

МОДЕЛИРОВАНИЕ КОРОНЫ И ПРОВОДОВ МНОГОВОДНЫХ ЛИНИЙ

И.Р. Пивчик

1. Модель короны из четырех ветвей с1, r2, r3, с3, g. Представлена модель короны для численных расчетов уравнений линий электропередачи. В системе расчетной линии электропередачи уравнений функция $\Phi\left(\frac{\partial u_e}{\partial t}, u_e\right) = \Phi_e$ отображает ток короны в точке e. Эту функцию можно представить:

$$\Phi_e = \begin{pmatrix} \Phi_{e1} \\ \Phi_{e2} \\ \dots \\ \Phi_{em} \end{pmatrix} = \begin{pmatrix} i_{kor1} \\ i_{kor2} \\ \dots \\ i_{kor3} \end{pmatrix} = \begin{pmatrix} \Phi_{e1}\left(\frac{\partial u_{e1}}{\partial t}, u_{e1}\right) & 0 & \dots & 0 \\ 0 & \Phi_{e2}\left(\frac{\partial u_{e2}}{\partial t}, u_{e2}\right) & \dots & 0 \\ \dots & \dots & \dots & \dots \\ 0 & 0 & \dots & \Phi_{em}\left(\frac{\partial u_{em}}{\partial t}, u_{em}\right) \end{pmatrix} \quad (1)$$

Для моделирования процесса коронирования использована физическая модель, состоящая из параллельных ветвей r_k, C_k (рис. 1). Параметры параллельных ветвей модели находятся из условия равенства суммарной емкости и проводимости модели и нелинейных дополнительных $\Delta C, \Delta G$ емкости и проводимости линии.

$$j\omega_v C_1 + \sum_{k=1}^{n-1} \left(r_k + \frac{1}{j\omega_v C_k} \right)^{-1} + g = \Delta G(\omega_v) + j\omega_v \Delta C(\omega_v). \quad (2)$$

Определение суммарной емкости и проводимости при заданных значениях перенапряжения нужно для построения зависимости этих величин от мгновенного значения напряжения.

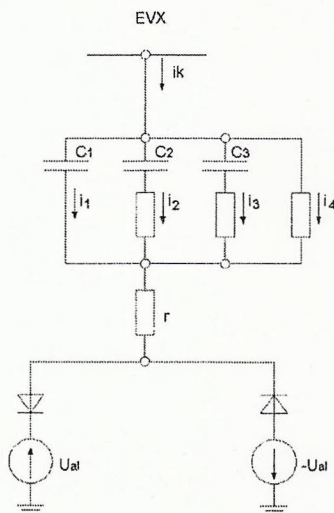


Рис. 1

При использовании указанной модели короны в системе уравнений (2) функции Φ_e при заданном значении напряжения заменяются следующими уравнениями:

$$\frac{d}{dt}(C_1 u_{C1}) = i_1,$$

$$\frac{d}{dt}(C_2 u_{C2}) = \frac{d}{dt}(C_2 u_{C1} - C_2 r_2 i_2) = i_2, \quad (3)$$

$$\frac{d}{dt}(C_3 u_{C3}) = \frac{d}{dt}(C_3 u_{C1} - C_3 r_3 i_3) = i_3,$$

$$g \cdot u_{C1} = i_4,$$

здесь i_1, i_2, i_3, i_4 – токи, протекающие по ветвям модели; u_{C1}, u_{C2}, u_{C3} – напряжения на емкостях модели; $C_1, C_2, C_3, r_2, r_3, g$ – элементы модели.

Уравнения (3) записываются в разностной форме:

$$i_1(t) = G_1 \left[u_d \left(1 - \frac{U_{al}}{|u_d|} \right) \right] - G_1 \left[u_f \left(1 - \frac{U_{al}}{|u_f|} \right) \right] - \sigma_1 i_1(t-2\tau) + 0(\tau^2);$$

$$i_2(t) = G_2 \left[u_d \left(1 - \frac{U_{al}}{|u_d|} \right) \right] - G_2 \left[u_f \left(1 - \frac{U_{al}}{|u_f|} \right) \right] - \sigma_2 i_2(t-2\tau) + 0(\tau^2); \quad (4)$$

$$i_3(t) = G_3 \left[u_d \left(1 - \frac{U_{al}}{|u_d|} \right) \right] - G_3 \left[u_f \left(1 - \frac{U_{al}}{|u_f|} \right) \right] - \sigma_3 i_3(t-2\tau) + 0(\tau^2);$$

$$i_4(t) = G_4 \left[u_d \left(1 - \frac{U_{al}}{|u_d|} \right) \right] - G_4 \left[u_f \left(1 - \frac{U_{al}}{|u_f|} \right) \right] - \sigma_4 i_4(t-2\tau) + 0(\tau^2).$$

Здесь U_{al} – напряжения зажигания короны; $G_1 = \tau^{-1} C_1$; $G_2 = \tau^{-1} C_2 (1 + \tau^{-1} C_2 r_2)$; $G_3 = \tau^{-1} C_3 (1 + \tau^{-1} C_3 r_3)$; $G_4 = g$; $s_1 = s_4 = 1$; $s_2 = (1 - \tau^{-1} C_2 r_2) / (1 + \tau^{-1} C_2 r_2)$; $s_3 = (1 - \tau^{-1} C_3 r_3) / (1 + \tau^{-1} C_3 r_3)$.

В системе (4) остаточный член $0(\tau^2)$ равен

$$0(\tau^2) = C_m(t) \sum_{v=1}^{\infty} \frac{\tau^{2v}}{(2v+1)!} \cdot \frac{d^{2v+1} u_e}{dt^{2v+1}} - C_m(t) \cdot r_m(t) \sum_{v=1}^{\infty} \frac{\tau^{2v}}{(2v+1)!} \cdot \frac{d^{2v+1} e}{dt^{2v+1}}. \quad (5)$$

В указанных выражениях $u_d = u(t)$, $u_f = u(t-2\tau)$, $u_e = u(t-\tau)$, $i_e = i(t-\tau)$ – напряжение и ток на линии в момент $t, t-\tau$ и $t-2\tau$.

При коронировании проводов ЛЭП принимается:

$$u_{C1}(t) = u_d - \frac{u_d}{|u_d|} \cdot U_{al}, \quad (6)$$

$u_d/|u_d|$ придает знак U_{al} .

Ток короны многопроводной линии описывается следующим образом:

$$\begin{pmatrix} i_{kor1} \\ i_{kor2} \\ \dots \\ i_{kor3} \\ \dots \\ i_{kor_m} \end{pmatrix} = \begin{pmatrix} \sum_{k=1}^4 G_k & 0 & \dots & 0 \\ 0 & \sum_{k=1}^4 G_k & \dots & 0 \\ \dots & \dots & \dots & \dots \\ 0 & 0 & \dots & \sum_{k=1}^4 G_k \end{pmatrix} \begin{pmatrix} u_d \left(1 - \frac{U_{al}}{|u_d|} \right) - u_{f1} \left(1 - \frac{U_{al}}{|u_{f1}|} \right) \\ u_d \left(1 - \frac{U_{al}}{|u_d|} \right) - u_{f2} \left(1 - \frac{U_{al}}{|u_{f2}|} \right) \\ \dots \\ u_d \left(1 - \frac{U_{al}}{|u_d|} \right) - u_{fm} \left(1 - \frac{U_{al}}{|u_{fm}|} \right) \end{pmatrix} - \begin{pmatrix} \sum_{k=1}^4 \sigma_k i_{k1}(t-2\tau) \\ \sum_{k=1}^4 \sigma_k i_{k2}(t-2\tau) \\ \dots \\ \sum_{k=1}^4 \sigma_k i_{km}(t-2\tau) \end{pmatrix} \quad (7)$$

или

$$i_{kor}(t) = \sum_{k=1}^4 i_k(t) = \sum_{k=1}^4 G_k \left[u_d \left(1 - \frac{U_{al}}{|u_d|} \right) - u_f \left(1 - \frac{U_{al}}{|u_d|} \right) \right] - \sum_{k=1}^4 \delta_k i_k(t - 2\tau) + 0(t^2) \quad (8)$$

После коронирования проводов конденсаторы модели начинают разряжаться и напряжения наводятся из системы (3) при условии $i_{kor} = 0$.

Параметры модели зависят от мгновенного значения напряжения. Для их определения на каждом шаге расчета использован способ сплайн-интерполяции третьего порядка.

$$y(v) = y_k(v) = \sum_{\mu=1}^3 a_{\mu}^{(k)} (v_k - v)^{\mu}; \quad k=1, 2, \dots, n; \quad (9)$$

здесь $y(v)$ – параметры модели короны; k – количество опорных точек в характеристике; $a_0^{(k)} = f_k$ – заданное значение функции (емкость или сопротивление) в узловой точке k при возрастании кратности перенапряжения.

Для получения расчетных выражений, аппроксимирующих уравнения ЛЭП с учетом поверхностного эффекта, получено

$$\left(1 + hZ \sum_{k=1}^4 G_k \right) \cdot u_d + (Z + Z_s) \cdot i_d = \vartheta_p, \quad (10)$$

$$- \left(1 + hZ \sum_{k=1}^4 G_k \right) \cdot u_d + (Z + Z_s) \cdot i_d = \vartheta_q,$$

здесь

$$\vartheta_p = u_p + Zi_p + hZ \left[\sum_{k=1}^4 G_k (\pm U_{al}) + u_f \left(1 - \frac{U_{al}}{|u_f|} \right) + \sum_{k=1}^4 \sigma_k \cdot i_{fk} \right] + \sum_{k=1}^n Z_k \cdot \chi_k \cdot i_{fk},$$

$$\vartheta_q = -u_q + Zi_q - hZ \left[\sum_{k=1}^4 G_k (\pm U_{al}) + u_f \left(1 - \frac{U_{al}}{|u_f|} \right) + \sum_{k=1}^4 \sigma_k \cdot i_{fk} \right] + \sum_{k=1}^n Z_k \cdot \chi_k \cdot i_{fk}.$$

Анализ полученных практических результатов показал, что необходимо увеличить точность коронирования модели. Поставлена задача расширения частотного диапазона модели короны.

Для определения характеристических параметров модели короны предложены разные выражения. Наиболее широко используется следующее [1]:

$$\Delta G = 0,83 \left(\frac{f}{50} \right)^{0,62} \left[1 - e^{-3,05 \left(\frac{U_M}{U_H} - 1 \right)} \right], \quad (11)$$

$$\Delta C = 2,4 \left(\frac{50}{f} \right)^{0,42} \left(\frac{U_M}{U_H} - 1 \right) \cdot 10^3,$$

здесь ΔG , ΔC – дополнительная проводимость (1/МОм·км) и емкость (пФ/км), моделирующая

корону при определенной частоте и напряжении линии; f – частота, Гц; U_M/U_H – кратность перенапряжения.

2. Новая модель короны. Основным недостатком этой модели из четырех ветвей является то, что при расширении диапазона моделирования становится невозможным определение параметров путем увеличения количества параллельных ветвей. Выбор параметров дополнительных элементов вариационным способом требует много времени, а в отдельных случаях становится невозможным. Определение элемента g , подключенного к модели вместе с другими параметрами модели, еще более затрудняет расчетный алгоритм.

С целью упрощения, с одной стороны, элемент g не учитывается, а с другой – для получения однотипных выражений в первой ветви модели к емкости C добавляется r (рис. 2).

Для уменьшения погрешности моделирования и расширения частотного диапазона сначала определяются параметры модели с тремя параллельными ветвями, далее третья ветвь заменяется новыми ветвями (двумя или тремя). Этот процесс продолжается до требуемой стадии. В итоге с помощью одинаковых выражений и одной программы вычисляются параметры модели с любым количеством ветвей.

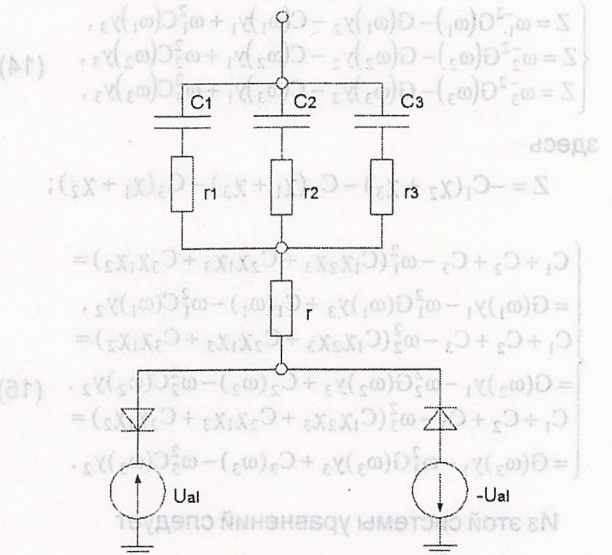


Рис. 2

Параметры модели из трех параллельных ветвей определяются по следующему выражению:

$$\sum_{k=1}^3 \left(r_k + \frac{1}{j\omega_v C_k} \right)^{-1} = G(\omega_v) + j\omega_v C(\omega_v),$$

$$v = 1, 2, 3. \quad (12)$$

При решении системы величину частоты можно взять в пределах диапазона моделирования.

Для упрощения решения уравнения введем $r_1 C_1 = \chi_1, r_2 C_2 = \chi_2, r_3 C_3 = \chi_3$. Тогда получим

$$\sum_{k=1}^3 \left(\frac{j\omega_v C_k}{1 + j\omega_v \chi_k} \right) = G(\omega_v) + j\omega_v c(\omega_v) \quad (13)$$

Если учесть, что

$$(1 + j\omega_v \chi_1) \cdot (1 + j\omega_v \chi_2) = 1 - \omega_v^2 \chi_1 \chi_2 + j\omega_v (\chi_1 + \chi_2),$$

$$(1 + j\omega_v \chi_1) \cdot (1 + j\omega_v \chi_3) = 1 - \omega_v^2 \chi_1 \chi_3 + j\omega_v (\chi_1 + \chi_3),$$

$$(1 + j\omega_v \chi_2) \cdot (1 + j\omega_v \chi_3) = 1 - \omega_v^2 \chi_2 \chi_3 + j\omega_v (\chi_2 + \chi_3),$$

$$(1 + j\omega_v \chi_1) \cdot (1 + j\omega_v \chi_2) \cdot (1 + j\omega_v \chi_3) = 1 - \omega_v^2 (\chi_1 \chi_2 + \chi_1 \chi_3 + \chi_2 \chi_3) +$$

$$+ j\omega_v (\chi_1 + \chi_2 + \chi_3) - j\omega_v^3 \chi_1 \chi_2 \chi_3$$

и

$$y_1 = \chi_1 + \chi_2 + \chi_3, \quad y_2 = \chi_1 \chi_2 + \chi_2 \chi_3 + \chi_1 \chi_3, \quad y_3 = \chi_1 \chi_2 \chi_3,$$

из уравнения (13) получим

$$j\omega_v C_1 [1 - \omega_v^2 \chi_2 \chi_3 + j\omega_v (\chi_2 + \chi_3)] + j\omega_v C_2 [1 - \omega_v^2 \chi_1 \chi_3 + j\omega_v (\chi_1 + \chi_3)] + j\omega_v C_3 [1 - \omega_v^2 \chi_1 \chi_2 + j\omega_v (\chi_1 + \chi_2)] = [G(\omega_v) + j\omega_v c(\omega_v)] \times [1 - \omega_v^2 y_2 + j\omega_v y_1 - j\omega_v^3 y_3] = G(\omega_v) - \omega_v^2 y_2 \cdot G(\omega_v) + j\omega_v y_1 \times G(\omega_v) - j\omega_v^3 y_3 \cdot G(\omega_v) + j\omega_v \cdot C(\omega_v) - j\omega_v^3 \cdot C(\omega_v) y_2 - \omega_v^2 \cdot C(\omega_v) y_1 + \omega_v^4 C(\omega_v) y_3.$$

Выделим в этом уравнении действительные и мнимые части. С учетом того, что $n = 1, 2, 3$, имеем

$$\begin{cases} Z = \omega_1^{-2} G(\omega_1) - G(\omega_1) y_2 - C(\omega_1) y_1 + \omega_1^2 C(\omega_1) y_3, \\ Z = \omega_2^{-2} G(\omega_2) - G(\omega_2) y_2 - C(\omega_2) y_1 + \omega_2^2 C(\omega_2) y_3, \\ Z = \omega_3^{-2} G(\omega_3) - G(\omega_3) y_2 - C(\omega_3) y_1 + \omega_3^2 C(\omega_3) y_3, \end{cases} \quad (14)$$

здесь

$$Z = -C_1 (\chi_2 + \chi_3) - C_2 (\chi_1 + \chi_3) - C_3 (\chi_1 + \chi_2);$$

$$\begin{cases} C_1 + C_2 + C_3 - \omega_1^2 (C_1 \chi_2 \chi_3 + C_2 \chi_1 \chi_3 + C_3 \chi_1 \chi_2) = \\ = G(\omega_1) y_1 - \omega_1^2 G(\omega_1) y_3 + C_1 (\omega_1) - \omega_1^2 C(\omega_1) y_2, \\ C_1 + C_2 + C_3 - \omega_2^2 (C_1 \chi_2 \chi_3 + C_2 \chi_1 \chi_3 + C_3 \chi_1 \chi_2) = \\ = G(\omega_2) y_1 - \omega_2^2 G(\omega_2) y_3 + C_2 (\omega_2) - \omega_2^2 C(\omega_2) y_2, \\ C_1 + C_2 + C_3 - \omega_3^2 (C_1 \chi_2 \chi_3 + C_2 \chi_1 \chi_3 + C_3 \chi_1 \chi_2) = \\ = G(\omega_3) y_1 - \omega_3^2 G(\omega_3) y_3 + C_3 (\omega_3) - \omega_3^2 C(\omega_3) y_2. \end{cases} \quad (15)$$

Из этой системы уравнений следует

$$\begin{pmatrix} A_1 & A_2 & A_3 \\ B_1 & B_2 & B_3 \\ D_1 & D_2 & D_3 \end{pmatrix} \times \begin{pmatrix} y_1 \\ y_2 \\ y_3 \end{pmatrix} = \begin{pmatrix} A_0 \\ B_0 \\ D_0 \end{pmatrix}, \quad (16)$$

здесь

$$A_1 = C(\omega_3) - C(\omega_1),$$

$$B_1 = C(\omega_3) - C(\omega_2),$$

$$A_2 = G(\omega_3) - G(\omega_1),$$

$$B_2 = G(\omega_3) - G(\omega_2),$$

$$A_3 = \omega_1^2 C(\omega_1) - \omega_3^2 C(\omega_3),$$

$$B_3 = \omega_2^2 C(\omega_2) - \omega_3^2 C(\omega_3),$$

$$A_0 = \omega_3^{-2} G(\omega_3) - \omega_1^{-2} G(\omega_1),$$

$$B_0 = \omega_3^{-2} G(\omega_3) - \omega_2^{-2} G(\omega_2),$$

$$D_1 = \sigma_2 [G(\omega) - G(\omega)] - \sigma_1 [G(\omega_1) - G(\omega_3)], \quad \sigma_1 = (\omega_3^2 - \omega_1^2)^{-1},$$

$$D_2 = \sigma_2 [\omega_3^2 C(\omega_3) - \omega_2^2 C(\omega_2)] - \sigma_1 [\omega_3^2 C(\omega_3) - \omega_1^2 C(\omega_1)],$$

$$D_3 = \sigma_2 [\omega_3^2 G(\omega_3) - \omega_2^2 G(\omega_2)] - \sigma_1 [\omega_3^2 G(\omega_3) - \omega_1^2 G(\omega_1)],$$

$$D_0 = \sigma_1 [C(\omega_1) - C(\omega_3)] - \sigma_2 [C(\omega_2) - C(\omega_3)], \quad \sigma_2 = (\omega_3^2 - \omega_2^2)^{-1}.$$

После определения y_1, y_2, y_3 параметры модели вычисляются с помощью уравнений (14), (16) и уравнения $x^3 - y_1 x^2 + y_2 x - y_3 = 0$.

Для определения погрешности моделирования при заданном диапазоне частоты после нахождения параметров вычисляется частотная характеристика модели при кратности заданного перенапряжения:

$$G_M + j\omega_v C_M = \sum_{k=1}^3 \left(r_k + \frac{1}{j\omega_v C_k} \right)^{-1}, \quad (17)$$

здесь G_M, C_M – общая проводимость и емкость модели короны.

Значения вычисленных параметров при $U_M/U_H = 1,8$ модели короны даны в таблице 1. Зависимости проводимости G , емкости C и погрешности моделирования от частоты приведены на рисунке 3.

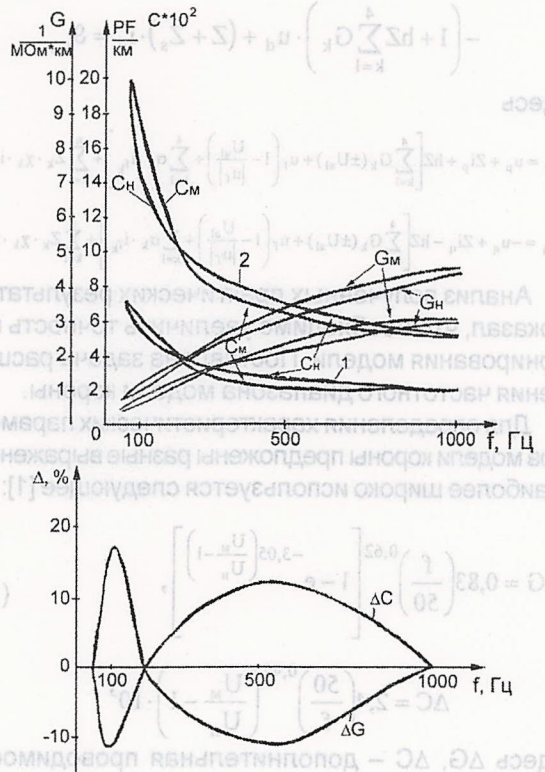


Рис. 3

f, Гц	Первичные параметры		Параметры модели короны					
	G, 1/МОм·км	C, пФ/км	r ₁	r ₂	r ₃	C ₁	C ₂	C ₃
			МОм·км			пФ/км		
50	0,758	1920	1,09	2,52	0,145	4620	-663	1130
200	1,497	1072,6						
1000	4,854	545,59						

В таблице 1 для сравнения приведены значения проводимости и емкости C₀, вычисленные по выражениям (11).

3. Модель короны из пяти параллельных ветвей и более. С целью расширения частотного диапазона увеличением количества ветвей третья ветвь должна заменяться тремя новыми ветвями (рис. 4).

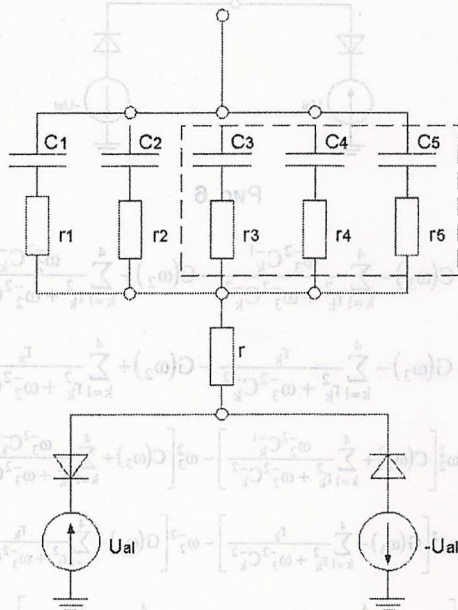


Рис. 4

В этом случае для определения параметров модели нужно использовать следующее уравнение:

$$\sum_{k=1}^3 \left(r_{k+2} + \frac{1}{j\omega_v C_{k+2}} \right)^{-1} = G(\omega_v) + j\omega_v C(\omega_v) - \sum_{k=1}^2 \left(r_k + \frac{1}{j\omega_v C_k} \right)^{-1}, \quad (18)$$

здесь r₁, r₂, C₁, C₂ – элементы модели с известными параметрами; r₃, r₄, r₅, C₃, C₄, C₅ – элементы с необходимыми вычисляемыми параметрами.

Для определения параметров новых элементов используются вышеуказанные уравнения. Сначала вычисляются y₁, y₂, y₃. Для этого коэффициенты уравнения (16) должны рассчитываться по следующим выражениям:

$$A_1 = C(\omega_3) - \sum_{k=1}^2 \frac{\omega_3^{-2} C_k^{-1}}{r_k^2 + \omega_3^{-2} C_k^{-2}} - C(\omega_1) + \sum_{k=1}^2 \frac{\omega_1^{-2} C_k^{-1}}{r_k^2 + \omega_1^{-2} C_k^{-2}},$$

$$A_2 = G(\omega_3) - \sum_{k=1}^2 \frac{r_k}{r_k^2 + \omega_3^{-2} C_k^{-2}} - G(\omega_1) + \sum_{k=1}^2 \frac{r_k}{r_k^2 + \omega_1^{-2} C_k^{-2}},$$

$$A_3 = \omega_1^2 \left[C(\omega_1) - \sum_{k=1}^2 \frac{\omega_1^{-2} C_k^{-1}}{r_k^2 + \omega_1^{-2} C_k^{-2}} \right] - \omega_3^2 \left[C(\omega_3) - \sum_{k=1}^2 \frac{\omega_3^{-2} C_k^{-1}}{r_k^2 + \omega_3^{-2} C_k^{-2}} \right],$$

$$A_0 = \omega_3^{-2} \left[G(\omega_3) - \sum_{k=1}^2 \frac{r_k}{r_k^2 + \omega_3^{-2} C_k^{-2}} \right] - \omega_1^{-2} \left[G(\omega_1) - \sum_{k=1}^2 \frac{r_k}{r_k^2 + \omega_1^{-2} C_k^{-2}} \right],$$

$$B_1 = C(\omega_3) - \sum_{k=1}^2 \frac{\omega_3^{-2} C_k^{-1}}{r_k^2 + \omega_3^{-2} C_k^{-2}} - C(\omega_2) + \sum_{k=1}^2 \frac{\omega_2^{-2} C_k^{-1}}{r_k^2 + \omega_2^{-2} C_k^{-2}},$$

$$B_2 = G(\omega_3) - \sum_{k=1}^2 \frac{r_k}{r_k^2 + \omega_3^{-2} C_k^{-2}} - G(\omega_2) + \sum_{k=1}^2 \frac{r_k}{r_k^2 + \omega_2^{-2} C_k^{-2}},$$

$$B_3 = \omega_2^2 \left[C(\omega_2) - \sum_{k=1}^2 \frac{\omega_2^{-2} C_k^{-1}}{r_k^2 + \omega_2^{-2} C_k^{-2}} \right] - \omega_3^2 \left[C(\omega_3) - \sum_{k=1}^2 \frac{\omega_3^{-2} C_k^{-1}}{r_k^2 + \omega_3^{-2} C_k^{-2}} \right],$$

$$B_0 = \omega_3^{-2} \left[G(\omega_3) - \sum_{k=1}^2 \frac{r_k}{r_k^2 + \omega_3^{-2} C_k^{-2}} \right] - \omega_2^{-2} \left[G(\omega_2) - \sum_{k=1}^2 \frac{r_k}{r_k^2 + \omega_2^{-2} C_k^{-2}} \right],$$

$$D_1 = \sigma_2 \left[G(\omega_2) - \sum_{k=1}^2 \frac{r_k}{r_k^2 + \omega_2^{-2} C_k^{-2}} - G(\omega_3) + \sum_{k=1}^2 \frac{r_k}{r_k^2 + \omega_3^{-2} C_k^{-2}} \right] -$$

$$- \sigma_1 \left[G(\omega_1) - \sum_{k=1}^2 \frac{r_k}{r_k^2 + \omega_1^{-2} C_k^{-2}} - G(\omega_3) + \sum_{k=1}^2 \frac{r_k}{r_k^2 + \omega_3^{-2} C_k^{-2}} \right],$$

$$D_2 = \sigma_2 \left\{ \omega_3^2 \left[C(\omega_3) - \sum_{k=1}^2 \frac{\omega_3^{-2} C_k^{-1}}{r_k^2 + \omega_3^{-2} C_k^{-2}} \right] - \omega_2^2 \left[C(\omega_2) - \sum_{k=1}^2 \frac{\omega_2^{-2} C_k^{-1}}{r_k^2 + \omega_2^{-2} C_k^{-2}} \right] \right\} -$$

$$- \sigma_1 \left\{ \omega_3^2 \left[C(\omega_3) - \sum_{k=1}^2 \frac{\omega_3^{-2} C_k^{-1}}{r_k^2 + \omega_3^{-2} C_k^{-2}} \right] - \omega_1^2 \left[C(\omega_1) - \sum_{k=1}^2 \frac{\omega_1^{-2} C_k^{-1}}{r_k^2 + \omega_1^{-2} C_k^{-2}} \right] \right\},$$

$$D_3 = \sigma_2 \left\{ \omega_3^2 \left[G(\omega_3) - \sum_{k=1}^2 \frac{r_k}{r_k^2 + \omega_3^{-2} C_k^{-2}} \right] - \omega_2^2 \left[G(\omega_2) - \sum_{k=1}^2 \frac{r_k}{r_k^2 + \omega_2^{-2} C_k^{-2}} \right] \right\} -$$

$$- \sigma_1 \left\{ \omega_3^2 \left[G(\omega_3) - \sum_{k=1}^2 \frac{r_k}{r_k^2 + \omega_3^{-2} C_k^{-2}} \right] - \omega_1^2 \left[G(\omega_1) - \sum_{k=1}^2 \frac{r_k}{r_k^2 + \omega_1^{-2} C_k^{-2}} \right] \right\},$$

$$D_0 = \sigma_1 \left[C(\omega_1) - \sum_{k=1}^2 \frac{\omega_1^{-2} C_k^{-1}}{r_k^2 + \omega_1^{-2} C_k^{-2}} - C(\omega_3) + \sum_{k=1}^2 \frac{\omega_3^{-2} C_k^{-1}}{r_k^2 + \omega_3^{-2} C_k^{-2}} \right] -$$

$$- \sigma_2 \left[C(\omega_2) - \sum_{k=1}^2 \frac{\omega_2^{-2} C_k^{-1}}{r_k^2 + \omega_2^{-2} C_k^{-2}} - C(\omega_3) + \sum_{k=1}^2 \frac{\omega_3^{-2} C_k^{-1}}{r_k^2 + \omega_3^{-2} C_k^{-2}} \right].$$

Последовательность проведения последующих вычислений так же, как и в предыдущем разделе. В таблице 2 приведены параметры модели, вычисленные с помощью этих выражений. Погрешность моделирования этой модели в диапазоне 2000 Гц не более 10% (рис. 5).

Параметры модели короны									
r_1	r_2	r_3	r_4	r_5	C_1	C_2	C_3	C_4	C_5
МОМ · КМ					пФ / КМ				
1,09	2,52	0,336	0,71	0,0783	4620	-663	812	-209	4780

Таким образом, для расширения частотного диапазона, путем увеличения количества дополнительных ветвей, не потребовалось изменения алгоритма определения параметров.

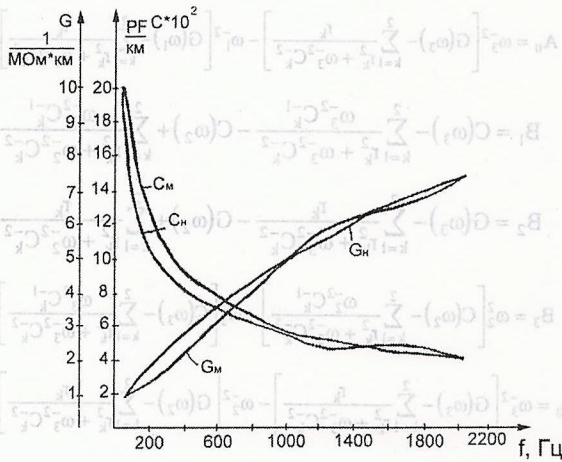


Рис. 5

Для определения параметров модели из семи параллельных ветвей (рисунок 6) можно записать следующее выражение:

$$\sum_{k=1}^3 \left(\frac{1}{r_{k+4} + \frac{j}{\omega_{\nu} C_{k+4}}} \right)^{-1} = G(\omega_{\nu}) + j\omega_{\nu} C(\omega_{\nu}) - \sum_{k=1}^4 \left(r_k + \frac{1}{j\omega_{\nu} C_k} \right)^{-1} \quad (19)$$

здесь $r_1, r_2, r_3, r_4, C_1, C_2, C_3, C_4$ – элементы модели с известными параметрами; $r_5, r_6, r_7, C_5, C_6, C_7$ – элементы, требующие вычисления параметров.

Последовательность расчета не изменяется.

$$A_1 = C(\omega_3) - \sum_{k=1}^4 \frac{\omega_3^{-2} C_k^{-1}}{r_k^2 + \omega_3^{-2} C_k^{-2}} - C(\omega_1) + \sum_{k=1}^4 \frac{\omega_1^{-2} C_k^{-1}}{r_k^2 + \omega_1^{-2} C_k^{-2}},$$

$$A_2 = G(\omega_3) - \sum_{k=1}^4 \frac{r_k}{r_k^2 + \omega_3^{-2} C_k^{-2}} - G(\omega_1) + \sum_{k=1}^4 \frac{r_k}{r_k^2 + \omega_1^{-2} C_k^{-2}},$$

$$A_3 = \omega_1^2 \left[C(\omega_1) + \sum_{k=1}^4 \frac{\omega_1^{-2} C_k^{-1}}{r_k^2 + \omega_1^{-2} C_k^{-2}} \right] - \omega_3^2 \left[C(\omega_3) - \sum_{k=1}^4 \frac{\omega_3^{-2} C_k^{-1}}{r_k^2 + \omega_3^{-2} C_k^{-2}} \right],$$

$$A_0 = \omega_1^{-2} \left[G(\omega_3) - \sum_{k=1}^4 \frac{r_k}{r_k^2 + \omega_1^{-2} C_k^{-2}} \right] - \omega_1^{-2} \left[G(\omega_1) - \sum_{k=1}^4 \frac{r_k}{r_k^2 + \omega_3^{-2} C_k^{-2}} \right],$$

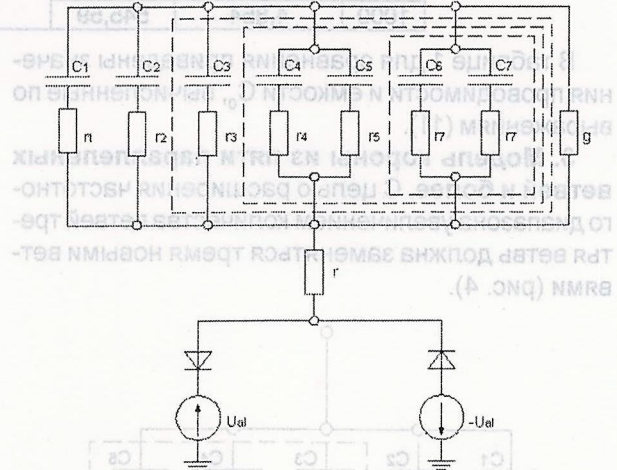


Рис. 6

$$B_1 = C(\omega_3) - \sum_{k=1}^4 \frac{\omega_3^{-2} C_k^{-1}}{r_k^2 + \omega_3^{-2} C_k^{-2}} - C(\omega_2) + \sum_{k=1}^4 \frac{\omega_2^{-2} C_k^{-1}}{r_k^2 + \omega_2^{-2} C_k^{-2}},$$

$$B_2 = G(\omega_3) - \sum_{k=1}^4 \frac{r_k}{r_k^2 + \omega_3^{-2} C_k^{-2}} - G(\omega_2) + \sum_{k=1}^4 \frac{r_k}{r_k^2 + \omega_2^{-2} C_k^{-2}},$$

$$B_3 = \omega_2^2 \left[C(\omega_2) + \sum_{k=1}^4 \frac{\omega_2^{-2} C_k^{-1}}{r_k^2 + \omega_2^{-2} C_k^{-2}} \right] - \omega_3^2 \left[C(\omega_3) + \sum_{k=1}^4 \frac{\omega_3^{-2} C_k^{-1}}{r_k^2 + \omega_3^{-2} C_k^{-2}} \right],$$

$$B_0 = \omega_3^{-2} \left[G(\omega_3) - \sum_{k=1}^4 \frac{r_k}{r_k^2 + \omega_3^{-2} C_k^{-2}} \right] - \omega_2^{-2} \left[G(\omega_2) - \sum_{k=1}^4 \frac{r_k}{r_k^2 + \omega_2^{-2} C_k^{-2}} \right],$$

$$D_1 = \sigma_2 \left[G(\omega_2) - \sum_{k=1}^4 \frac{r_k}{r_k^2 + \omega_3^{-2} C_k^{-2}} - G(\omega_3) + \sum_{k=1}^4 \frac{r_k}{r_k^2 + \omega_3^{-2} C_k^{-2}} \right] - \quad (20)$$

$$-\sigma_1 \left[G(\omega_1) - \sum_{k=1}^4 \frac{r_k}{r_k^2 + \omega_1^{-2} C_k^{-2}} - G(\omega_3) + \sum_{k=1}^4 \frac{r_k}{r_k^2 + \omega_3^{-2} C_k^{-2}} \right],$$

$$D_2 = \sigma_2 \left\{ \omega_3^2 \left[C(\omega_3) - \sum_{k=1}^4 \frac{\omega_3^{-2} C_k^{-1}}{r_k^2 + \omega_3^{-2} C_k^{-2}} \right] - \omega_2^2 \left[C(\omega_2) - \sum_{k=1}^4 \frac{\omega_2^{-2} C_k^{-1}}{r_k^2 + \omega_2^{-2} C_k^{-2}} \right] \right\} -$$

$$-\sigma_1 \left\{ \omega_3^2 \left[C(\omega_3) - \sum_{k=1}^4 \frac{\omega_3^{-2} C_k^{-1}}{r_k^2 + \omega_3^{-2} C_k^{-2}} \right] - \omega_1^2 \left[C(\omega_1) - \sum_{k=1}^4 \frac{\omega_1^{-2} C_k^{-1}}{r_k^2 + \omega_1^{-2} C_k^{-2}} \right] \right\},$$

$$D_3 = \sigma_2 \left\{ \omega_3^2 \left[G(\omega_3) - \sum_{k=1}^4 \frac{r_k}{r_k^2 + \omega_3^{-2} C_k^{-2}} \right] - \omega_2^2 \left[G(\omega_2) - \sum_{k=1}^4 \frac{r_k}{r_k^2 + \omega_2^{-2} C_k^{-2}} \right] \right\} -$$

$$-\sigma_1 \left\{ \omega_3^2 \left[G(\omega_3) - \sum_{k=1}^4 \frac{r_k}{r_k^2 + \omega_3^{-2} C_k^{-2}} \right] - \omega_1^2 \left[G(\omega_1) - \sum_{k=1}^4 \frac{r_k}{r_k^2 + \omega_1^{-2} C_k^{-2}} \right] \right\},$$

$$D_0 = \sigma_1 \left[C(\omega_1) - \sum_{k=1}^4 \frac{\omega_1^{-2} C_k^{-1}}{r_k^2 + \omega_1^{-2} C_k^{-2}} - C(\omega_3) + \sum_{k=1}^4 \frac{\omega_3^{-2} C_k^{-1}}{r_k^2 + \omega_3^{-2} C_k^{-2}} \right] -$$

$$-\sigma_2 \left[C(\omega_2) - \sum_{k=1}^4 \frac{\omega_2^{-2} C_k^{-1}}{r_k^2 + \omega_2^{-2} C_k^{-2}} - C(\omega_3) + \sum_{k=1}^4 \frac{\omega_3^{-2} C_k^{-1}}{r_k^2 + \omega_3^{-2} C_k^{-2}} \right].$$

МОДЕЛИРОВАНИЕ КОРОНЫ И ПРОВОДОВ МНОГОВОДНЫХ ЛИНИЙ

Таблица 3

Параметры модели короны						
1	r_2	r_3	r_4	r_5	r_6	r_7
МОМ · км						
,09	2,52	0,336	0,71	0,193	0,423	0,05
Параметры модели короны						
C_1	C_2	C_3	C_4	C_5	C_6	C_7
пФ / км						
4620	-663	812	-209	1130	-250	398

В таблице 3 даны параметры модели из семи ветвей.

Модель из семи ветвей с учетом коронирования в частотном диапазоне 50÷5000 Гц обеспечивает моделирование с принятой погрешностью (рис. 7).

Таким образом, получаем модели с высокой точностью, которые можно использовать при любых режимах многопроводных линий в вычислениях волновых процессов.

Литература

Гашимов А.М. Численный анализ волновых процессов в электрических сетях / А.М. Гашимов, Е.В. Дмитриев, И.Р. Пивчик Новосибирск: Наука, 2003. 147 с.

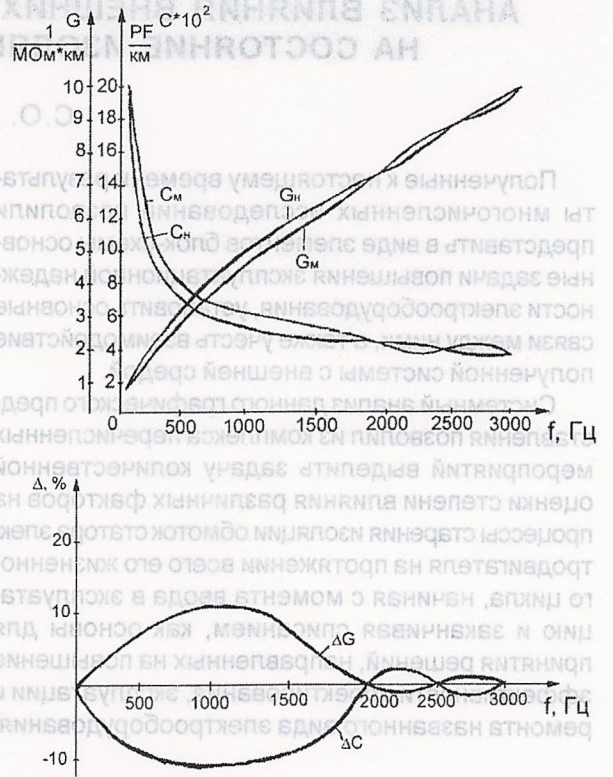


Рис. 7

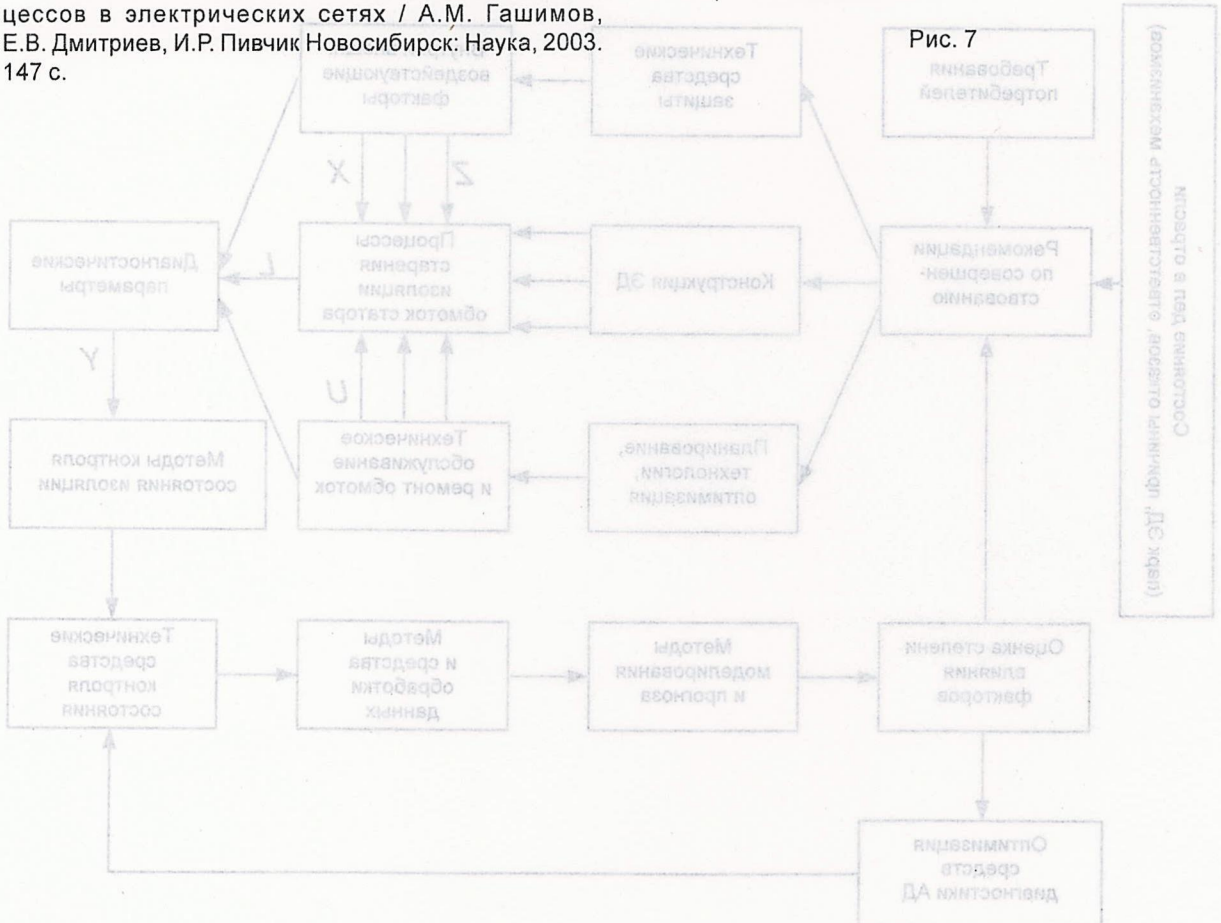


Рис. 1. Блок-схема организационно-технических мероприятий обеспечения качества электроснабжения