

ПРИМЕНЕНИЕ МЕТОДА УЗЛОВЫХ НАПРЯЖЕНИЙ ДЛЯ РАСЧЕТА ВЫСОКОЧАСТОТНЫХ ПАРАМЕТРОВ РЭС НА ЦВМ

И. Ф. Огороднейчук

Харьков

Весьма эффективным методом расчета канала связи по разветвленным сетям является метод узловых напряжений. Однако он применяется пока лишь для расчета двухпроводных линий. Трехфазная линия может быть приведена к двухпроводной в некоторых частных случаях. Мы рассматриваем симметричную трехпроводную линию, имеющую постоянные сопротивления Z_1 и Z_2 и постоянные распространения γ_1 и γ_2 соответственно симметричного (междуфазного) и несимметричного («земляного») каналов.

Воздушные ЛЭП несимметричны, но приводятся к симметричным путем осреднения геометрических размеров реальной линии. Совершенно симметричной линией является трехфазный бронированный кабель.

Расчет высокочастотных параметров ГЭС методом узловых напряжений предполагает составление матрицы проводимостей схемы. Как известно, при расчете канала связи необходимо определить входное сопротивление и затухание между какими-либо узлами. При этом вся линия в целом рассматривается как четырехполюсник, и искомые параметры определяются на основании матрицы проводимостей по формулам для четырехполюсника.

Для составления матрицы проводимостей разветвленной трехфазной линии необходимо располагать матрицами y трехфазной линии как $(P-1)$ — полюсника и матрицами y концевых нагрузок как $(P+1)$ — узловиков. При отыскании матрицы y линии удобно сначала определить цепочечную матрицу a этой линии, а затем по известным формулам (1) найти матрицу y . Решив телеграфные уравнения для симметричной трехфазной линии, получим цепочечную матрицу. Напряжения в начале провода в начале и в конце линии связаны между собой следующими зависимостями [4]:

$$U_{10} = \frac{1}{3} \left\{ U_{10}(2\text{ch}\gamma_1 l + \text{ch}\gamma_2 l) + U_{20}(\text{ch}\gamma_2 l - \text{ch}\gamma_1 l) + U_{30}(\text{ch}\gamma_2 l - \text{ch}\gamma_1 l) \right\} - \\ - \left\{ I_{10}(2Z_1 \text{sh}\gamma_1 l + Z_2 \text{sh}\gamma_2 l) + I_{20}(Z_2 \text{sh}\gamma_2 l - Z_1 \text{sh}\gamma_1 l) + I_{30}(Z_2 \text{sh}\gamma_2 l - Z_1 \text{sh}\gamma_1 l) \right\};$$

$$I_1(l) = \frac{1}{3} \left\{ - \left[U_{10} \left(\frac{2\text{sh}\gamma_1 l}{Z_1} + \frac{\text{sh}\gamma_2 l}{Z_2} \right) + U_{20} \left(\frac{\text{sh}\gamma_2 l}{Z_2} - \frac{\text{sh}\gamma_1 l}{Z_1} \right) + U_{30} \left(\frac{\text{sh}\gamma_2 l}{Z_2} - \frac{\text{sh}\gamma_1 l}{Z_1} \right) \right] + \left[I_{10}(2\text{ch}\gamma_1 l + \text{ch}\gamma_2 l) + I_{20}(\text{ch}\gamma_2 l - \text{ch}\gamma_1 l) + I_{30}(\text{ch}\gamma_2 l - \text{ch}\gamma_1 l) \right] \right\}. \quad (1)$$

Аналогичные выражения могут быть получены для остальных проводов путем перестановок индексов у напряжений и токов.

Уравнения передачи $2(P+1)$ -полюсника

$$U_I = a_{aa} U_{II} + a_{ab} I_{II};$$

$$I_I = a_{ba} U_{II} + a_{bb} I_{II}, \quad (2)$$

где U_I, U_{II}, I_I, I_{II} — векторы напряжений и токов в начале и в конце $a_{aa}, a_{ab}, a_{ba}, a_{bb}$ — матрицы, имеющие ранг, равный P .

Сравнивая выражения (1) с уравнениями (2), найдем элементы подматриц a_{aa}, a_{ab} и т. д.

$$a_{aa}^{ik} \begin{cases} \frac{1}{3} (2\text{ch}\gamma_1 l + \text{ch}\gamma_2 l); & i = K; \\ \frac{1}{3} (\text{ch}\gamma_2 l - \text{ch}\gamma_1 l); & i \neq K; \end{cases}$$

$$a_{ab}^{ik} \begin{cases} \frac{1}{3} (2Z_1 \text{sh}\gamma_1 l + Z_2 \text{sh}\gamma_2 l); & i = K; \\ \frac{1}{3} (Z_2 \text{sh}\gamma_2 l - Z_1 \text{sh}\gamma_1 l); & i \neq K; \end{cases}$$

$$a_{ba}^{ik} \begin{cases} \frac{1}{3} \left(\frac{2\text{sh}\gamma_1 l}{Z_1} + \frac{\text{sh}\gamma_2 l}{Z_2} \right); & i = K; \\ \frac{1}{3} \left(\frac{\text{sh}\gamma_2 l}{Z_2} - \frac{\text{sh}\gamma_1 l}{Z_1} \right); & i \neq K. \end{cases} \quad (3)$$

$$a_{bb} = a_{aa}.$$

При анализе Z_1 -схем с многополюсными элементами задающие токи считают направленными к узлам многополюсника. Поскольку при выводе цепочечной матрицы направление токов в начале линии считали к полюсам, а в конце — от полюсов, то задающие токи трехфазной линии, как многополюсника, будут связаны с токами фаз следующими соотношениями:

$$I_I = j_I;$$

$$I_{II} = -j_{II}. \quad (4)$$

Подставляя выражения (4) в матричные уравнения (2) и решая их относительно j_I и j_{II} , найдем подматрицы проводимостей

$$Y_{aa} = a_{bb} a_{ab}^{-1};$$

$$Y_{ab} = a_{ba} - a_{bb} - a_{ab}^{-1} a_{aa}; \quad (5)$$

$$Y_{ba} = -a_{ab}^{-1};$$

$$Y_{bb} = a_{ab}^{-1} a_{aa}.$$

Матрица проводимостей схемы (рис. 1)

1	2	3	4	5	6	7	8
1	$Y_{aa}^{11} + Y_{12}$	1	Y_{ab}^{12}				
2	$Y_{aa}^{21} + Y_{21}$	1	Y_{ab}^{22}				
3	Y_{ba}^{11}	11	$Y_{bb}^{(1)} + Y_{aa}^{(3)} + Y_{ab}^{(3)}$	2	Y_{ab}^{11}	3	Y_{ab}^{12}
4	Y_{ba}^{21}	21	$Y_{bb}^{(1)} + Y_{aa} + Y_{ab}^{(3)}$	2	Y_{ab}	3	Y_{ab}
5		2	Y_{ba}^{12}	2	$Y_{bb}^{11} + Y_{11}$		
6		5	Y_{ba}^{22}	2	$Y_{bb}^{22} + Y_{22}$		
7		3	Y_{ba}^{11}	3	$Y_{bb}^{11} + Y_{11}$	3	$Y_{bb}^{12} + Y_{12}$
8		3	Y_{ba}^{21}	3	$Y_{bb}^{21} + Y_{21}$	3	$Y_{bb}^{12} + Y_{12}$

Примечание. Индексы 1, 2, 3 относятся соответствующие величины к участкам 1, 2, 3. Индексы в углу клетки относятся ко всем элементам данной клетки.

Подставляя в (5) выражения (3) и произведя соответствующие операции, найдем элементы подматриц Y_{aa} , Y_{ab}

$$Y_{ik}^{aa} = \frac{1}{3} \begin{cases} \frac{2}{Z_1} \operatorname{cth} \gamma_1 l + \frac{1}{Z_2} \operatorname{cth} \gamma_2 l; & i = K; \\ \frac{1}{Z_2} \operatorname{cth} \gamma_2 l - \frac{1}{Z_1} \operatorname{cth} \gamma_1 l; & i \neq K; \end{cases}$$

$$Y_{ik}^{ab} = \frac{1}{3} \begin{cases} \frac{2}{Z_1 \operatorname{sh} \gamma_1 l} + \frac{1}{Z_2 \operatorname{sh} \gamma_2 l}; & i = K; \\ \frac{1}{Z_2 \operatorname{sh} \gamma_2 l} - \frac{1}{Z_1 \operatorname{sh} \gamma_1 l}; & i \neq K; \end{cases} \quad (6)$$

$$Y_{ba} = Y_{ab}; \quad Y_{bb} = Y_{aa}.$$

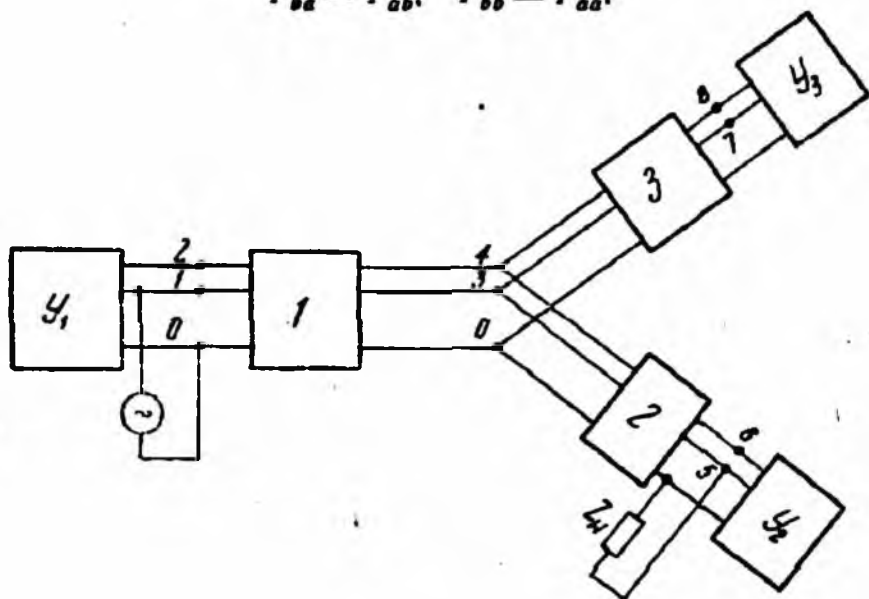


Рис. 1.

В общем случае подматрицы a и y имеют ранг, равный трем, однако в некоторых частных случаях он может быть понижен. Например, в случае передачи сигналов по схеме «фаза—земля», учитывая симметрию линии, две свободные фазы можно объединить соответственно в подматрицах y ; складываются вторые и третьи строки и столбцы, и ранг матриц понижается до двух. При передаче по схеме «фаза—фаза» и «фаза—земля» подматрицы y выражаются в комплексные числа.

Рассмотрим пример расчета канала связи на простейшей разветвленной сети при однофазном подключении передающего и приемного устройства (рис. 1).

Матрица проводимостей составляется с нумерацией узлов схемы по правилам, изложенным в [3]. При составлении матрицы следует учитывать объединение фаз 2 и 3 и пользоваться матрицами проводимостей для схемы «фаза—земля».

Матрица проводимостей схемы (рис. 1) дана в табл. 1.

Входное сопротивление в узле a и затухание между узлами a и b

$$Z_{bk} = \frac{Z_n \Delta_{aa} + \Delta_{aa}; bb}{Z_n \Delta + \Delta_{bb}}; \quad (7)$$

$$b = \ln \left| \frac{Z_n \Delta_{aa} + \Delta_{aa}; bb}{Z_n \Delta_{ab}} \right|.$$

В данном случае $a=1$; $b=5$.

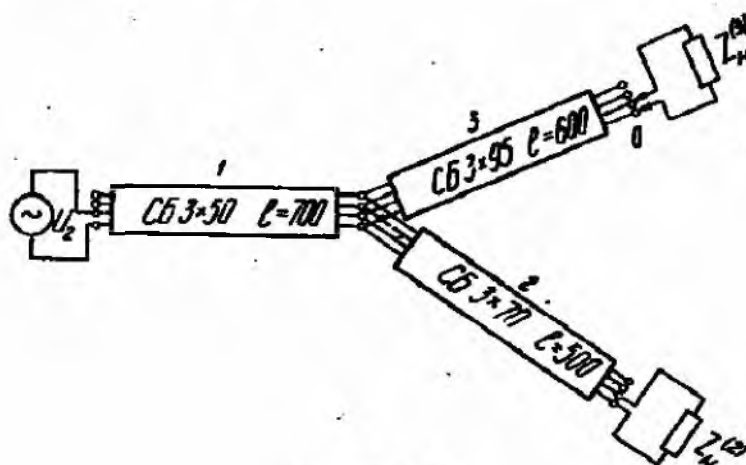


Рис. 2.

Пример. Рассчитать канал связи, организованный на кабельной сети (рис. 2). Передача осуществляется по тракту СБ 3×50 ($l=700$ м) и СБ 3×70 ($l=500$ м) по схеме «фаза—земля» (броня), ответвлением служит кабель СБ 3×95 ($l=600$ м).

Первый режим: $Z_{\text{н}}^{(2)} = Z_{\text{с.ф.з.}}^{(2)} = 19$ ом; $Z_{\text{н}}^{(3)} = \infty$;

Второй режим: $Z_{\text{н}}^{(2)} = Z_{\text{с.ф.з.}} = 19$ ом;

$$Z_{\text{н}}^{(3)} = Z_{\text{с.ф.з.}}^{(3)} = 18 \text{ ом}; Y_{\text{н}}^{(2)} = \frac{1}{Z_{\text{н}}^{(2)}} = 0,052;$$

$$Y_{\text{н}}^{(3)} = \frac{1}{Z_{\text{н}}^{(3)}} = 0,055.$$

Расчет производится на частоте $f=60$ кГц.

Волновые сопротивления и постоянные распространения определяем по входным сопротивлениям

$$Z_1 = \frac{Z_{\text{ф.ф.}}}{2}; Z_2 = 3Z_{\text{з.ф.з.}} = 3Z_{\text{с.ф.з.}} = Z_{\text{с.ф.ф.}}^{(3)};$$

Z_1 — волновое сопротивление симметричного канала (фаза—фаза);

Z_2 — волновое сопротивление несимметричного канала (земля—фаза—земля);

k_1 и k_2 — постоянные распространения;

$Z_{\text{н}}$ — конечная нагрузка;

$Z_{\text{з.ф.з.}}$, $Z_{\text{с.ф.з.}}$, $Z_{\text{с.ф.ф.}}$ — входные сопротивления при различных системах соединения.

$$\beta = a_1 \sqrt{f} + a_2 f \text{ и } \alpha = \omega \sqrt{LC}.$$

Исходные данные сведены в табл. 2.

Таблица 2

кабеля	Z_1	Z_2	a_1^1	a_1^2	a_1^3	a_2^3	$\sqrt{L_1 C_1} \cdot 10^{-3}$	$\sqrt{L_2 C_2} \cdot 10^{-3}$
СБ 3×50	16	36	0,012	0,0011	0,013	0,0014	6,55	6,55
СБ 3×70	14	33	0,018	0,0009	0,02	0,0013	6,9	6,90
СБ 3×95	14	27	0,018	0,0009	0,02	0,0013	7,2	7,20

1. Определение параметров Y_{ik} для первого участка — кабель СБ 3×50 ($l=700$ м); $Z_1=16$ ом; $Z_2=36$ ом; $\frac{1}{Z_1}=0,063$; $\frac{1}{Z_2}=0,028$.

Километрическое затухание и фазовая постоянная (S и O° — каналов) определены по формулам (9), и данные сведены в табл. 3.

Таблица 3

$f_{\text{кГц}}$	β_1	β_2	α_1	α_2	$\beta_2 l$	$\alpha_1 l$	$\alpha_2 l$	
60	0,1	0,18	2,46	2,46	0,07	0,126	1,72	1,72

$$K_1 = 0,07 + j1,72; \quad K_2 = 0,126 + j1,72.$$

Проводимости определяем по формулам (6)

$$Y_{aa}^{11} = \frac{1}{3} (12,4 + j20) \cdot 10^{-3};$$

$$Y_{aa}^{12} = Y_{aa}^{21} = \frac{1}{3} (-1,6 - j9,2) \cdot 10^{-3};$$

$$Y_{aa}^{22} = \frac{1}{3} (23 + j31) \cdot 10^{-3};$$

$$Y_{ba}^{11} = \frac{1}{3} (1,7 + j154) \cdot 10^{-3};$$

$$Y_{ba}^{12} = Y_{ba}^{21} = -\frac{1}{3} (0 + j70) \cdot 10^{-3};$$

$$Y_{ba}^{22} = \frac{1}{3} (3,4 + j238) \cdot 10^{-3}.$$

2. Определение параметров Y_{ik} для второго участка — кабель СБ 3×70 ($l=500$ м); $Z_1=14$ ом; $Z_2=33$ и третьего участка — $Z_1=14$ ом; $Z_2=27$ ом; (кабель СБ 3×95 $l=600$ м) аналогично определению параметров первого участка. Данные проводимостей сведены в табл. 4 и 5.

После вычислений проводимостей необходимо построить эквивалентную схему участка (рис. 3) разветвленной сети и просуммировать узлы согласно правилам.

Второй участок

Y_{aa}^{11}	$Y_{aa}^{12} = Y_{aa}^{21}$	Y_{aa}^{22}
$\frac{10^{-3}}{3} (18 - j46)$	$\frac{10^{-3}}{3} (-7,2 + j21,4)$	$\frac{10^{-3}}{3} (29 - j70)$

Третий участок

Y_{aa}^{11}	$Y_{aa}^{12} = Y_{aa}^{22}$	Y_{aa}^{22}
$\frac{10^{-3}}{3} (22,4 + j5,3)$	$\frac{10^{-3}}{3} (6,8 - j2)$	$\frac{10^{-3}}{3} (38 + j8,6)$

Определяем элементы матрицы проводимостей для первого режима:

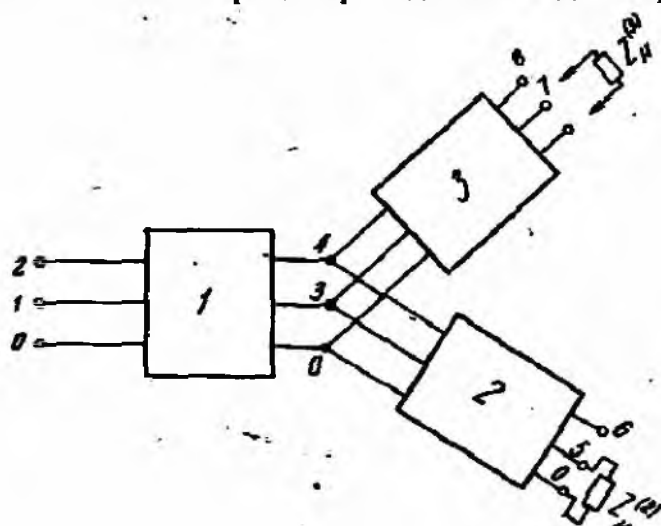


Рис. 3.

$$Y_{33} = \left[Y_{bb}^{(1)} + Y_{aa}^{(2)} + Y_{aa}^{(3)} \right]^{11} = \frac{10^{-3}}{3} (42,8 - j 20,7);$$

$$Y_{34} = \left[Y_{bb}^{(1)} + Y_{aa}^{(2)} + Y_{aa}^{(3)} \right]^{12} = \frac{10^{-3}}{3} (-15,6 + j 10,2);$$

$$Y_{43} = Y_{34};$$

$$Y_{44} = \left[Y_{bb}^{(1)} + Y_{aa}^{(2)} + Y_{aa}^{(3)} \right]^{22} = \frac{10^{-3}}{3} (90 - j 30,4);$$

$$Y_{55} = \left[Y_{bb}^{(1)} \right]^{(2)} + Y_{aa}^{(2)} = \frac{10^{-3}}{3} (174 - j 46).$$

Для второго режима

$$Y_{77} = \left[Y_{bb}^{(1)} \right]^{(3)} + Y_{aa}^{(3)} = \frac{10^{-3}}{3} (187,4 + j 5,3).$$

Матрица проводимостей РСС при $f=60$ кГц иллюстрирует табл. 6.

Таблица 4

Y_{ba}^{11}	$Y_{ba}^{12} = Y_{ba}^{21}$	Y_{ba}^{22}
$\frac{10^{-3}}{3} (-5 + j 174)$	$\frac{10^{-3}}{3} (2 - j 84)$	$\frac{10^{-3}}{3} (-7,6 + j 2,64)$

Таблица 5

Y_{ba}^{11}	$Y_{ba}^{12} = Y_{ba}^{21}$	Y_{ba}^{22}
$\frac{10^{-3}}{3} (0,6 + j 18)$	$\frac{10^{-3}}{3} (0,1 - j 70)$	$\frac{10^{-3}}{3} (-1 + j 292)$

Параметры полной схемы распределительной сети определяются по формулам (7). Определители и алгебраические дополнения матрицы проводимости вычислены на машине «Урал-2» по методике [5].

Для I варианта.

Расчетные $|Z_{\Sigma}| = 82 \text{ ом}$;
измеренное на модели РСС $Z_{\Sigma} = 80 \text{ ом}$;
расчетное $b = \ln/32 = 3,5 \text{ неп}$;
измеренное на модели $b = 2,3 \text{ неп}$.

Для II варианта.

Расчетное $|Z_{\Sigma}| = 37 \text{ ом}$;
измеренное на модели РСС $Z_{\Sigma} = 40 \text{ ом}$;
расчетное $b = 1,87 \text{ неп}$;
измеренное на модели РСС $b = 1,4 \text{ неп}$.

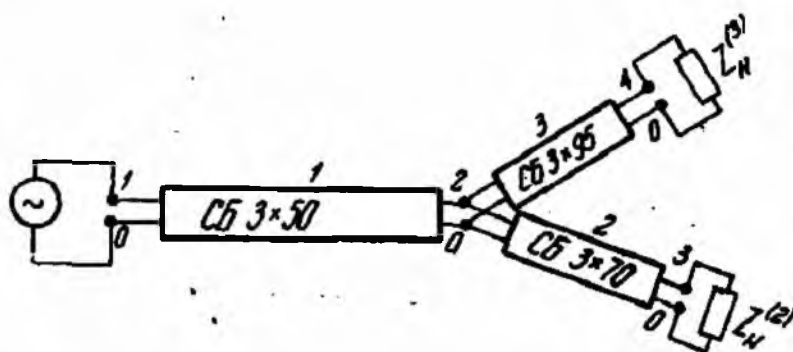


Рис. 4.

Упрощенный расчет РСС применим для симметричных линий, у которых матрицы проводимостей значительно упрощаются. Принимая во внимание, что бронированный кабель — симметричная линия, расчет такого канала ведем по упрощенной методике. Передача осуществляется по схеме «фаза—земля». Эквивалентная схема участка приведена на рис. 4.

$$Z_{\Sigma}^{(2)} = 1,9; Z_{\Sigma}^{(3)} = 18; \frac{1}{Z_{\Sigma}^{(2)}} = 0,052; \quad \frac{1}{Z_{\Sigma}^{(3)}} = 0,055;$$

$$Y_{11} = Y_{22} = \frac{1}{Z_c} \operatorname{ctg} \gamma l; \quad Y_{12} = Y_{21} = -\frac{1}{Z_c \operatorname{sh} \gamma l}.$$

Первый участок. Кабель СБ 3 × 50; $l = 700 \text{ м}$; $Z_c = 23$

$$\frac{1}{F_c} = 0,045; \quad f = 60 \text{ кГц}; \quad \beta l = 0,126;$$

$$\alpha l = 1,72.$$

$$\gamma l = 0,126 + j 1,72;$$

$$\operatorname{cth} \gamma l = 0,13 + j 0,13;$$

$$\frac{1}{\operatorname{sh} \gamma l} = -0,02 - j;$$

$$Y_{11} = \frac{1}{Z_c} \operatorname{cth} \gamma l = 0,0435(0,13 + j 0,13) = 5,7 + j 5,7 \cdot 10^{-3};$$

Т а б л и ц а

Матрица приращений при / — 60 кгц

1	22,4 + j20	-1,6 — j9,2	1,74 + j154	—j70				
2	-1,6 — j9,2	23 + j31	—j70	3,4 + j238				
3	1,74 — j154	—j70	42,8 — j20,7	-15,6 + j10,2	-5 + j174	2 — j85	-0,6 + + j181	0,1 — j70
4	—j70	3,4 + j238	-15,6 + j10,2	90 — j30,4	2 — j84	-7,6 + j284	0,1 — j70	-1 + j292
5			-5 + j174	2 — j84	174 — j46	-7,2 + j21,5		
6			2 — j84	-7,6 + j284	-7,2 + j21,4	28 — j70		
7			-0,6 + j181	0,1 — j70			1) 22,4 + j5,3 2) 187,4 + j5,3	-6,8 — j2
8			0,1 — j70	-1 + j298			-6,8 — j2	38 + j8,6

$$Y_{12} = -\frac{1}{Z_c \operatorname{sh} \gamma l} = -0,0435(-0,02 - j) = (0,9 + j4,4) \cdot 10^{-3}$$

Второй участок. Кабель СБ 3×70 ; $l = 500$ м;

$$Z_c = 19; \quad \frac{1}{Z_c} = 0,053; \quad \beta l = 0,116; \quad \alpha l = 1,3;$$

$$\gamma l = 0,116 + j1,3; \quad \operatorname{cth} \gamma l = 0,12 - j0,27; \quad \frac{1}{\operatorname{sh} \gamma l} = 0,03 - j;$$

$$Y_{11} = Y_{22} = 0,053(0,12 - j0,27) = (6,3 - j1,42) \cdot 10^{-3};$$

$$Y_{12} = Y_{21} = -0,053(0,53 - j) = (-1,6 + j53) \cdot 10^{-3}.$$

Третий участок. Кабель СБ 3×95 ; $l = 600$ м; $Z_c = 18$;

$$\frac{1}{Z_c} = 0,056; \quad \beta l = 14; \quad \alpha l = 1,62;$$

$$\gamma l = 0,14 + j1,62;$$

$$\operatorname{cth} \gamma l = 0,14 + j0,03; \quad \frac{1}{\operatorname{sh} \gamma l} = 0,004 - j;$$

$$Y_{11} = Y_{22} = 0,056(0,14 + j0,03) = (7,8 + j1,7) \cdot 10^{-3};$$

$$Y_{12} = Y_{21} = -0,056(-0,004 - j) = (0,02 + j56) \cdot 10^{-3}.$$

Матрица проводимостей для упрощенного варианта

	1	2	3	4
1	$5,7 + j6,7$	$0,9 + j44$		
2	$0,9 + j44$	$19,8 - j6,8$	$-1,6 + j53$	$0,02 + j56$
$10^{-3} \times 3$		$-1,6 + j53$	$58,3 - j14,2$	
4		$0,02 + j56$		$70,6 + j3,4$

Определяем сопротивления и затухание для РСС:

I вариант

$$Z_{\text{вх}}^{(1)} = \frac{19\Delta_{11}^{(1)} + \Delta_{11,33}^{(1)}}{19\Delta_{11}^{(1)} + \Delta_{33}^{(1)}}; \quad b^{(1)} = \ln \left| \frac{19\Delta_{11}^{(1)} + \Delta_{11,33}^{(1)}}{19\Delta_{13}^{(1)}} \right|.$$

II вариант

$$Z_{\text{вх}}^{(2)} = \frac{19\Delta_{11}^{(2)} + \Delta_{11,33}^{(2)}}{19\Delta_{11}^{(2)} + \Delta_{33}^{(2)}};$$

$$b^{(2)} = \ln \left| \frac{19\Delta_{11}^{(2)} + \Delta_{11,33}^{(2)}}{19\Delta_{13}^{(2)}} \right|.$$

На ЦВМ найдены определители и алгебраические дополнения:

I вариант

$$\begin{aligned}\Delta &= (2,38 + j0,92) \cdot 10^{-5} \\ \Delta_{11} &= (2,1 - j0,42) \cdot 10^{-4} \\ \Delta_{11,33} &= (3,3 - j0,02) \cdot 10^{-5} \\ \Delta_{33} &= (3,4 + j2,1) \cdot 10^{-5} \\ \Delta_{12} &= (-1,82 - j0,41) \cdot 10^{-5} \\ Z_{yx} &= 79 - j12 \\ |Z_{yx}| &= 80 \text{ ом} \\ Z_{yx} \text{ модели} &= 80 \text{ ом}\end{aligned}$$

$$b = \ln \left| \frac{7,3 - j0,82}{-3,5 - j0,78} \right| \cdot 10 = 3 \text{ неп;}$$

в модели = 2,3 неп.

II вариант

$$\begin{aligned}\Delta &= (10 + j0,2) \cdot 10^{-6} \\ \Delta_{11} &= (14,2 - j0,7) \cdot 10^{-6} \\ \Delta_{11,33} &= (4,4 - j0,39) \cdot 10^{-7} \\ \Delta_{33} &= (15j + 2,1) \cdot 10^{-6} \\ \Delta_{12} &= (-14,65 - j0,54) \cdot 10^{-7} \\ Z_{yx} &= 36 - j7,8 \\ |Z_{yx}| &= 37 \text{ ом.} \\ Z_{yx} \text{ модели} &= 40 \text{ ом}\end{aligned}$$

$$b = \ln \left| \frac{12,4 - j1,72}{-2,76 - j1,05} \right| = 1,5 \text{ неп;}$$

в модели = 1,4 неп.

Как видно из расчета, методика определения Z_{yx} и b для РСС с достаточной степенью точности совпадает с экспериментальными данными. Для симметричной РСС можно пользоваться упрощенной методикой расчета.

Таким образом, метод узловых напряжений весьма удобен для расчета каналов связи по разветвленным трехфазным сетям. Метод обладает универсальностью, так как по составленной матрице проводимостей можно рассчитывать каналы связи по различным направлениям сети весьма сложной конфигурации. Процесс вычисления высокочастотных параметров разветвленных энергетических сетей как каналов телемеханики может быть легко автоматизирован.

ЛИТЕРАТУРА

1. Э. В. Зелях. Основы общей теории линейных электрических схем. Изд-во МЭИ СССР, 1951.
2. Л. Я. Нагорный. Анализ и расчет усилительных схем. Гостехиздат СССР, 1963.
3. В. П. Сигорский. Методы анализа электрических схем с многополюсными элементами. Изд-во АН УССР, 1958.
4. М. Я. Каллер. Теория электрических цепей. Трансжелдориздат, 1962.
5. Б. П. Демидович, И. А. Марон. Основы вычислительной математики, Физматгиз, 1963.