ij} – расстояние до точки i от точки j ; r_0 – расстояние от точки i до достаточно удаленной точки, потенциал которой можно принять нулю (r_0 принимается равным 1 м); Δl_j – ширина полосок элементарных линейных зарядов на поверхностях жил и их изоляции; \mathbf{n}_i – единичный вектор нормали к границе раздела сред в точке i ; $\cos(\bar{\mathbf{r}}_{ij}, \bar{\mathbf{n}}_i)$ – косинус угла между векторами \mathbf{n}_i и \mathbf{r}_{ij} ;

$\beta = \frac{\varepsilon_2 - \varepsilon_1}{\varepsilon_2 + \varepsilon_1}$ – параметр, связанный с разностью диэлектрических проницаемостей по направлению

нормали к границе раздела сред; $\varepsilon_2, \varepsilon_1$ – относительные диэлектрические проницаемости сред на границе раздела в точке i по направлению нормали; ε_0 – электрическая постоянная; N_e – число узлов, лежащих на электродах; N_d – число узлов, лежащих на границах раздела диэлектрических сред; $N = N_e + N_d$ – общее число узлов.

Для узлов, расположенных на поверхности изоляции жил близко один от другого (когда $r_{ij} < \Delta l_j$), выбираем уточненную формулу, вытекающую из метода Боголюбова-Крылова для сетки K вспомогательных узлов на участке Δl_j :

Плотность вторичных зарядов σ во вспомогательных узлах принимается такой же, как и в основном узле. Порядок СЛАУ при этом остается прежним, но точнее вычисляются выражения вида

$\sum_{j^*=1}^K \frac{\cos(\bar{\mathbf{r}}_{ij^*}, \bar{\mathbf{n}}_i)}{r_{ij^*}} \cdot \Delta l_{j^*}$, в слагаемых которых быстро изменяются числители и знаменатели для близко

расположенных узлов i и j^* ($j^* = 1 \div K$).

После решения СЛАУ (1) напряженность электрического поля (нормальная составляющая) находится по формулам

$$E_{in} = \begin{cases} \sigma_i / \varepsilon_0, & i = 1 \div N_e \\ \sigma_i / (2\varepsilon_0) \cdot (1 + 1/\beta), & i = N_e + 1 \div N \end{cases}. \quad (3)$$

На рис. 1 показаны результаты расчета максимальной напряженности в зазоре между изолированными полиэтиленом (ПЭ) жилами от толщины зазора h при потенциале жилы 1 кВ, сечении жил 2,5 мм², толщине изоляции 0,6 мм и относительной диэлектрической проницаемости ПЭ изоляции $\varepsilon = 2,1$ (кривая 1 – расчетная, кривая 2 – экстраполированная).

При повышении напряжения на жиле от 1 кВ до 1,2 кВ пропорционально возрастет напряженность электрического поля в воздушном зазоре и достигнет критической величины $E_{кр}=2,1$ МВ/м, при которой воздух пробивается. Казалось бы, минимальное напряжение появления ЧР в промежутке «жила-жила» должно составлять $U_{нчр}=1,2$ кВ. В действительности, экспериментально наблюдаемые значения $U_{нчр}$ выше. Причина этого заключается в повышении электрической прочности малых воздушных промежутков из-за изменения характера пробоя. Для малых промежутков одной лавины электронов недостаточно, чтобы инициировать пробой. Требуется несколько лавин, а они появляются при

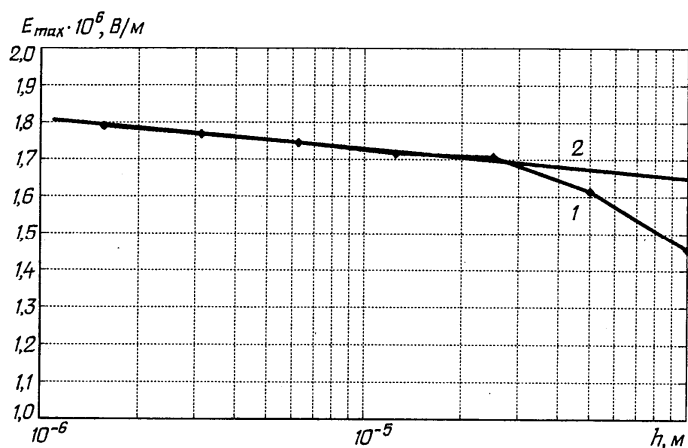


Рис. 1

большем напряжении – так называемый *многолавиновый* характер пробоя. Падение напряжения на зазоре толщиной $h=7$ мкм составляет всего $U=1,74$ В/мкм $\cdot 7$ мкм=12 В, что значительно меньше пробивного напряжения такого промежутка: $U_{пр}=220$ В (при нормальных условиях). Пробивная напряженность при этом равна $E_{пр}=U_{пр}/h=220/7=20-30$ В/мкм =20 – 30 МВ/м, что почти на порядок превышает критическую напряженность $E_{кр}=2,1$ МВ/м, характерную для больших воздушных промежутков (миллиметрового диапазона).

Поэтому воздушный зазор между изолированными жилами пробивается *не по*

пути наименьшего расстояния, а по той силовой линии, падение напряжения вдоль которой достигнет пробивного. Поскольку пробивное напряжение воздушных промежутков $U_{бр}$ зависит от их толщины (и давления воздуха – закон Пашена), то для нахождения той силовой линии, вдоль которой падение напряжения достигает величины, достаточной для развития пробоя, сравним падения напряжения вдоль разных силовых линий в зазоре между изолированными жилами. Для этого построим траектории силовых линий.

Компоненты вектора напряженности электрического поля в произвольной точке с координатами (x_k, y_k) находим путем суперпозиции (наложения) полей отдельных линейных зарядов

$$\begin{cases} E_x = \frac{1}{2\pi\epsilon_0} \sum_{j=1}^{j=N} \frac{\sigma_j}{r_{kj}^2} \cdot \frac{x_k - x_j}{r_{kj}} \\ E_y = \frac{1}{2\pi\epsilon_0} \sum_{j=1}^{j=N} \frac{\sigma_j}{r_{kj}^2} \cdot \frac{y_k - y_j}{r_{kj}} \end{cases} \quad (4)$$

Движение к следующей точке (x_{k+1}, y_{k+1}) вдоль силовой линии будем осуществлять по касательной. Для этого воспользуемся формулами, вытекающими из метода Рунге-Кутты

$$\begin{cases} x_{k+1} = x_k + \Delta l \cdot \cos \alpha_k \\ y_{k+1} = y_k + \Delta l \cdot \sin \alpha_k \end{cases} \quad (5)$$

где Δl – шаг движения вдоль силовой линии (приращение криволинейной координаты); α_k – средневзвешенный угол между вектором касательной к силовой линии и единичным вектором оси абсцисс; $\alpha_k = \frac{\alpha_{k1} + 2\alpha_{k2} + 2\alpha_{k3} + \alpha_{k4}}{6}$; $\alpha_{k1} - \alpha_{k4}$ – углы касательных к силовой линии, определяемые в начале, середине и конце каждого k -го шага Δl ;

$$\begin{aligned} \alpha_{k1} &= \arctg \frac{E_y(x_k, y_k)}{E_x(x_k, y_k)}, \\ \alpha_{k2} &= \arctg \frac{E_y(x_k + 0.5\Delta l \cdot \cos \alpha_{k1}, y_k + 0.5\Delta l \cdot \sin \alpha_{k1})}{E_x(x_k + 0.5\Delta l \cdot \cos \alpha_{k1}, y_k + 0.5\Delta l \cdot \sin \alpha_{k1})}, \\ \alpha_{k3} &= \arctg \frac{E_y(x_k + 0.5\Delta l \cdot \cos \alpha_{k2}, y_k + 0.5\Delta l \cdot \sin \alpha_{k2})}{E_x(x_k + 0.5\Delta l \cdot \cos \alpha_{k2}, y_k + 0.5\Delta l \cdot \sin \alpha_{k2})}, \end{aligned} \quad (6)$$

$$\alpha_{k4} = \arctg \frac{E_y(x_k + \Delta l \cdot \cos \alpha_{k3}, y_k + \Delta l \cdot \sin \alpha_{k3})}{E_x(x_k + \Delta l \cdot \cos \alpha_{k3}, y_k + \Delta l \cdot \sin \alpha_{k3})}$$

Для правильного определения углов, касательных к силовой линии, необходимо учитывать, в каком квадранте находится угол, т.е. принимать во внимание знаки числителя и знаменателя в выражениях вида $\alpha_k = \arctg(E_y / E_x)$. Если знаки числителя и знаменателя – положительные, угол – в первом квадранте; если отрицательные – в третьем квадранте; если числитель – положительный, а знаменатель отрицательный – второй квадрант, в противном случае – четвертый квадрант. Особые случаи, когда знаменатель – нулевой: тогда искомым углом равен «плюс» $\pi/2$, если числитель положительный, и «минус» $\pi/2$, если – отрицательный.

При построении силовых линий находятся их длины $SL = \sum_k \Delta l_k$ и падения напряжения $U(SL) = \sum_k E_{mk} \cdot \Delta l_k$. На рис. 2 показан ряд зависимостей $U(SL)$ при напряжениях 1, 2, 4 и 8 кВ для системы двух изолированных полиэтиленом (ПЭ) жил и пробивного напряжения U_{br} воздушного промежутка при нормальном давлении.

Как видно из рисунка, при напряжении около 4,2 кВ произойдет касание линий пробивного напряжения воздуха $U_{br}(SL)$ и падения напряжения $U(SL)$ вдоль силовой линии. Касание произойдет в точке, соответствующей силовой линии с длиной $SL = 2 \cdot 10^{-4} \text{ м} = 0,2 \text{ мм}$. Значит, именно вдоль этой линии и произойдет пробой воздушного промежутка. В случае изоляции жил, выполненной из поливинилхлоридного пластика (ПВХ), напряжение начала ЧР снижается и составляет около 2,8 кВ.

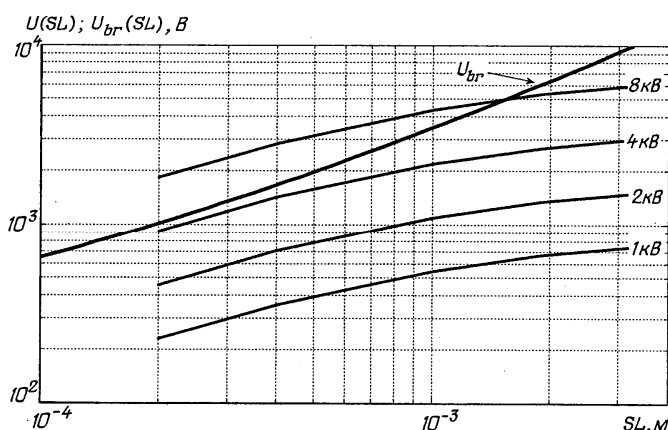


Рис. 2

Слои поверхностных загрязнений (продукты разложения изоляции) имеют повышенную диэлектрическую проницаемость, из-за чего напряженность поля в воздушном зазоре может сильно возрасти. Однако ширина области повышенной напряженности поля весьма мала, поэтому она чаще всего не захватывает область развития ЧР.

Таким образом, пробои воздушных промежутков между изолированными жилами сечением $2,5 \text{ мм}^2$, покрытых изоляцией из ПЭ или ПВХ, толщина которой равна радиусу жил, должны начинаться при напряжении 3 – 4 кВ (действующее значение). При этом пары воды, адсорбированные микрокапиллярами в зоне контакта изолированных жил, не должны влиять на напряжение начала ЧР, т.к. разряд развивается вдоль силовой линии, удаленной от зоны контакта. На условия возникновения ЧР не должно существенно влиять также сильное поле, возникающее в области контакта, т.к. пробивное напряжение малых воздушных зазоров существенно выше падения напряжения на них (при указанных выше потенциалах жил 3 – 4 кВ). Исключение возможно в случаях, когда в зоне контакта из-за сильного поля идет диссоциация частиц загрязнений (низкомолекулярных продуктов разложения изоляции) и генерируются заряженные частицы. Попадая в зону формирования лавин, они могут приводить к снижению напряжения ЧР.

Изоляционные промежутки пучка жил. Особенностью поля системы изолированных жил есть появление силовых линий, проходящих вдоль зоны контакта поверхностей соприкасающихся изоляций жил (силовая линия 1 на рис. 3).

Выполнив интегрирование падения напряжения вдоль отрезков силовых линий, расположенных в воздушных зазорах, сопоставим их с пробивным напряжением воздушных промежутков по Пашену (кривая U_{br} на рис. 2). Так, для пучка из 7 изолированных жил получаем длины отрезков для силовых линий: 1 – 0,74; 3 – 0,29 и 5 – 0,14 мм (рис. 3) и соответствующие им падения напряжения: 454, 291 и 172 В при потенциале центральной жилы 1 кВ и нулевом – остальных 6-ти жил. Оценка напряжения начала ЧР в системе изолированных жил получается такой же, как и в случае пары изолиро-

ванных проводов: $U_{нчр} = 4,2$ кВ. Качественное отличие заключается в том, что с ростом напряжения в системе пучка жил условие возникновения ЧР начинает выполняться и для тех силовых линий, которые проходят тангенциально к зоне контакта. При напряжении, несколько выше 4 кВ, произойдет касание кривых $U(SL)$ и $U_{бр}(SL)$. Пробои воздушных зазоров начнутся при напряжении $U_{нчр} = 4,2$ кВ при длинах силовых линий 150 – 300 мкм (силовые линии 3 и 5 рис. 3). При напряжении 6 кВ ЧР охватят область микрокапилляров между соприкасающимися поверхностями изоляции жил, когда длина силовой линии, охваченной разрядом, достигнет 700 – 800 мкм (силовая линия 1 рис. 3)

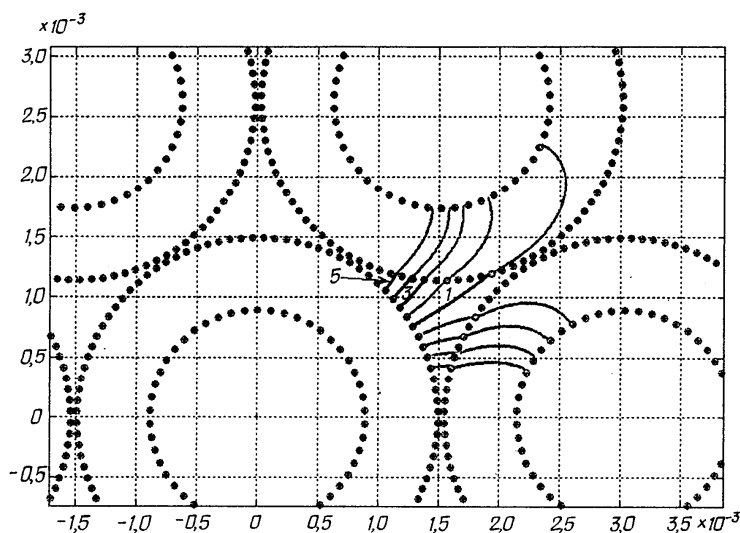


Рис. 3

изолированными жилами разных повивов. Из-за этого достаточно знать напряженность поля на поверхности изоляции жил, чтобы оценить напряжение начала ЧР. Действительно, вдоль изолированной жилы всегда найдется «большой» воздушный промежуток, падение напряжения на котором окажется наиболее близким к пробивному. Расчеты выполнены при единичных значениях потенциалов выбранных жил – 1 В. Пропорциональным пересчетом на уровень критической напряженности $E_{нчр} = 2,1$ МВ/м выполняется оценка напряжения начала ЧР.

В случае же кабелей с однонаправленной скруткой такой подход неприменим. Требуется рассчитывать траектории силовых линий в воздушных зазорах, падения напряжения на них и выбирать наиболее неблагоприятные ситуации, когда падение напряжения достигает пробивного.

При единичном потенциале жилы ($\varphi=1$ В) напряженность на поверхности изоляции превышает 1500 В/м = 1,5 кВ/м. Напряженность начала ЧР составляет $E_{нчр} = 2,1$ МВ/м. Следовательно, ЧР в кабеле начнутся при потенциале жилы $U_{нчр} = (2,1 \text{ МВ/м}) / (1,5 \text{ кВ/м}) * 1 \text{ В} = 1,4$ кВ. Пониженное напряжение начала ЧР в многоповивных кабелях разнонаправленной скруткой по сравнению с пучком жил однонаправленной скруткой или парой жил является следствием «распушенности» таких кабелей, из-за чего объем воздушных зазоров возрастает, вероятность неблагоприятного сочетания параметров «длина силовой линии – пробивное напряжение изоляционного промежутка» – увеличивается.

Расчеты показывают, что практически везде преобладают нормальные составляющие напряженности электрического поля на границах раздела сред E_n , поэтому тангенциальной E_t составляющей напряженности поля можно пренебречь. Сильная тангенциальная составляющая напряженности поля может появиться в трещинах изоляции. Появление таких трещин наиболее вероятно в изоляции жил внешних повивов многожильных кабелей. Изоляция этих жил при изогнутом кабеле находится периодически в растянутом, а периодически в сжатом состоянии. В растянутом – на тех участках, где жилы оказались на внешней стороне изогнутого кабеля; в сжатом – на внутренней стороне кабеля. В процессе старения кабеля изоляция жил теряет эластичность, становится жесткой. Растягивающее усилие приводит к появлению трещин. При наличии трещины силовые линии целиком расположены в воздухе. Напряженность поля на поверхности жил возрастает (сравни позиции 1 – случай нормального состояния жилы и 2 – при наличии трещины, рис. 4). Но остается меньше пробивной напряженности на поверхности здоровой части изолированной ПЭ жилы (позиция 3 рис. 4). Различие напряженностей поля усиливается в случае применения полярной изоляции жил, например, из ПВХ пластикатов.

Таким образом, при напряжении, несколько большем, чем напряжение начала ЧР, частичные разряды охватят зону отложений низкомолекулярных продуктов разложения (НМП) изоляции. Это может отразиться на характеристиках ЧР: частоте, фазе, кажущейся амплитуде. Следовательно, в пучке изолированных жил НМП могут быть обнаружены, но при напряжениях, больших напряжения начала ЧР.

Трехповивный многожильный кабель. В трехповивном кабеле направление скрутки жил второго повива противоположно направлению скруток жил первого и третьего повивов. Из-за этого плотность кабеля оказывается меньшей, чем в случае однонаправленной скрутки, а гибкость – больше. Разнонаправленная скрутка приводит к увеличению зазоров между

Таким образом, возникновение ЧР в микротрещинах маловероятно по двум причинам. Во-первых, из-за того, что напряженность поля на поверхности нормальных участков изоляции оказывается выше, а во-вторых, из-за затруднения развития лавинного разряда в микротрещинах.

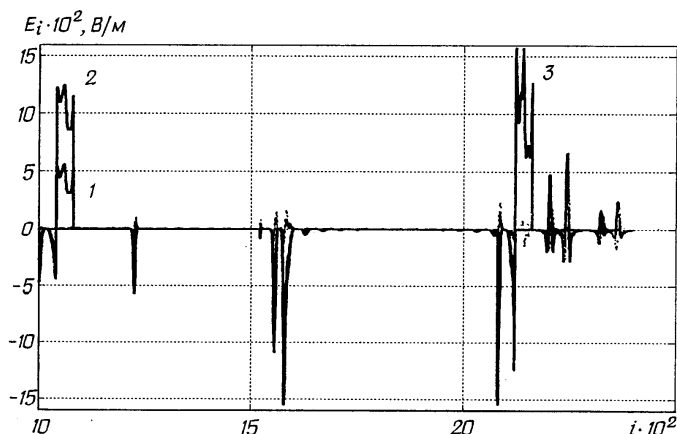


Рис. 4

чего дальнейшее повышение напряжения уже не приводит к сильным изменениям разрядных характеристик. Если ширина трещин меньше 0,1 мкм, они обладают гигроскопическими свойствами, т.е. поглощают пары воды и НМП из атмосферы. Повышенная напряженность поля в трещинах способствует их выявлению, на-пример, путем измерения тангенса угла диэлектрических потерь [1].

Заклучение.

1. Особенностью многожильных кабелей есть неоднородность изоляционных промежутков, содержащих твердый диэлектрик и воздушные зазоры. Напряженность электрического поля в малых воздушных зазорах (толщиной около 10 мкм) может возрасти в 2 и более раз по сравнению со средней напряженностью. Пробивная же напряженность малых воздушных зазоров выше, чем больших (толщиной около 1 мм), в 10–15 раз. Поэтому условия для пробоев воздушных зазоров (возникновения ЧР) появляются раньше не в местах наибольшей напряженности поля (микронных зазорах между соприкасающимися изолированными жилами), а вдоль тех отрезков силовых линий, падение напряжения на которых достигает пробивного значения.

2. Для многожильных кабелей с плотной упаковкой (кабели однонаправленной скрутки) напряжение начала ЧР определяется путем построения траекторий силовых линий в воздушных зазорах между изолированными жилами и определения падения напряжения на них. Условием возникновения ЧР является достижение падения напряжения на участке силовой линии в воздушном зазоре величины пробивного напряжения последнего.

3. Построение траекторий силовых линий в воздушных зазорах выполняется путем пошагового движения по направлению, определяемому как средневзвешенное значение углов 4-х касательных: в начале, середине и конце каждого k -го интервала. Весовые коэффициенты для углов, определенных в середине интервалов, в 2 раза больше, чем для крайних положений на интервале (метод Рунге-Кутты).

4. Для многожильных кабелей со свободной упаковкой (разнонаправленная скрутка повивов, парная скрутка с разными шагами), отличающихся большим объемом свободного пространства,

Выявления трещин в изоляции по характеристикам ЧР возможно только в случае грубых дефектов изоляции. Так, напряжение начала частичных разрядов в состаренном образце 14-жильного контрольного кабеля КПоСГ-14x2,5 ОП УЮАЭС-07 с полиэтиленовой изоляцией на 20–80 % меньше по сравнению с новым, что видно из показанных на рис. 5 интегральных функций распределения импульсов частичных разрядов. При повышении напряжения частота импульсов ЧР в состаренном образце растет медленнее, чем в новом [7–9]: активизация ЧР в трещинах начинается при низких испытательных напряжениях, из-за

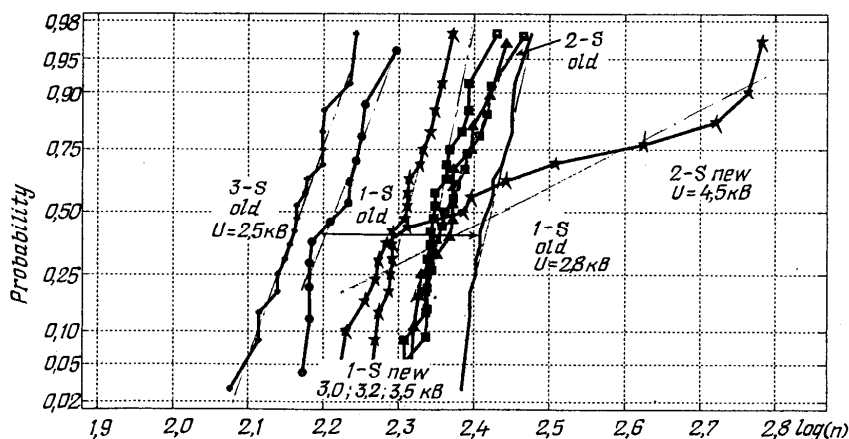


Рис. 5

оценку напряжения начала ЧР можно выполнить по напряженности поля на поверхности тех участков изоляции жил, которые соседствуют с крупными воздушными полостями.

5. Напряженность поля на поверхности изоляции (в воздушных зазорах) выше, чем на поверхностях жил. Это является результатом перераспределения напряженности за счет разных диэлектрических проницаемостей изоляции жил и межфазного пространства. Поэтому частичные разряды будут возникать именно в воздушных зазорах между изолированными жилами.

6. При потенциале на жиле 1 кВ максимальная напряженность в воздушных зазорах между жилами достигает 1,5 МВ/м. При потенциале жилы 1,4 кВ напряженность в зазорах достигнет величины 2,1 МВ/м, что достаточно для возникновения ЧР. Таким образом, в многожильных кабелях с полиэтиленовой изоляцией частичные разряды могут начинаться уже при напряжении 1,4 кВ.

7. В случае ПВХ изоляции жил ($\epsilon_2=4,2$) напряженность в воздушных зазорах кабеля достигает 2,8 МВ/м (при потенциале жил 1 кВ). Следовательно, напряжение начала ЧР в этом случае составит всего: $U_{нчр} = (2,1 \text{ МВ/м}) / (2,8 \text{ кВ/м}) * 1 \text{ В} = 750 \text{ В}$.

8. В случае появления трещин в изоляции напряженность на поверхности жил возрастает (в 1,5 – 2 раза в зависимости от типа изоляции), но остается ниже, чем на поверхности здоровых участков изоляции. Поэтому выявления трещин в изоляции по характеристикам ЧР возможно только в случае грубых дефектов.

9. Напряжения начала ЧР в контрольных кабелях в ряде случаев оказывается ниже испытательных напряжений (по крайней мере, для кабелей разнонаправленной скрутки). Поэтому измерения характеристик ЧР возможно при подаче испытательных напряжений, не опасаясь при этом повреждения здоровой изоляции жил кабелей.

1. *Беспрозванных А.В.* Диэлектрическое сканирование поперечной структуры многожильных кабелей методом совокупных измерений. // Техн. електродинаміка. – 2008. – № 3. – С. 30–37.

2. *Божко И.В., Петухов И.С., Ращепкин А.П.* О напряженности электрического поля начала частичных разрядов в твердой изоляции // Техн. електродинаміка – 2001. – № 5. – С. 18–23.

3. *Бржезицкий В.О., Сакова А.В., Рудаков В.В.* та ін. Техніка і електрофізика високих напруг. – Х.: НТУ «ХП», Торнадо, 2005. – 930 с.

4. *Колещицкий Е.С.* Расчет электростатических полей устройств высокого напряжения. – М.: Энергоатомиздат, 1983. – 158 с.

5. *Набока Б.Г.* Расчеты электростатических полей в электроизоляционной технике. – К: ИСДО, 1995. – 120 с.

6. *Набока Б.Г., Кононов Б.Т., Нечаус А.А.* Асимптотические характеристики и подобие электростатических полей соленоидов // Электротехніка і Електромеханіка. – 2003. – №2. – С. 96–101.

7. *Набока Б.Г., Беспрозванных А.В., Гладченко В.Я.* Методика измерения дифференциальных амплитудных спектров импульсов частичных разрядов // Электричество. – 1990. – № 11. – С. 71–74.

8. *Набока Б.Г., Беспрозванных А.В., Гладченко В.Я.* Диагностика высоковольтной изоляции с помощью многоканальных анализаторов. // Электричество. – 1991. – № 5. – С. 5–9.

9. *А.с. №1577524 SU A1 5G01R31/14.* Способ неразрушающего контроля конденсаторов с твердым диэлектриком / Набока Б.Г., Беспрозванных А.В., Гладченко В.Я., Малахов В.А.(СССР) – N4460048/24-21 // БИ. – 1990. – № 3.

Надійшла 30.03.2009