

Таким образом, разработанная математическая модель позволяет прогнозировать вольт-амперные характеристики контактов металл-полупроводник с барьером Шоттки, с учетом многозарядных примесных центров, формирующих в запрещенной зоне полупроводника глубокие энергетические уровни. Результаты моделирования хорошо согласуются с известными из литературы экспериментальными данными. Разработанная математическая модель может быть использована в системах автоматизированного проектирования элементов интегральных микросхем.

БИБЛИОГРАФИЧЕСКИЙ СПИСОК

1. *Стриха В.И., Бузанева Е.В., Радзиевский И.А.* Полупроводниковые приборы с барьером Шоттки. – М.: Советское радио, 1974. – 248 с.
2. *Король А.Н., Носенко И.В.* Резко нелинейная вольт-амперная характеристика структуры с квантовой ямой, встроенной в обедненный слой барьера Шоттки // Физика и техника полупроводников. – 2010. – № 4. – С. 497–500.
3. *Ремнев М.А., Катеев И.Ю., Елесин В.Ф.* Влияние спейсерных слоев на вольт-амперные характеристики резонансно-туннельного диода // Физика и техника полупроводников. – 2010. – № 8. – С. 1068–1073.
4. *Богданов С.А., Захаров А.Г., Котов В.Н.* Моделирование распределения потенциала в барьерах Шоттки транзистора с металлической базой // Нано- и микросистемная техника. – 2007. – № 4. – С. 45–47.
5. *Богданов С.А., Захаров А.Г., Лытюк А.А.* Моделирование распределения потенциала в барьерах Шоттки с учетом краевых эффектов // Нано- и микросистемная техника. – 2011. – № 5. – С. 12–15.
6. *Богданов С.А., Захаров А.Г., Писаренко И.В.* Влияние многозарядных примесных центров на распределение потенциала в приповерхностной области полупроводника [Электронный ресурс] // Инженерный вестник Дона. – 2013. – № 1. – Режим доступа: <http://www.ivdon.ru/magazine/archive/n1y2013/1530> (доступ свободный) – Загл. с экрана.
7. *Зи С.М.* Физика полупроводниковых приборов. – М.: Энергия, 1973. – 656 с.

Статью рекомендовал к опубликованию д.ф.-м.н., профессор А.И. Жорник.

Богданов Сергей Александрович – Федеральное государственное автономное образовательное учреждение высшего профессионального образования «Южный федеральный университет»; e-mail: bogdanov_sa@mail.ru; 347928, г. Таганрог, пер. Некрасовский, 44; тел.: 88634371663; кафедра физики; к.т.н.; доцент.

Bogdanov Sergey Aleksandrovich – Federal State-Owned Autonomy Educational Establishment of Higher Vocational Education “Southern Federal University”; e-mail: bogdanov_sa@mail.ru; 44, Nekrasovsky, Taganrog, 347928, Russia; phone: +78634371663; the department of physics; cand. of eng. sc.; associate professor.

УДК 621.315.2/075.8

М.Н. Дубяго

МАТЕМАТИЧЕСКАЯ МОДЕЛЬ ОБЪЕМНОЙ ИЗОЛЯЦИОННОЙ СТРУКТУРЫ С МНОЖЕСТВОМ ВКЛЮЧЕНИЙ

Рассмотрены вопросы создания системы прогнозирования остаточного ресурса изоляции силовых кабельных линий. Особое внимание уделено анализу неразрушающих методов испытаний изоляции и определения остаточного ресурса кабельных изделий в условиях эксплуатации. Показано, что применяемые ранее методы диагностики ненадежны, так как неизвестны точные соотношения между результатами испытаний и основными процессами в электрической изоляции кабелей. Целью данной работы является повышение эффективности методов диагностики изоляции, не сокращающих срока ее службы.

Диагностика изоляции; неразрушающий метод; частичные разряды.

M.N. Dubyago

MATHEMATICAL MODEL OF THE VOLUME INSULATING STRUCTURES WITH THE SET OF INCLUSIONS

Questions of system of forecasting of a residual resource of isolation of power cable lines are considered. The special attention is paid to the analysis of nondestructive test methods of isolation and definition of a residual resource of cable products under operating conditions. It is shown that methods of diagnostics applied earlier are unreliable since exact ratios between results of tests and the main processes in electric isolation of cables are unknown. The purpose of this work is to improve the diagnostic methods of its isolation irreducible its lifetime.

Isolation diagnostics; nondestructive method; partial categories.

Введение. Решение задач продления эксплуатационного ресурса силового электроэнергетического оборудования приводит к необходимости внедрения эффективных методов диагностики его изоляции. Техническое состояние изоляции определяется наличием, интенсивностью и распределением частичных разрядов (ЧР) [1], которые возникают в малоразмерных включениях, диэлектрическая проницаемость и электрическая прочность которых отличаются от характеристик основной изоляции.

Анализ предметной области. Во включении происходит серия ЧР, детерминированно связанных с напряженностью электрического поля в ее окрестности $E_1(x, y, z)$ и параметрами изоляции [2]. С ЧР связан разрядный ток, образующий элементарный диполь Герца. Время протекания тока ЧР составляет 10^{-8} – 10^{-9} с, диапазоном частот ЭМИ до 10^{10} Гц. Элемент тока ЧР $i_0(t)$ является функцией времени, координат (x, y, z) , размера включения, стационарной составляющей $E_1(x, y, z)$ и электрофизических характеристик включения диэлектрической проницаемости ϵ и пробивной напряженности $E_{пр}$. Преобразование Фурье функции $i_0(t)$ есть $I_0(j\omega)$. Для дефектного включения с координатами (x, y, z) суммарный спектр тока ЧР образуется пакетом единичных ЧР числом $N(E_1(x, y, z))$ на множестве моментов времени $\{\tau_k\}$:

$$F(j\omega) = \sum_{k=1}^N I_{ok}(x, y, z, E_1(x, y, z), j\omega).$$

В точке наблюдения (x_0, y_0, z_0) электрическую составляющую спектра ЭМИ получаем либо суммированием по всем включениям с учетом весовой функции комплексного пространственного коэффициента передачи, отражающей граничные условия, $h(x_0, y_0, z_0, x_1, y_1, z_1, j\omega)$:

$$E_{ЭМИ}(x_0, y_0, z_0, j\omega) = \sum_{i=1}^{N_p} h(x_0, y_0, z_0, x_1, y_1, z_1, j\omega) F_1(j\omega),$$

либо интегрированием по всему объему с учетом объемной концентрации включений $C(x, y, z)$.

Таким образом, при старении изоляции появляются новые газовые включения, а также изменяются ее электрофизические характеристики. Возникающие ЧР ускоряют процесс старения, и процесс развивается как цепная реакция. Такие явления, накладываясь друг на друга, приводят к местным перегревам, приводящим к повышению интенсивности ЧР и увеличению общей мощности излучения.

Выбор решения о состоянии системы. Принятие оптимальных решений о состоянии системы с учетом помех, ошибок измерений, флуктуаций параметров имеет статистическую основу и включает следующие этапы:

- ◆ восстановление по наблюдаемому вектору параметров системы $\mathbf{X} = (f_1, f_2, \dots, f_N)^T$ (f_i – компоненты вектора параметров, $i = 1, 2, \dots, N$) апостериорной многомерной совместной функции плотности распределения (ФПР) этих параметров по каждому состоянию A_s , $(\mathbf{P}(\mathbf{X}/A_s))$, A – область состояний в пространстве параметров, $S = 1, 2, \dots, S$, S – число (алфавит состояний);
- ◆ разрешение многоальтернативной гипотезы о нахождении системы в одном из состояний, например по критерию максимума апостериорной ФПР $\mathbf{P}(\mathbf{X}/A_s) = \max$ или набору попарных классификаций – дихотомий (коэффициенту правдоподобия).

Этот подход трудно реализовать из-за отсутствия статистики по предаварийным и аварийным состояниям. Учитывая эту специфику диагностирования оборудования и требования непрерывности контроля, можно восстанавливать ФПР по доступной статистике одного известного состояния – штатного режима работы контролируемого объекта. Это также связано с техническими трудностями, поэтому для целей диагностики проще восстановить границы R замкнутой области известного состояния A_s – контур равновероятной ФПР [2]

$$\mathbf{P}(\mathbf{X}/A_s) = \text{const.} \quad (1)$$

Тогда решение о состоянии системы сводится к введению метрики – «расстояния d » – в пространстве параметров и контролю нахождения текущего вектора параметров \mathbf{X}^T внутри границ этой области:

$$d(\mathbf{X}, \mathbf{m}_A) \leq R_A, \mathbf{X} \in A, \quad (2)$$

где \mathbf{m}_A – вектор «центра» области A ; R_A – характерный объем области, граница.

Для более тонкой оценки внутри области (кластера) можно использовать детализацию, например функции «конкурентного сходства» (FRiS-функции) [2].

Формирование контура равновероятной плотности $\mathbf{P}(\mathbf{X}/A_s) = \text{const} = 0$ как графического решения уравнения (1) в форме сечения двухмерной ФПР $\mathbf{P}(\mathbf{X})/\alpha$ плоскостью x_1 - 0 - x_2 (α – параметр ФПР, x_1 и x_2 – компонентные векторы), в котором осуществляется гауссова аппроксимация неизвестного контура равновероятной плотности, показано на рис. 1. Требование замкнутости областей гарантирует надежность контроля известного состояния в условиях неизвестного числа состояний. Априорную неопределенность – неизвестность границ искомой области – можно исключить, восстанавливая границы по доступным выборкам известного состояния, например с помощью рекуррентных алгоритмов стохастической аппроксимации, хорошо подходящих для реализации непрерывного контроля, определяя и сохраняя в памяти параметры области [2]. Аналогичным образом по известной обучающей выборке любого предаварийного или аварийного состояния можно построить границы его области в пространстве выбранных параметров. Такой подход позволит в режиме обучения по выборкам спектров известных состояний восстанавливать неизвестные границы областей этих состояний, а в режиме контроля осуществлять принятие решений по (2). Если условию (2) удовлетворяют несколько пересекающихся областей – состояний, решение принимается по $\min d$.

Определение ресурса изоляции. Ресурс электрической изоляции отличается от срока службы, поэтому важно знать наработку кабеля и остаточный ресурс [3]. Ресурс изоляции существенно зависит от температуры и, подчиняясь закону Аррениуса, выражается следующей зависимостью:

$$\tau_p = A_T \cdot e^{W_a/KT}, \quad (1)$$

где W_a – энергия активизации; K – постоянная Больцмана; E – абсолютная температура.

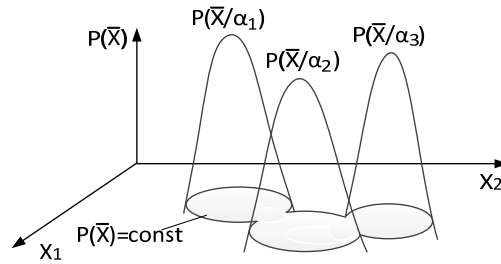


Рис. 1. Контур равновероятной плотности $P(X/A_s) = 0$

Зависимость ресурса изоляции от напряженности поля E выражается соотношением

$$\tau_p = A \cdot E^{-n}, \quad (2)$$

где n – показатель степени, зависящий от изоляции, рода и величины воздействующего напряжения (область начальных или критических ЧР).

Зависимость ресурса изоляции от напряженности поля и температуры T выражается следующей формулой:

$$\tau_p = A_3 E^{-n} \cdot e^{W_a/KT}. \quad (3)$$

В полимерах, не имеющих микротрещин и газовых включений, ЧР не регистрируются, в этих случаях старение диэлектриков определяется процессами образования объемных зарядов, инжектированных в диэлектрик с поверхности электродов. Инжектированные носители зарядов захватываются ловушками, концентрация которых достигает 10^{21} 1/см³, а их энергия более 1 эВ. Время релаксации объемных зарядов на мелких ловушках достигает десятков микросекунд, а на глубоких доходит до 10^3 – 10^5 с.

Возникновение объемного заряда в полимерах и усиление напряженности поля на его границах приводят к появлению и развитию субмикротрещин, снижению электрической прочности – одной из форм электрического старения (В.Я. Ушаков, 1988 г.). В процессе механического разрушения твердых тел происходит разрыв межатомных связей, которые характеризуются энергией активизации, в результате чего за счет тепловых флуктуаций отдельные атомы приобретают энергию, во много раз превышающую средние значения. Механическое напряжение σ приводит к снижению энергии активизации. Это явление лежит в основе термофлуктуационной теории механического разрушения диэлектриков, при этом долговечность изделия определяется следующей зависимостью:

$$\tau = \tau_0 \exp\left(\frac{W_a - \alpha_\sigma \cdot \sigma}{KT}\right), \quad (4)$$

где τ_0 и α_σ – постоянные, характеризующие механическую прочность материала; W_a – энергия активации разрушения.

Согласно термофлуктуационной теории электрического старения и разрушения диэлектриков, непосредственный разрыв нейтральных дипольных молекул под действием сил электрического поля в поляризованном диэлектрике практически невозможен. Когда происходит ионизация молекулы, возникают местные механические возмущения, неоднородности структуры, тогда энергия связи резко снижается. Это приводит к разрыву макромолекул в полимерах под действием сильного электрического поля. Накопление числа разорванных связей приводит к появлению субмикротрещины, тогда ресурс изоляции определится как

$$\tau_p = \tau_{po} \exp\left(\frac{W_a - \alpha_E \sigma}{KT}\right), \text{ или } \tau_p = \tau_{po} \exp\left(\frac{W_a - \alpha'_E \sigma}{KT}\right), \quad (5)$$

где τ_{po} и α_E – постоянные, характеризующие ресурс материала.

Образование субмикро- и микротрещин в полимерных конструкциях приводит к зарождению дендрита и пробоя. Применение (1)–(5) в условиях эксплуатации требует отбора образцов, что является разрушением кабеля, определения параметров, входящих в эти формулы, с последующим вычислением ресурса кабеля.

Таким образом, неразрушающий метод в момент испытания кабеля не подвергает его старению и не выводит из строя, а результаты испытаний дают информацию о наработке и остаточном ресурсе. Необходим поиск информативного параметра, который связан непосредственно с ресурсом кабеля, но метод его получения является неразрушающим. Определив корреляционные зависимости этих параметров и информативный параметр, можно диагностировать состояние кабеля в условиях эксплуатации, т.е. его наработку и остаточный ресурс.

Метод отклика напряжения. Информацию о фактической электрической прочности E_{np} изоляции кабеля в условиях эксплуатации можно получать косвенно и постоянно неразрушающим методом [3]. Чувствительным к ухудшению изоляции является метод поляризации с очень большими постоянными времени.

Диэлектрическими параметрами, оценивающими состояния изоляции, являются:

а) при переменном напряжении – диэлектрические потери ($tg\delta$) и емкость (относительная диэлектрическая проницаемость ϵ_r) при 50 Гц и очень низких частотах;

б) при постоянном напряжении – измерение токов утечки (токовый отклик) при заряде или при разряде изоляции кабеля, т.е. определение активной I_a и реактивной составляющей I_p токов; – измерение отклика напряжения изоляции кабеля, т.е. зависимостей напряжения саморазряда $U_d(t)$ и восстанавливающегося напряжения $U_r(t)$ от времени. По измеренным параметрам, характеризующим состояние изоляции, рассчитываются коэффициенты абсорбции, коэффициенты дисперсии, соотношение емкостей и сопротивлений, измеренных в разное время. По этому методу измеряются зависимости напряжения саморазряда $U_d(t)$ – спадающего напряжения и восстанавливающегося напряжения $U_r(t)$ (рис. 1). Первоначальные участки зависимостей $U_d(t)$ и $U_r(t)$ и наклоны касательных S_d и S_r используются как параметры, характеризующие состояние изоляции кабелей, т.к. имеем:

$$S_d = \gamma \cdot E / \epsilon_0, \quad (6) \quad S_r = \beta \cdot E / \epsilon_0, \quad (7)$$

где γ – удельная электропроводность изоляции кабеля; β – величина интенсивности поляризации, которая определяется как

$$\beta = \sum_{k=1}^n \frac{\alpha_k}{T_k}, \quad (8)$$

т.е. прямо пропорциональна интенсивностям α элементарных поляризационных процессов с постоянными времени $T_1 \dots T_n$, которые определяются измеряемыми параметрами t_c и временем разряда. Протекание процессов увлажнения и термического старения бумажно-масляной изоляции определяется методом переменного или постоянного тока измерением $tg\delta$, по току или вольт-отклику изоляции [3]. Влажность увеличивает проводимость изоляции и приводит к изменению $tg\delta$, который увеличивается, коэффициенты абсорбции K_A уменьшаются. Термическое старение увеличивает интенсивность поляризации при очень больших постоянных времени ($T > 1c$). Старение изоляции сопровождается увеличением $tg\delta$. Поляризационный ток I_p (ток релаксации) и наклон S_r восстанавливающегося напряжения более чувствительны к термическому старению, а ток проводимости I_c и угол наклона S_d напряжения саморазряда – к увлажнению.

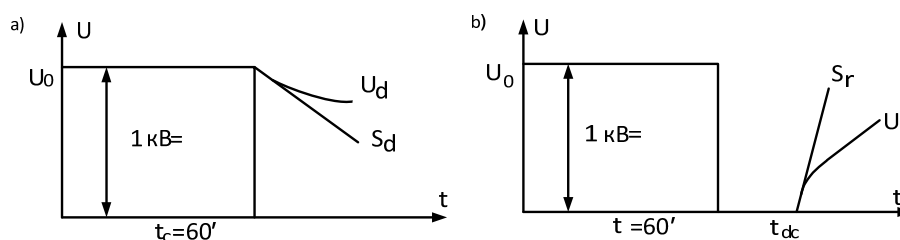


Рис. 2. Метод отклика напряжения в изоляции кабеля: а – U_d – напряжение саморазряда, S_d – касательная; б – U_r – напряжение восстановления, S_r – касательная

Термическое старение изоляции увеличивает интенсивность поляризации, а увлажнение влияет на проводимость. При термостарении $tg\delta$, поляризационный ток I_p и восстанавливающееся напряжение (S_r) увеличиваются. Величина U_{rm} так же, как и $tg\delta$, мало чувствительна к ухудшению изоляции по сравнению с касательными к напряжению и зависит от интенсивности процессов старения и увлажнения в разной мере, так как они изменяются в противоположных направлениях, что в итоге может привести к малому суммарному изменению U_r и $tg\delta$.

Заключение. Измерение сопротивления изоляции $R_{из}$, полной проводимости, тангенса угла диэлектрических потерь $tg\delta$, характеристик частичных разрядов (ЧР), которые непосредственно не связаны с ресурсом кабеля, может показать значительные отклонения от нормы только в предпробивной период, когда началось интенсивное разрушение изоляции и кабель скоро выйдет из строя. Электрофизическим процессом, несущим информацию о качестве изоляции при эксплуатации оборудования под напряжением, являются электрические разряды, определяемые наличием, интенсивностью и распределением частичных разрядов. Сбор и обработка данных мониторинга технического состояния изоляции осуществляется автоматизированной системой [4].

БИБЛИОГРАФИЧЕСКИЙ СПИСОК

1. Дубяго М.Н., Полуянович Н.К. Метод селекции сигналов ЧР с помощью Вейвлет-преобразований // Известия ЮФУ. Технические науки. – 2013. – № 2. – С. 99-104.
2. Гаркуша В.В. и др. Интегрированная система мониторинга состояний высоковольтного оборудования в рабочих режимах. Информационные технологии в управлении техническими системами и техническими процессами. – Новосибирск, 2009.
3. Боев М.А. и др. Эксплуатация силовых электрических кабелей. Ч. 2. Диагностика силовых кабелей и определение остаточного ресурса в условиях эксплуатации: Учебное пособие. – СПб., 2001.
4. Патент РФ № 112525 (от 10.01.2012), МПК H02N 3/00. Автоматизированная система диагностики и контроля состояния изоляции силовых кабельных линий / Полуянович Н.К., Стульнева А.В., Дубяго М.Н. // БИ №1, 2012.

Статью рекомендовал к опубликованию д.ф.-м.н., профессор А.А. Лаврентьев.

Дубяго Марина Николаевна – Федеральное государственное автономное образовательное учреждение высшего профессионального образования «Южный федеральный университет»; e-mail: w_m88@mail.ru; 347928, г. Таганрог, пер. Некрасовский 44; тел.: 89508519304; кафедра электротехники и мехатроники.

Dubyago Marina Nikolaevna – Federal State-Owned Autonomy Educational Establishment of Higher Vocational Education “Southern Federal University”; e-mail: w_m88@mail.ru; 44, Nekrasovsky, Taganrog, 347928, Russia; phone: +79508519304; the department of electric technics and mechatronics.