

АНАЛИЗ УСТОЙЧИВОСТИ МЕТОДИКИ ВОССТАНОВЛЕНИЯ ПАРАМЕТРОВ СХЕМЫ ЗАМЕЩЕНИЯ ТРЕХФАЗНОГО КАБЕЛЯ ПО РЕЗУЛЬТАТАМ КОСВЕННЫХ ИЗМЕРЕНИЙ

д.т.н. Б.Г. Набока, к.т.н. А.В. Беспрозванных, С.В. Рудаков

Параметры фазной и поясной изоляции кабелей - емкость C и тангенс угла диэлектрических потерь $\text{tg } \delta$ - можно найти методом побочных измерений путем решения систем алгебраических уравнений. Анализ погрешностей, которые при этом возможны, предлагается выполнять путем математического моделирования с применением генераторов случайных чисел.

1. В трёхфазных кабелях с фазной и поясной изоляцией параметры указанных видов изоляции – емкость и тангенс угла диэлектрических потерь – недоступны для непосредственного контроля. Однако их можно найти методом косвенных измерений.

Так, для схемы замещения рис. 1 (1, 2, 3 – жилы кабеля; 4 – экран

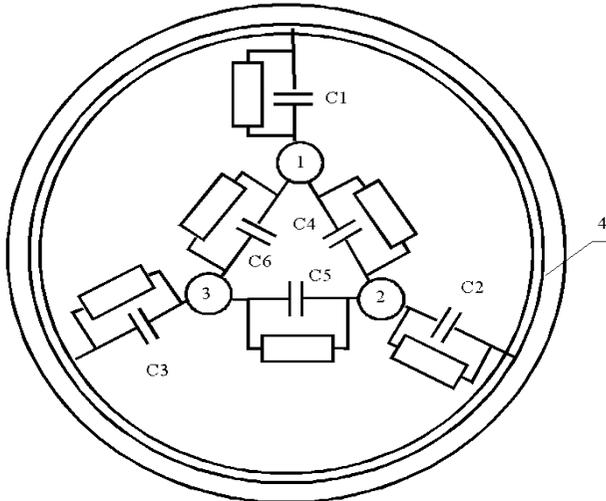


Рис. 1. Схема замещения трехфазного кабеля с фазной и поясной изоляцией

(броня); сопротивления, подключенные параллельно частичным емкостям, отражают потери энергии в компонентах изоляции кабеля) следует выполнить 6 измерений, закорачивая каждый раз некоторые из частичных емкостей, например, по схеме, приведенной в табл. 1.

Схема измерений частичных емкостей
с закорачиванием некоторых из них

№ опыта	Номера электродов, подключенных к <i>первому</i> зажиму моста	Номера электродов, подключенных ко <i>второму</i> зажиму моста	Код опыта
1	1, 2	3, 4	a
2	3, 2	1, 4	b
3	1, 3	2, 4	c
4	1, 2, 4	3	d
5	2, 3, 4	1	e
6	1, 3, 4	2	f

2. Представим результаты измерений емкостей в матричной форме

$$\mathbf{Ac} \cdot \mathbf{C} = \mathbf{CE}, \quad (1)$$

где

$$\mathbf{Ac} = \begin{pmatrix} 1 & 1 & 0 & 0 & 1 & 1 \\ 0 & 1 & 1 & 1 & 0 & 1 \\ 1 & 0 & 1 & 1 & 1 & 0 \\ 0 & 0 & 1 & 0 & 1 & 1 \\ 1 & 0 & 0 & 1 & 0 & 1 \\ 0 & 1 & 0 & 1 & 1 & 0 \end{pmatrix}; \quad \mathbf{C} = \begin{pmatrix} C_1 \\ C_2 \\ C_3 \\ C_4 \\ C_5 \\ C_6 \end{pmatrix}; \quad \mathbf{CE} = \begin{pmatrix} C_a \\ C_b \\ C_c \\ C_d \\ C_e \\ C_f \end{pmatrix};$$

\mathbf{Ac} - матрица долевых вкладов частичных емкостей в результирующую емкость каждого опыта; \mathbf{C} - матрица-столбец неизвестных частичных емкостей; \mathbf{CE} - матрица-столбец измеренных значений емкостей.

Результаты измерений тангенсов углов диэлектрических потерь представим аналогично:

$$\mathbf{Atg} \cdot \mathbf{TG} = \mathbf{GE}, \quad (2)$$

где

$$\mathbf{Atg} = \begin{pmatrix} \frac{C_1}{C_1+C_2+C_5+C_6} & \frac{C_2}{C_1+C_2+C_5+C_6} & 0 & 0 & \frac{C_5}{C_1+C_2+C_5+C_6} & \frac{C_6}{C_1+C_2+C_5+C_6} \\ 0 & \frac{C_2}{C_2+C_3+C_4+C_6} & \frac{C_3}{C_2+C_3+C_4+C_6} & \frac{C_4}{C_2+C_3+C_4+C_6} & 0 & \frac{C_6}{C_2+C_3+C_4+C_6} \\ \frac{C_1}{C_1+C_3+C_4+C_5} & 0 & \frac{C_3}{C_1+C_3+C_4+C_5} & \frac{C_4}{C_1+C_3+C_4+C_5} & \frac{C_5}{C_1+C_3+C_4+C_5} & 0 \\ 0 & 0 & \frac{C_3}{C_1+C_3+C_4+C_5} & 0 & \frac{C_5}{C_3+C_5+C_6} & \frac{C_6}{C_3+C_5+C_6} \\ \frac{C_1}{C_1+C_4+C_6} & 0 & 0 & \frac{C_4}{C_1+C_4+C_6} & 0 & \frac{C_6}{C_1+C_4+C_6} \\ 0 & \frac{C_2}{C_2+C_4+C_5} & 0 & \frac{C_4}{C_2+C_4+C_5} & \frac{C_5}{C_2+C_4+C_5} & 0 \end{pmatrix};$$

$$\mathbf{TG} = \begin{pmatrix} \mathbf{TG}_1 \\ \mathbf{TG}_2 \\ \mathbf{TG}_3 \\ \mathbf{TG}_4 \\ \mathbf{TG}_5 \\ \mathbf{TG}_6 \end{pmatrix}; \quad \mathbf{CE} = \begin{pmatrix} \mathbf{TG}_a \\ \mathbf{TG}_b \\ \mathbf{TG}_c \\ \mathbf{TG}_d \\ \mathbf{TG}_e \\ \mathbf{TG}_f \end{pmatrix}.$$

Решая систему линейных алгебраических уравнений (1), найдем частичные емкости, а из (2) - соответствующие тангенсы углов диэлектрических потерь.

3. Погрешности, которые при этом возникают, оценим следующим методом.

1) Зададимся произвольными параметрами частичных емкостей, близкими к реальным, т.е. выберем $C_1, C_2, C_3, C_4, C_5, C_6$ и соответствующие тангенсы углов диэлектрических потерь: $\mathbf{tg}\delta_1, \mathbf{tg}\delta_2, \mathbf{tg}\delta_3, \mathbf{tg}\delta_4, \mathbf{tg}\delta_5, \mathbf{tg}\delta_6$. Назовем эти данные *исходными*.

2) Рассчитаем по исходным данным параметры схемы, доступные для непосредственного измерения, т.е. $C_a, C_b, C_c, C_d, C_e, C_f$ и соответствующие тангенсы углов диэлектрических потерь: $\mathbf{tg}\delta_a, \mathbf{tg}\delta_b, \mathbf{tg}\delta_c, \mathbf{tg}\delta_d, \mathbf{tg}\delta_e, \mathbf{tg}\delta_f$. Получим *модельные* результаты измерений.

3) С помощью генераторов случайных чисел внесем возмущения в модельные данные, например, мультипликативным способом:

$$\begin{aligned} \tilde{C}_a &= C_a(1 + e_a); \quad \tilde{C}_b = C_b(1 + e_b); \quad \tilde{C}_c = C_c(1 + e_c); \\ \tilde{C}_d &= C_d(1 + e_d); \quad \tilde{C}_e = C_e(1 + e_e); \quad \tilde{C}_f = C_f(1 + e_f); \end{aligned}$$

где $e_a - e_f$ - случайные числа (помехи) с нулевым математическим ожиданием и заданным размахом. Так, для нормально распределенных случайных чисел размах будет определяться дисперсией, для равномерно распределенных случайных чисел - интервалом неопределенности и т.д.

Аналогично внесем возмущения и в результаты "измерений" тангенсов углов диэлектрических потерь. Получим *возмущенные* модельные значения:

$$\tilde{\mathbf{tg}}\delta_a, \tilde{\mathbf{tg}}\delta_b, \tilde{\mathbf{tg}}\delta_c, \tilde{\mathbf{tg}}\delta_d, \tilde{\mathbf{tg}}\delta_e, \tilde{\mathbf{tg}}\delta_f.$$

4) По возмущенным модельным данным восстановим исходные данные, решая уравнения (1) и (2). Получим *восстановленные* данные:

$$\begin{aligned} C_{av}, C_{bv}, C_{cv}, C_{dv}, C_{ev}, C_{fv}; \\ \mathbf{tg}\delta_{av}, \mathbf{tg}\delta_{bv}, \mathbf{tg}\delta_{cv}, \mathbf{tg}\delta_{dv}, \mathbf{tg}\delta_{ev}, \mathbf{tg}\delta_{fv}. \end{aligned}$$

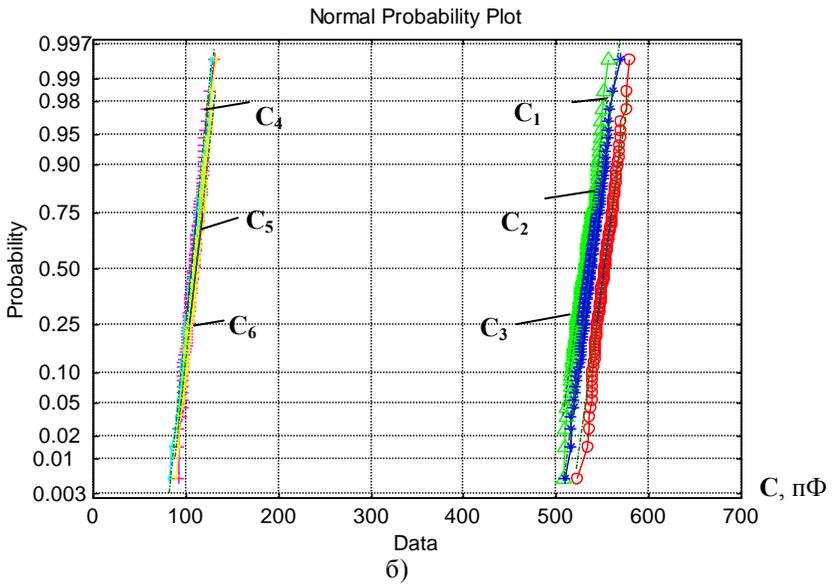
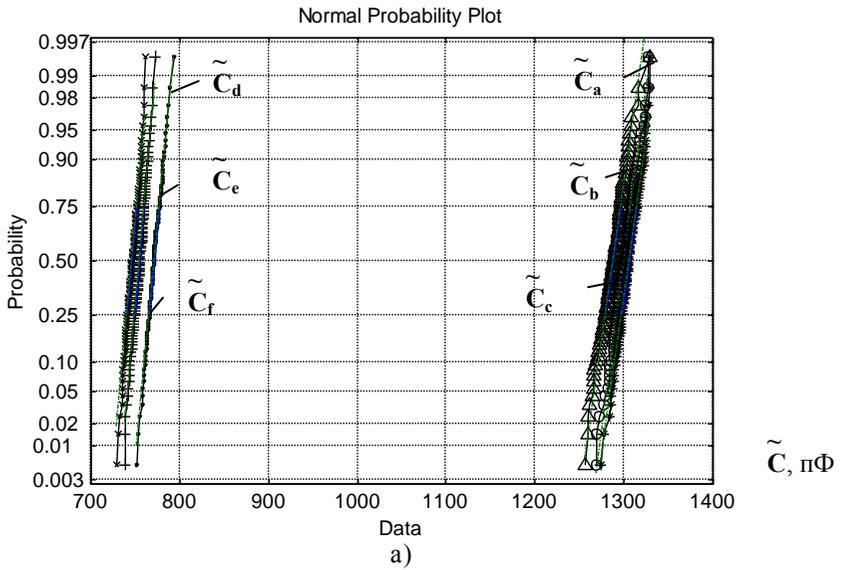


Рис. 2. Интегральные функции распределения:
 а) результатов измерений емкостей $C_a, C_b, C_c, C_d, C_e, C_f$, возмущенных помехой;
 б) частичных емкостей $C_1, C_2, C_3, C_4, C_5, C_6$, восстановленных по возмущенным данным

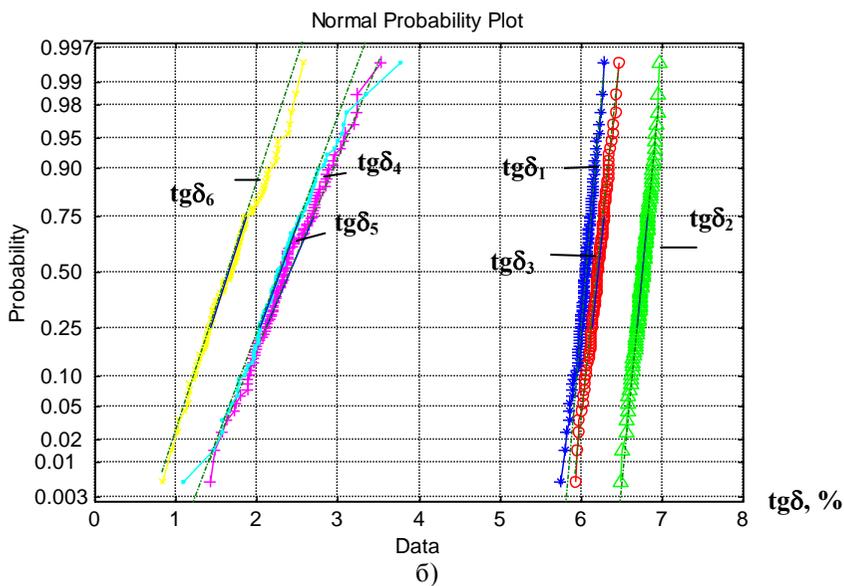
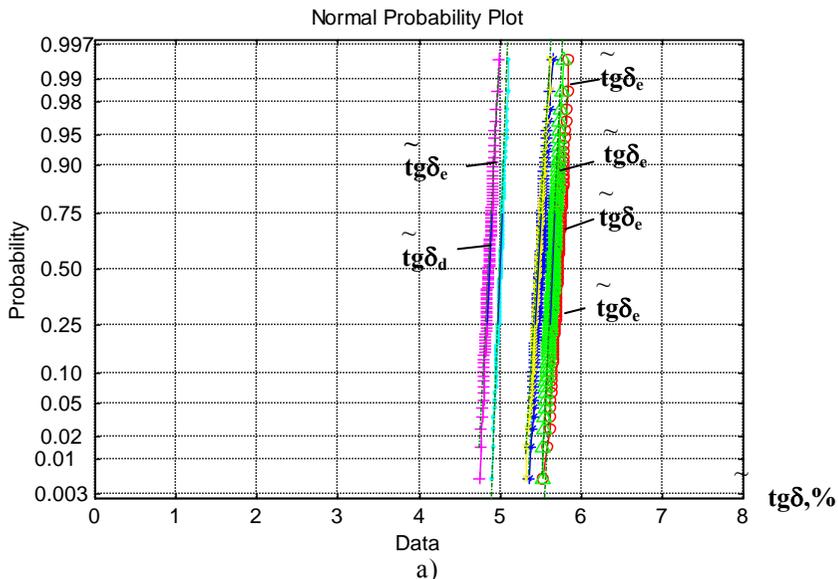


Рис. 3. Интегральные функции распределения:
 а) результатов измерений $\text{tg}\delta_a$, $\text{tg}\delta_b$, $\text{tg}\delta_c$,
 $\text{tg}\delta_d$, $\text{tg}\delta_e$, $\text{tg}\delta_f$, возмущенных помехой;
 б) параметров $\text{tg}\delta_1$, $\text{tg}\delta_2$, $\text{tg}\delta_3$, $\text{tg}\delta_4$, $\text{tg}\delta_5$, $\text{tg}\delta_6$,
 восстановленным по возмущенным данным

5) Сравнивая восстановленные данные с исходными, найдем погрешность методики. Расчеты по пунктам 1 – 5 выполним много раз, чтобы изучить статистические свойства схемы испытаний кабеля.

При наличии реального образца кабеля проверку устойчивости методики восстановления параметров частичных емкостей путем решения (1) и (2) можно выполнить аналогично. При этом вместо модельных данных по п. 2 будем использовать реальные результаты обследований кабеля.

4. На рис. 2, а приведены интегральные функции распределения (ИФР) *результатов измерений*, подверженных действию нормально распределенной случайной помехи со среднеквадратичным отклонением $\sigma_{\epsilon} = 0,01 = 1\%$. Как и следовало ожидать, ИФР, построенные в функциональном масштабе нормального закона распределения, изображаются прямыми линиями. Экспериментальные значения емкостей **Ca, Cб, Cс, Cd, Ce, Cf** (результаты измерений отрезка шахтного кабеля 3 x 95 мм² с изоляцией из поливинилхлоридного пластика) видны на уровне вероятности 0,5. Они составили 1301,33; 1287,12; 1304,51; 756,34; 772,42 и 747,52 пФ.

На рис. 2, б представлены ИФР *восстановленных значений* частичных емкостей. Относительная погрешность восстановления емкостей C1 – C3 составила при этом 1,8 - 2,2 %, а емкостей C4 - C6 - 7,1 - 7,7 %. Другими словами, погрешность конечных результатов возросла в 2 - 7 раз по сравнению с исходными результатами измерений.

На рис. 3, а, б представлены аналогичные ИФР для тангенсов углов диэлектрических потерь. Здесь погрешность восстановления еще выше: от 1,5 % для $\text{tg}\delta_1 - \text{tg}\delta_3$ до 14 – 18 % для $\text{tg}\delta_4 - \text{tg}\delta_6$, что в 1,5 - 15 раз выше погрешности исходных данных.

Таким образом, восстановление параметров частичных емкостей по (1), (2) связано с резким возрастанием погрешности. Соответственно растут требования к точности исходных данных.

Поступила 24.04.2002

НАБОКА Борис Григорьевич, докт. техн. наук, профессор кафедры изоляционной и кабельной техники Национального технического университета «ХПИ». В 1973 году окончил ХПИ. Область научных интересов – диагностика электрической изоляции.

БЕСПРОЗВАННЫХ Анна Викторовна, канд. техн. наук, доцент кафедры изоляционной и кабельной техники Национального технического университета «ХПИ». В 1980 году окончила ХПИ. Область научных интересов – исследование изоляции электрических кабелей.

РУДАКОВ Сергей Валерьевич, ассистент кафедры метрологии и стандартизации Харьковского военного университета. В 1996 году окончил ХВУ. Область научных интересов – задачи обработки информации по результатам измерений.