

УДК 614.8

Методика расчета напряженности электростатического поля в изоляции многожильных кабелей

С.В. Рудаков, доцент кафедры, доцент, канд. техн. наук¹

А.В. Богомолов, заместитель начальника центра, профессор, д-р техн. наук²

¹Национальный университет гражданской защиты, г. Харьков, Украина

²Государственный научно-исследовательский испытательный институт военной медицины, г. Москва

e-mail: serg_73@i.ua, a.v.bogomolov@gmail.com

Ключевые слова:

изоляция кабелей,
многожильный кабель,
метрология,
напряженность электростатического поля,
пожарная безопасность.

Изложен метод расчета напряженности электростатического поля, проникающего в изоляцию отдельных жил кабелей, позволяющий учесть частичное проникновение поля в изоляцию отдельных элементов кабеля, а, следовательно, снизить погрешность измерения напряженности поля, возникающую при таком влиянии полей. Это позволяет прогнозировать пожарную безопасность многожильных кабелей.

1. Введение

Анализ статистических данных показывает, что 20–25% пожаров в промышленно развитых странах вызвано неисправностью электротехнических изделий. Наиболее пожароопасны (более 60% общего числа пожаров, обусловленных неисправностью электроустановок) кабельные изделия [1, 2]. Для них характерно неблагоприятное сочетание наличия горючих материалов (электроизоляция, подушки, оболочки кабелей и т.п.) с возникновением в аварийных режимах эксплуатации источников зажигания (дуговые разряды, раскаленные и горящие частицы металла в зоне короткого замыкания, нагретые электрическим током токопроводящие жилы и детали арматуры и др.).

2. Особенности пожарной безопасности кабелей

При рассмотрении пожарной безопасности кабеля (провода) следует учитывать, что кабель — это не просто материал и даже не «сумма материалов», а сложная многокомпонентная конструкция с внутренними источниками теплоты, а в аварийных режимах эксплуатации — и с источниками зажигания. Поэтому испытания на пожарную безопасность и определение указанных выше характеризующих ее показателей (токсичность, дымообразующая способность и др.) нужно проводить не на материалах, применяемых в кабеле, а непосредственно на образцах кабелей.

Для повышения пожарной безопасности кабелей разработаны специальные рецептуры ПВХ-пластиков, предназначенных для изоляции, оболочек и внутреннего заполнения кабелей. Такие пластики характеризуются высокими значениями кислородного индекса, низкими значениями дымообразования и выделения хлористого водорода, а также пониженной токсичностью продуктов горения.

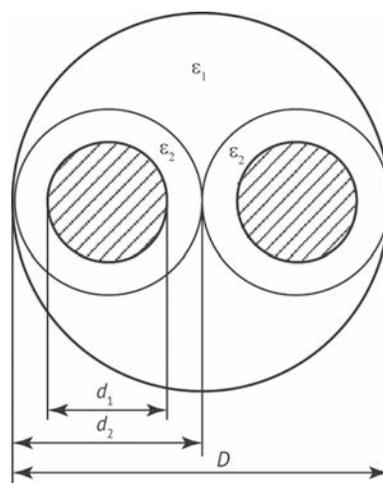


Рис. 1. Кабель двужильный (D — диаметр кабеля; d_1 — диаметр жилы кабеля, d_2 — диаметр оболочки жилы кабеля, ε_1 — диэлектрическая проницаемость межфазного заполнения, ε_2 — диэлектрическая проницаемость изоляции жил кабеля)

Своевременно выявленное отклонение параметров изоляции отдельного кабеля от нормативных значений обеспечивает надежное прогнозирование старения изоляции остальных кабелей, находящихся в одинаковых условиях эксплуатации, что способствует повышению их пожарной безопасности. Однако контролировать значения частичной емкости и угла диэлектрических потерь каждого из компонентов изоляции кабеля (полиэтилен, ПВХ-пластикат) по отдельности невозможно.

Экранированная витая пара содержит три электрода: две жилы и экран, что дает возможность создавать в ней разные структуры электрического поля, концентрируя его в основном в изоляции либо одной жилы, либо другой, либо в промежутке между ними (рис. 1).

Электроды из участка изоляции, который необходимо исключить из контроля, закорачиваются (соединяются между собой). Часть силовых линий при этом все-таки проникнет в закороченную часть изоляции, вызывая в ней диэлектрические потери и потери на сквозную проводимость.

3. Постановка задачи

Известные методы нахождения характеристик одного (искомого) компонента изоляции (частичные емкости и тангенс угла диэлектрических потерь) на фоне совокупных измерений — частотный, временной, пространственный [2–6] — не позволяют учесть частичное проникновение электромагнитного поля в изоляцию отдельных элементов кабеля, а, следовательно, и погрешность измерения, возникающую при таком влиянии полей [7–11]. Игнорирование погрешности измерения приводит к некорректному прогнозу сроков старения изоляции, что в свою очередь приведет к пробую, короткому замыканию и воз-

можному возгоранию кабеля. Для устранения этого недостатка разработан метод, основанный на результатах расчета электростатического поля.

4. Расчет электростатического поля

Для характеристики проникновения зондирующего поля в закороченную часть изоляции кабеля выполним расчет электростатического поля. Рассмотрим два вида испытательных схем (рис. 2): «две жилы — экран» и «жила — против второй жилы и экрана совместно».

Для расчета используем метод вторичных зарядов, т.е. от расчета поля в исходной задаче перейдем к расчету поля в вакууме. Расчетные модели содержат поверхности электромагнитного поля, совпадающие с границами раздела сред исходной задачи.

Для обеспечения идентичности поля модели и поля исходной задачи на поверхностях жил кабеля следует расположить заряды (вторичные заряды) и подобрать их плотность (σ , Кл/м²) так, чтобы на поверхностях модели, описывающих электроды (жилы кабеля), достигались заданные потенциалы, а на поверхностях, описывающих границы раздела диэлектрических сред, — выполнялись граничные условия равенства нормальных составляющих вектора электрического смещения. Испытуемый отрезок кабеля изогнут по форме окружности радиуса R_0 (именно в таком виде он помещается в испытательную камеру), поэтому его поле — осесимметричное.

С учетом изложенного система интегральных уравнений, используемых для расчета напряженности поля в заданных точках внутри изоляции каждой из жил, может быть представлена в следующем виде.

а) Для узлов, расположенных на поверхностях электродов, записываются интегральные урав-

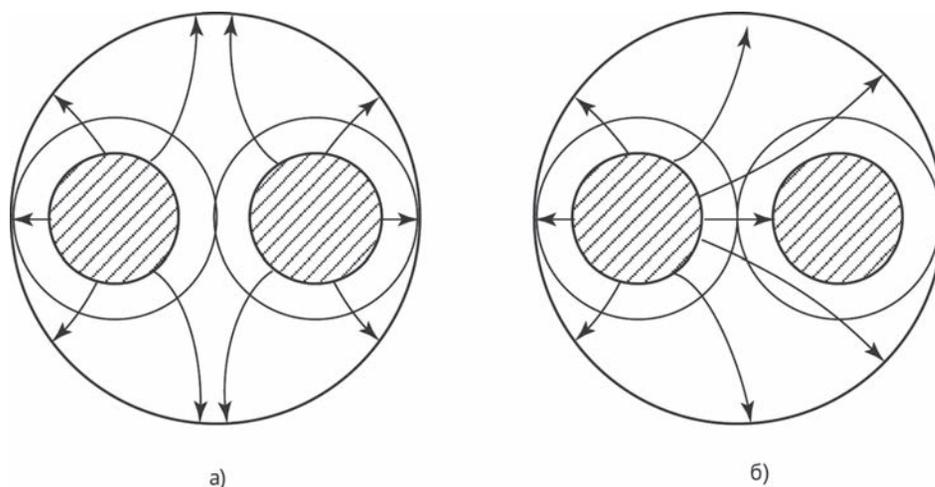


Рис. 2. Характер силовых линий поля при разных схемах испытаний:
а) «две жилы — экран»; б) «жила — против второй жилы и экрана совместно»

нения Фредгольма первого рода [7], отражающие условие неизменности нормальной составляющей вектора электрического смещения при переходе через эту границу:

$$\frac{1}{4\pi\epsilon_0} \int \frac{\sigma(M) \cdot 4R_M \cdot K(k) \cdot dl_M}{\sqrt{(Z_Q - Z_M)^2 + (R_Q + R_M)^2}} = \varphi(Q), \quad (1)$$

где $K(k)$ – полный эллиптический интеграл первого рода;

$$k = \sqrt{\frac{4R_Q R_M}{(Z_Q - Z_M)^2 + (R_Q + R_M)^2}} \text{ — составляющая эллиптического интеграла;}$$

R_Q, Z_Q — цилиндрические координаты точки Q , для которой рассчитывается значение потенциала ($\varphi(Q)$);

R_M, Z_M — цилиндрические координаты точки M , в которой расположен заряд;

dl_M — длина участка образующей с центром в точке M ;

$\sigma(M)$ — плотность вторичного заряда на этом участке (Кл/м²);

ϵ_0 — электрическая постоянная.

б) Для узлов, расположенных на границе раздела диэлектрических сред, записываются интегральные уравнения Фредгольма второго рода, отражающие условие неизменности нормальной составляющей вектора электрического смещения при переходе через эту границу:

$$\frac{\sigma(Q)}{2\epsilon_0} - \frac{\epsilon_2 - \epsilon_1}{\epsilon_2 + \epsilon_1} \int (n_R \cdot dE_R + n_Z \cdot dE_Z) = 0, \quad (2)$$

где n_R, n_Z — единичные векторы нормали к границе раздела диэлектрических сред ϵ_2 и ϵ_1 ;

ϵ_2 и ϵ_1 — относительные диэлектрические проницаемости сред, граничащих в точке Q со стороны отрицательного (ϵ_2) и положительного (ϵ_1) направления нормали;

dE_R, dE_Z — радиальная и осевая компоненты вектора напряженности поля, создаваемого в точке Q кольцевым зарядом из точки M :

$$dE_R = \frac{\sigma(M) \cdot dl_M}{4\pi\epsilon_0 R_Q} \sqrt{\frac{R_M}{R_Q}} k^2 \times \left\{ \frac{k}{2} K(k) \left(\frac{R_Q}{R_M} + 1 \right) - K'(k) \left[1 - \frac{k^2}{2} \left(\frac{R_Q}{R_M} + 1 \right) \right] \right\};$$

$$dE_Z = \frac{\sigma(M) \cdot dl_M}{4\pi\epsilon_0 R_Q} \cdot \frac{k^3 (Z_Q - Z_M)}{2\sqrt{R_Q R_M}} \left[K(k) + k \cdot K'(k) \right];$$

$K'(k)$ — производная полного эллиптического интеграла по параметру k .

Интегрирование уравнений (1) и (2) осуществляется по всем образующим кольцевых поверхностей осесимметричной модели.

Для получения численных значений выполним дискретизацию образующих и проведем нумерацию узлов сначала тех, которые относятся к электродам (узлы с номерами от 1 до N_e), а затем остальных N_d узлов, расположенных на границах раздела диэлектрических сред (их номера будут от $N_e + 1$ до $N = N_e + N_d$). Тогда уравнения (1) и (2) можно свести к системе линейных алгебраических уравнений вида:

$$A\sigma = U, \quad (3)$$

где A — квадратная матрица коэффициентов, элементы a_{ij} которой находятся по формулам, предложенным в [7, 12]:

$$\bar{A} \cdot \bar{\sigma} = \bar{U}$$

$$a_{ij} = \begin{cases} \left. \begin{array}{l} \frac{1}{4\pi\epsilon_0} \frac{4R_j \cdot K(k_{ij}) \cdot \Delta l_j}{\sqrt{(Z_i - Z_j)^2 + (R_i + R_j)^2}} \quad \forall i \neq j \\ \frac{1}{2\pi\epsilon_0} \ln\left(\frac{16R_j e}{\Delta l_j}\right) \cdot \Delta l_j \quad \forall i = j \end{array} \right\} i = 1 \div N_e \\ \left. \begin{array}{l} \frac{1}{2\epsilon_0} \quad \forall i = j \\ -\frac{\epsilon_2 - \epsilon_1}{\epsilon_2 + \epsilon_1} (n_R \cdot dE'_R + n_Z \cdot dE'_Z) \quad \forall i \neq j \end{array} \right\} i = N_e + 1 \div N, \end{cases}$$

dE'_R, dE'_Z — компоненты вектора напряженности, создаваемые единичным зарядом (плотностью 1 Кл/м²);

i, j — индексы точек, где ищутся характеристики поля (i) и расположены заряды (j);

σ — матрица-столбец неизвестных плотностей вторичных зарядов;

U — матрица-столбец, первые N_e членов которой — величины потенциалы узлов, расположенных на электродах, а остальные равны нулю.

В результате численного решения системы (3) определяются плотности искоемых вторичных зарядов электростатического поля в вакууме. Тогда напряженности электростатического поля рассчитывают по формулам:

а) для поверхностей электродов

$$E_i = \frac{\sigma_i}{\epsilon_0}, \quad (4)$$

б) для границ раздела диэлектрических сред (нормальная составляющая напряженности)

$$E_i = \frac{\sigma_i}{2\varepsilon_0} \left(1 \pm \frac{1}{\alpha}\right), \quad (5)$$

где $\alpha = \frac{\varepsilon_2 - \varepsilon_1}{\varepsilon_2 + \varepsilon_1}$.

Формула (4) следует из теоремы Гаусса–Остроградского для элементарного цилиндра, охватывающего узел, расположенный на поверхности электрода. Образующая этого цилиндра нормальна поверхности электрода, а оба основания — параллельны.

Формула (5) получается аналогично для узла, расположенного на границе раздела диэлектрических сред. В этом случае собственное поле элементарного заряда $\Delta\sigma$, попавшего в цилиндр, существует по обе стороны заряда, в результате напряженность поля уменьшается в 2 раза (см. первое слагаемое в (2) и соответственно число 2 в знаменателе (5)). Действие всех остальных зарядов, не попавших в цилиндр, отражается вторым слагаемым в (2) и численно равно собственному полю заряда $\Delta\sigma$, деленному на безразмерный коэффициент α . Знак «+» в (5) выбирается при нахождении поля со стороны положительного направления нормали к границе раздела сред, а «-» — со стороны отрицательного направления.

Рассмотрим напряженность поля в среде с меньшей диэлектрической проницаемостью, т.е. в воздухе. Здесь она наибольшая, к тому же именно эта среда «пробивается» электромагнитным полем в первую очередь. В дальнейшем определяли напряженность поля именно в воздушных прослойках изоляции, а поскольку векторы нормалей всех круговых границ раздела сред были ориентированы единообразно — наружу, то потребовалось ввести два знака в (5): первый знак выбирался, когда воздушная прослойка оказывалась снаружи круговой границы, второй — когда внутри.

Если число жил кабеля больше двух, то использование методики требует аналогичного составления и решения системы алгебраических уравнений большего порядка.

ЛИТЕРАТУРА

1. Рудаков С.В. Предотвращение чрезвычайных ситуаций на атомных станциях путем оценивания состояния изоляции кабельных изделий / С.В. Рудаков, С.В. Швец // Проблемы надзвичайних ситуацій. Зб. наукових пр. УЦЗУ. — 2008. — Вып. 8. — С. 146–156.
2. Шалыг Г.М. Определение мест повреждения в электрических цепях. — М.: Энергоатомиздат, 1992.
3. Беспрозванных А.В. Контроль параметров изоляции трехфазных кабелей методом косвенных / А.В. Беспрозванных, Б.Г. Набока, С.В. Рудаков // Вестник НТУ «ХПИ». — 2002. — Вып. 7. — Т. 1. — С. 103–108.

5. Результаты расчета напряженности поля

Степень проникновения поля характеризуется отношением энергии электростатического поля внутри изоляции закороченной жилы кабеля (W_2) к соответствующей величине для незакороченной жилы (W_1) (см. таблицу).

Таблица

Соотношение диэлектрической проницаемости сред в зависимости от толщины изоляции

Толщина изоляции жилы, ед.	Отношение диэлектрической проницаемости сред закороченной и незакороченной жилы ($\varepsilon_2/\varepsilon_1$)	
	1	2,1
0,5	0,134	0,157
1,0	0,0906	0,117
2	0,0616	0,086

Как видно из таблицы, энергия электростатического поля в изоляции закороченной жилы может составлять 0,0616–0,157 от энергии поля в изоляции незакороченной жилы. Для кабеля с полиэтиленовой изоляцией и типовым соотношением $\delta/R = 1$ величина $W_2/W_1 = 0,117 \approx 12\%$. Своевременно выявленное отклонение значений параметров изоляции отдельного кабеля от нормативных обеспечивает надежное прогнозирование старения изоляции остальных кабелей, находящихся в одинаковых условиях эксплуатации, что способствует повышению пожарной безопасности кабелей.

6. Заключение

Оценка относительной погрешности измерения напряженности поля в изоляции кабелей позволяет учесть влияние зондирующего электромагнитного поля при контроле параметров изоляции кабелей. Предложенный метод влияния зондирующего электростатического поля на погрешность результата контроля изоляции отдельных компонентов кабелей существенно повышает своевременность выявления отклонений значений параметров изоляции отдельного кабеля от нормативных за счет учета частичного проникновения зондирующего поля в изоляцию закороченной жилы при измерении частичных емкостей электродов кабеля.

4. Боев М.А. Техническая диагностика низковольтной полимерной изоляции / М.А. Боев // Труды Международной научно-технической конференции «Изоляции-99». — СПб., 1999. — С. 19, 20.
5. Методология экспериментальных исследований акустической эффективности средств индивидуальной защиты от шума в области низких частот / В.Н. Зинкин

- [и др.] // Информационно-измерительные и управляющие системы. — 2011. — Т. 9. — № 5. — С. 62–68.
6. Оценка ресурса высоковольтных конденсаторов по результатам испытаний на переменном напряжении / С.М. Бутко, В.В. Рудаков, Е.Е. Сергеева, С.В. Рудаков // Технічна електродинаміка. — 2012. — № 2. — С. 137–138.
 7. Набока Б.Г. Расчеты электростатических полей в электроизоляционной технике / Б.Г. Набока — Киев: ИСИО, 1995.
 8. Технология построения инерциально-спутниковой навигационной системы управления транспортными средствами с нейросетевой оптимизацией состава вектора измерений / В.Г. Макаренко, А.В. Богомолов, С.В. Рудаков, А.А. Подорожняк // Мехатроника, автоматизация, управление. — 2007. — № 1. — С. 39–44.
 9. Математическое обеспечение обработки рейтинговой информации в задачах экспертного оценивания / В.Е. Козлов, А.В. Богомолов, С.В. Рудаков, В.Т. Оленченко // Мир измерений. — 2012. — № 9. — С. 42–49.
 10. Рудаков И.С. Методика идентификации вида закона распределения параметров при проведении контроля состояния сложных систем / И.С. Рудаков, С.В. Рудаков, А.В. Богомолов // Информационно-измерительные и управляющие системы. — 2007. — Т. 5. — № 1. — С. 66–72.
 11. Метод поддержки принятия решений по управлению ресурсами при испытаниях авиационной техники / Л.В. Коломиец [и др.] // Информационно-измерительные и управляющие системы. — 2010. — Т. 8. — № 5. — С. 38–40.
 12. Рассеяние электромагнитной волны круглым идеально проводящим диском конечной толщины / И.О. Сухаревский, Г.С. Залевский, С.В. Нечитайло, О.И. Сухаревский // Электромагнитные волны и электронные системы. — 2010. — Т. 15. — № 2. — С. 42–47.

Calculation Method of Electrostatic Field Intensity in Insulation of Multicore Cables

S. V. Rudakov, Associate Professor of chair, Associate Professor, Ph.D. of Engineering; National University of Civil Protection, Kharkov, Ukraine

A.V. Bogomolov, Center Deputy Chief, Doctor of Engineering, Professor; State Science Research Institute, Moscow

Calculation method of electrostatic field intensity penetrating into insulation of cables' strands, allowing consider partial penetration of this field into insulation of cable's separate elements, and, therefore, to lower the field intensity measurement error, arising at such influence of fields is stated. It allows predict fire safety of multicore cables.

Keywords: cable insulation, multicore cable, metrology, electrostatic field intensity, fire safety

Энергоэффективные световые решения сократили потребление электричества в два раза

Компания *Philips* провела модернизацию систем освещения в пяти школах пяти городов России в рамках программы «Здоровые школы — разумные решения»: Москве, Ростове-на-Дону, Санкт-Петербурге, Волгограде и Сочи. Световой аудит, проведенный в московской школе до и после установки, доказал, что энергоэффективные световые решения сократили потребление электричества в два раза.

В школах световые решения были бесплатно заменены в классах, коридорах и рекреациях. Все установленное освещение отвечает современным стандартам качества — лампы с высокой цветопередачей и долгим сроком службы, светильники снабжены специальной оптикой, что гарантирует необходимую равномерность распределения света. В московской школе в учебных кабинетах была установлена система управления освещением с датчиками контроля освещенности и движения, а также предусмотрена подсветка рабочих досок. Теперь яркость светильников может изменяться автоматически в зависимости от естественного освещения помещения или же настраиваться вручную с помощью дистанционного пульта управления. Подобные системы позволяют максимально использовать дневной свет, что позволяет сократить энергозатраты до 30% и благоприятно сказывается на поведении и успеваемости учеников.

Исследование, проведенное в Германии, доказало, что у детей в классных кабинетах с правильно настроенным освещением скорость чтения увеличилась на 35%, количество ошибок сократилось на 45%, а поведение во время занятий стало более спокойным.

«Замена освещения в школах сопровождается образовательной программой, которая позволяет привлечь внимание детей к необходимости заботиться об окружающей среде и собственном здоровье, — говорит Питер ван Беркель, вице-президент и глава сектора «Световые решения» *Philips* в России и СНГ. — Инициатива *Philips* также способствует выполнению госпрограммы энергосбережения и повышения энергоэффективности в российских школах. Установка современных световых решений сокращает расходы на электроэнергию почти в два раза, что особенно важно для таких социальных институтов, как образовательные учреждения».