

# РАСЧЕТ ПАРАМЕТРОВ ВЫСОКОЧАСТОТНЫХ КАНАЛОВ, ОРГАНИЗОВАННЫХ ПО СИЛОВОЙ КАБЕЛЬНОЙ СЕТИ ШАХТ

*И. Ф. Огороднейчук*

Харьков

При расчете параметров высокочастотных каналов будем пользоваться методом узловых напряжений [1].

Обобщенными параметрами элементов сети являются матрицы проводимости. Так как сложная разветвленная сеть представляет собой неоднородную разветвленную линию, то ее следует разделять на отдельные однородные участки.

В общем виде сосредоточенные нагрузки (асинхронные электродвигатели, трансформаторы) можно представить многополюсниками типа  $(P + 1)$ .

Матрица проводимости асинхронного короткозамкнутого электродвигателя [2] равна:

а) для электродвигателя с обмоткой, соединенной треугольником:

$$\vec{Y}_\Delta = \begin{vmatrix} Y_{3k} + Y_{23} + Y_{13} - Y_{23} - Y_{13} \\ -Y_{23}Y_{2k} + Y_{12} + Y_{23} - Y_{12} \\ -Y_{13} - Y_{12}, Y_{1k} + Y_{12} + Y_{13} \end{vmatrix} \quad (1)$$

б) для двигателя, обмотка которого соединена звездой

$$\vec{Y}_Y = \begin{vmatrix} \left[ \frac{Y_3(Y_2Y_1)}{\Sigma Y_i} + \frac{Y_{3k}(Y_{2k} + Y_{1k})}{\Sigma Y_{ik}} \right] - \left[ \frac{Y_2Y_3}{\Sigma Y_i} + \frac{Y_{2k}Y_{3k}}{\Sigma Y_{ik}} \right] - \left[ \frac{Y_3Y_1}{\Sigma Y_i} + \frac{Y_{3k}Y_{1k}}{\Sigma Y_{ik}} \right] \\ \left[ \frac{Y_2Y_3}{\Sigma Y_i} + \frac{Y_{3k}Y_{2k}}{\Sigma Y_{ik}} \right] \left[ \frac{Y_2(Y_1 + Y_3)}{\Sigma Y_i} + \frac{Y_{2k}(Y_{1k} + Y_{3k})}{\Sigma Y_{ik}} \right] \left[ \frac{Y_2Y_3}{\Sigma Y_i} + \frac{Y_{2k}Y_{3k}}{\Sigma Y_{ik}} \right] \\ \left[ \frac{Y_3Y_1}{\Sigma Y_i} + \frac{Y_{3k}Y_{1k}}{\Sigma Y_{ik}} \right] - \left[ \frac{Y_2Y_3}{\Sigma Y_i} + \frac{Y_{2k}Y_{3k}}{\Sigma Y_{ik}} \right] \left[ \frac{Y_1(Y_2 + Y_3)}{\Sigma Y_i} + \frac{Y_{1k}(Y_{2k} + Y_{3k})}{\Sigma Y_{ik}} \right] \end{vmatrix}, \quad (2)$$

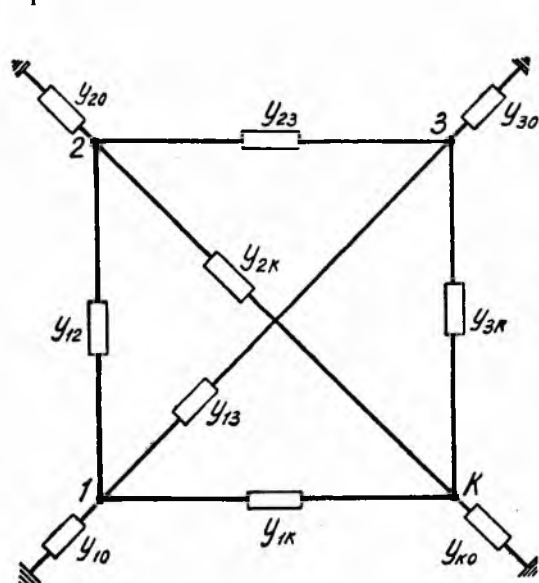
где  $\Sigma Y_i = Y_1 + Y_2 + Y_3$ ;  $\Sigma Y_{ik} = Y_{1k} + Y_{2k} + Y_{3k}$ .

Матрицы проводимости получены, исходя из схем замещения электродвигателей, рис. 1 и рис. 2,

где  $Y_{12}, Y_{13}, Y_{23}$  — собственные проводимости фаз;

$Y_{1k}, Y_{2k}, Y_{3k}$  — проводимости фаз по отношению к корпусу.

Проводимости фаз выражаются через частичные параметры следующим образом:



$$Y_{12} = \frac{1}{R_{12}} + j\omega C_{12} \left(1 - \frac{1}{\omega^2 L_{12} C_{12}}\right),$$

$$Y_{23} = \frac{1}{R_{23}} + j\omega C_{23} \times$$

$$\times \left(1 - \frac{1}{\omega^2 L_{23} C_{12}}\right),$$

$$Y_{13} = \frac{1}{R_{13}} + j\omega C_{13} \left(1 - \frac{1}{\omega^2 L_{13} C_{13}}\right), \quad (3)$$

$$Y_{1k} = G_{1k} + j\omega C_{1k};$$

$$Y_{2k} = G_{2k} + j\omega C_{2k};$$

$$Y_{3k} = G_{3k} + j\omega C_{3k}.$$

Рис. 1. Схема замещения обмотки электродвигателя при соединении ее треугольником.

Проводимости  $Y_1, Y_2, Y_3$  могут быть найдены по известным формулам.

Аналогично найдены матрицы проводимости для трансформатора, как концевой нагрузки, рис. 3 и рис. 4, которые легко сводятся к схемам, рис. 1 и рис. 2.

Для трансформатора с соединением обмоток  $\Delta/\Delta$  матрица проводимости равна

$$Y'_{\Delta/\Delta} = \begin{bmatrix} Y'_{3k} + Y'_{23} + Y'_{13} - Y'_{23} - Y'_{13} \\ -Y'_{23}Y'_{2k} + Y'_{12} + Y'_{23} - Y'_{12} \\ -Y'_{13} - Y'_{12}Y'_{1k} + Y'_{12} + Y'_{13} \end{bmatrix}. \quad (4)$$

Для трансформатора с соединением обмоток  $\lambda/\lambda$  матрица проводимости равна

$$\vec{Y}'_{\lambda/\lambda} = \begin{bmatrix} \left[ \frac{Y'_3(Y'_2 + Y'_1)}{\sum Y_i} + \frac{Y'_{3k}(Y'_{2k} + Y'_{1k})}{\sum Y_{ik}} \right] - \left[ \frac{Y'_2Y'_3}{\sum Y_i} + \frac{Y'_{2k}Y'_{3k}}{\sum Y_{ik}} \right] - \left[ \frac{Y'_3Y'_1}{\sum Y_i} + \frac{Y'_{3k}Y'_{1k}}{\sum Y_{ik}} \right] \\ \left[ \frac{Y'_2Y'_3}{\sum Y'_i} + \frac{Y'_{2k}Y'_{3k}}{\sum Y'_{ik}} \right] \left[ \frac{Y'_2(Y'_1 + Y'_3)}{\sum Y_i} + \frac{Y'_{2k}(Y'_{1k} + Y'_{3k})}{\sum Y'_{ik}} \right] - \left[ \frac{Y'_2Y'_3}{\sum Y'_i} + \frac{Y'_{2k}Y'_{3k}}{\sum Y'_{ik}} \right] \\ \left[ \frac{Y'_3Y'_1}{\sum Y_i} + \frac{Y'_{3k}Y'_{1k}}{\sum Y'_{ik}} \right] - \left[ \frac{Y'_2Y'_3}{\sum Y'_i} + \frac{Y'_{2k}Y'_{3k}}{\sum Y'_{ik}} \right] \left[ \frac{Y'_1(Y'_2 + Y'_3)}{\sum Y'_i} + \frac{Y'_{1k}(Y'_{2k} + Y'_{3k})}{\sum Y'_{ik}} \right] \end{bmatrix}_{\lambda}$$

где

$$Y'_{12}, Y'_{23}, Y'_{13}, Y'_{1k}, Y'_{2k}, Y'_{3k}$$

также могут быть выражены через частичные параметры трансформатора.

Гибкие четырехжильные и бронированные силовые кабели могут быть представлены схемами замещения, для которых не трудно найти матрицы проводимости.

Для Т-образной схемы замещения (рис. 5) бронированного кабеля условие симметрии выражается следующим образом:

$$\begin{aligned} Z'_1 = Z'_2 = Z'_3 = Z''_1 = Z''_2 = Z''_3 = Z_1; \quad Y_{14} = Y_{24} = Y_{34} = Y_{10}; \\ Z'_4 = Z''_4 = Z_2; \quad Y_{12} = Y_{23} = \\ = Y_{13} = Y_{11}. \end{aligned}$$

Здесь

$$Z'_1 = \frac{\omega L_1}{2}; \quad Z'_2 = \frac{\omega L_2}{2} = Z''_2;$$

$$Z'_3 = \frac{\omega L_3}{2} = Z''_3; \quad Z'_4 = \frac{\omega L_4}{2} = Z''_4$$

и

$$Y_{12} = j\omega C_{12}, \quad Y_{23} = j\omega C_{23},$$

$$Y_{13} = j\omega C_{13};$$

$$Y_{24} = j\omega C_{24}, \quad Y_{12} =$$

$$= j\omega C_{14}, \quad Y_{34} = j\omega C_{34}.$$

Такой  $2(P+1)$ -полюсник можно представить в виде простых  $2(P+1)$ -полюсников.

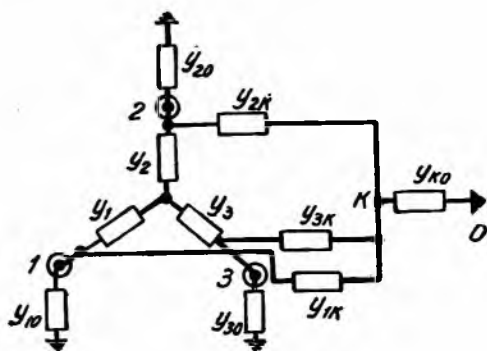


Рис. 2. Схема замещения обмотки электродвигателя при соединении ее звездой.

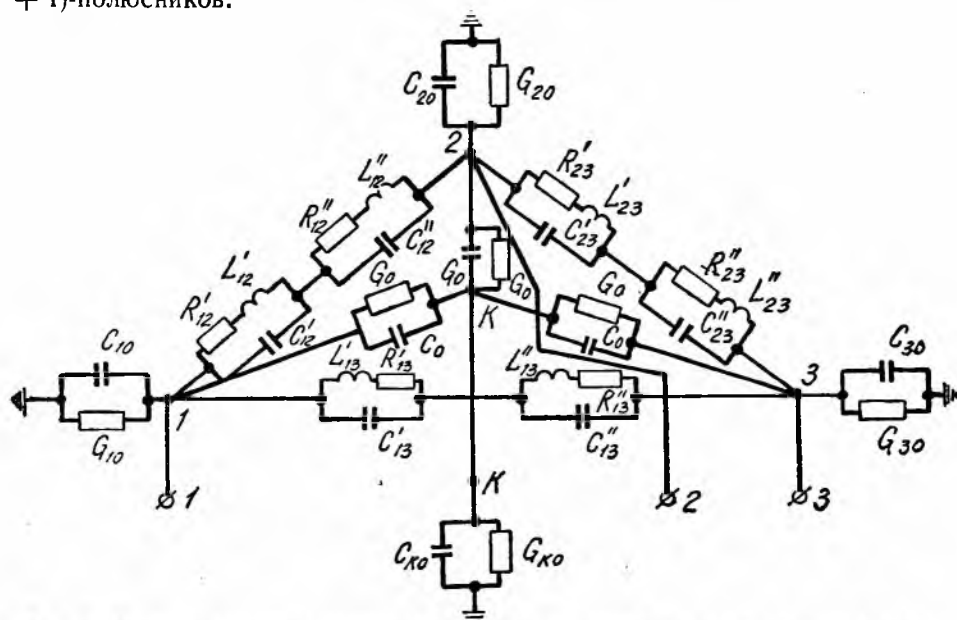


Рис. 3. Приведенная схема замещения трехфазного трансформатора при соединении.

Для  $2(P+1)$ -полюсника (1) матрица  $\vec{a}$  равна  $\vec{a}_{11} = \vec{a}_{22} = 1; \vec{a}_{21} = 0;$

$$\vec{a}_{12} = \begin{pmatrix} Z'_1 + Z'_4, & Z'_4, & Z'_4 \\ Z'_4, & Z'_2 + Z'_4, & Z'_4 \\ Z'_4, & Z'_4, & Z'_3 + Z'_4 \end{pmatrix}. \quad (6)$$

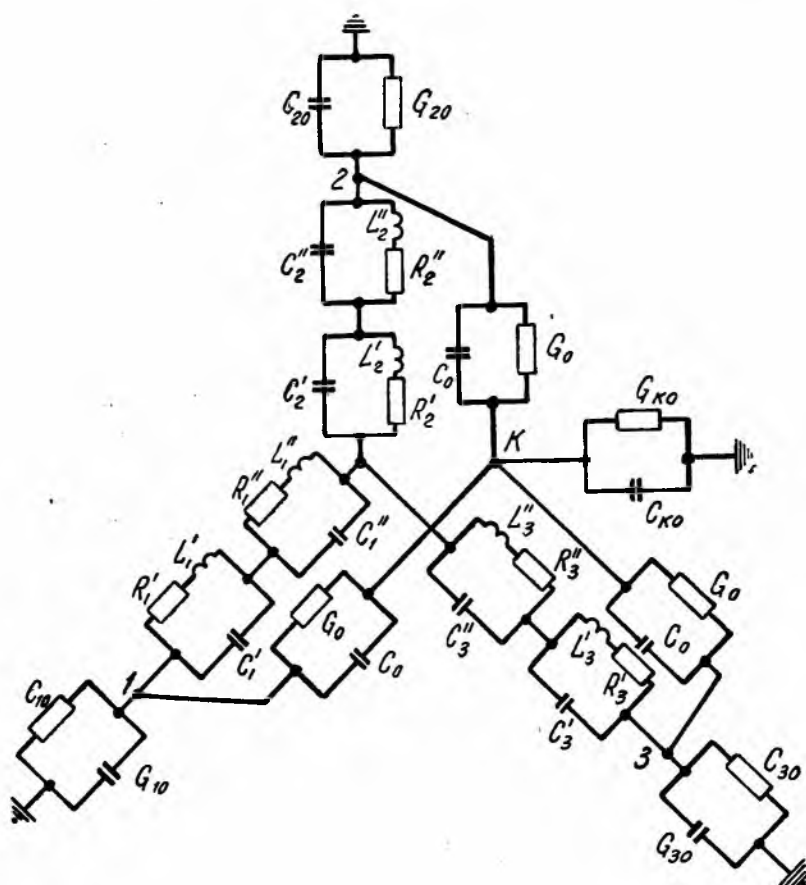


Рис. 4. Приведенная схема замещения трехфазного трансформатора при соединении.

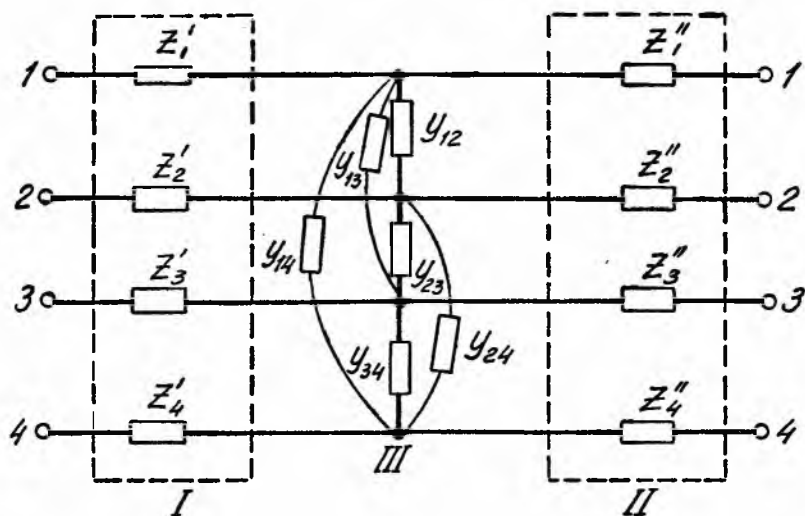


Рис. 5. Схема замещения четырехжильного гибкого и бронированного кабелей.

Аналогично можно записать и для многополюсника II:

$$\begin{aligned} \vec{a}_{11}^{\text{II}} = \vec{a}_{22}^{\text{II}} = 1; \quad \vec{a}_{21}^{\text{II}} = 0; \\ \vec{a}_{12}^{\text{II}} = \begin{vmatrix} Z_1^* + Z_4^*, & Z_4^*, & Z_4^* \\ Z_4^*, & Z_2^* + Z_4^*, & Z_4^* \\ Z_4^*, & Z_4^*, & Z_3^* + Z_4^* \end{vmatrix}, \end{aligned} \quad (7)$$

а для многополюсника III элементы матрицы  $\vec{a}$  равны:

$$\begin{aligned} \vec{a}_{11}^{\text{III}} = \vec{a}_{22}^{\text{III}} = 1; \quad \vec{a}_{12}^{\text{III}} = 0; \\ \vec{a}_{21}^{\text{III}} = \begin{vmatrix} Y_{14} + Y_{12} + Y_{13} - Y_{12}, & -Y_{13} \\ -Y_{12}, & Y_{12} + Y_{24} + Y_{23} - Y_{23} \\ -Y_{13} - Y_{23}, & Y_{13} + Y_{23} + Y_{34} \end{vmatrix}. \end{aligned} \quad (8)$$

Для каскадного соединения получим

$$\vec{a} = \vec{a}^{\text{I}} \vec{a}^{\text{III}} \vec{a}^{\text{II}}. \quad (9)$$

После несложных преобразований найдем матрицу проходного многополюсника

$$\vec{a}_6 = \begin{vmatrix} \vec{a}_{aa}, & \vec{a}_{ab} \\ \vec{a}_{ba}, & \vec{a}_{bb} \end{vmatrix}, \quad (10)$$

где  $\vec{a}_{aa}, \vec{a}_{ab}, \vec{a}_{ba}, \vec{a}_{bb}$  с учетом 6, 7, 8 равны

$$\vec{a}_{aa} = 1 + \vec{a}_{12}^{\text{I}} \vec{a}_{21}^{\text{III}}; \quad \vec{a}_{ba} = \vec{a}_{21}^{\text{III}}; \quad (11)$$

$$\vec{a}_{ab} = \vec{a}_{12}^{\text{II}} + \vec{a}_{12}^{\text{I}} \vec{a}_{21}^{\text{III}} \vec{a}_{12}^{\text{II}} + \vec{a}_{12}^{\text{I}}; \quad \vec{a}_{bb} = 1 + \vec{a}_{21}^{\text{III}} \vec{a}_{12}^{\text{II}}.$$

Для гибкого четырехжильного кабеля условия симметрии запишем следующим образом:

$$Z_1' = Z_2' = Z_3' = Z_4' = Z_1'' = Z_2'' = Z_3'' = Z_4'' = Z,$$

$$Y_{12} = Y_{23} = Y_{34} = Y_{14} = Y_1,$$

$$Y_{12} = Y_{24} = Y_2.$$

Матрица звена схемы замещения четырехжильного гибкого кабеля определяется аналогично, как и для бронированного кабеля

$$\vec{a}_2 = \begin{vmatrix} a_{aa}, & a_{ab} \\ a_{ba}, & a_{bb} \end{vmatrix}. \quad (12)$$

Элементы матрицы равны

$$\vec{a}_{aa} = 1 + \vec{a}_{12}^{\text{I}} \vec{a}_{21}^{\text{III}},$$

$$\vec{a}_{ab} = \vec{a}_{12}^{\text{II}} + \vec{a}_{12}^{\text{I}} \vec{a}_{21}^{\text{III}} \vec{a}_{12}^{\text{II}} + \vec{a}_{12}^{\text{I}}, \quad (13)$$

$$\vec{a}_{ba} = \vec{a}_{21}^{\text{III}}; \quad \vec{a}_{bb} = 1 + \vec{a}_{21}^{\text{III}} \vec{a}_{12}^{\text{II}}.$$

Принимая во внимание условия симметрии гибкого кабеля, можно получить развернутые записи матричных уравнений 13, где элементы матриц выражаются через частичные параметры.

Зная матрицы  $\vec{a}_b$  и  $\vec{a}_r$  можно определить цепочечные матрицы и далее матрицы проводимостей проходного многополюсника. Связь между матрицами  $\vec{a}$  и  $\vec{Y} 2(P+1)$ -полюсника имеет вид

$$\begin{vmatrix} Y_{aa} & Y_{ab} \\ Y_{ba} & Y_{bb} \end{vmatrix} = \begin{vmatrix} \vec{a}_{bb}\vec{a}_{ab}, \vec{a}_{ba}, -\vec{a}_{bb}\vec{a}_{ab}\vec{a}_{aa} \\ \vec{a}_{ab} - \vec{a}_{ab}\vec{a}_{aa} \end{vmatrix}. \quad (14)$$

На основе этого равенства найдем матрицу проводимости для бро-нированного кабеля

$$\vec{Y}_6 = \begin{vmatrix} \vec{Y}_{aa}^6 & \vec{Y}_{ab}^6 \\ \vec{Y}_{ba}^6 & \vec{Y}_{bb}^6 \end{vmatrix} \quad (15)$$

и гибкого кабеля

$$\vec{Y}_r = \begin{vmatrix} \vec{Y}_{aa}^r & \vec{Y}_{ab}^r \\ \vec{Y}_{ba}^r & \vec{Y}_{bb}^r \end{vmatrix}, \quad (16)$$

где

$$\vec{Y}_{aa}^6 = \begin{vmatrix} Y_{11}^6 & Y_{12}^6 & Y_{13}^6 \\ Y_{21}^6 & Y_{22}^6 & Y_{23}^6 \\ Y_{31}^6 & Y_{32}^6 & Y_{33}^6 \end{vmatrix}; \quad (17)$$

$$\vec{Y}_{ab}^6 = \begin{vmatrix} Y_{1, p+1}^6 & Y_{1, p+2}^6 & Y_{1, p+3}^6 \\ Y_{2, p+1}^6 & Y_{2, p+2}^6 & Y_{2, p+3}^6 \\ Y_{3, p+1}^6 & Y_{3, p+2}^6 & Y_{3, p+3}^6 \end{vmatrix}; \quad (18)$$

$$\vec{Y}_{ba}^6 = \begin{vmatrix} Y_{p+1, 1}^6 & Y_{p+1, 2}^6 & Y_{p+1, 3}^6 \\ Y_{p+2, 1}^6 & Y_{p+2, 2}^6 & Y_{p+2, 3}^6 \\ Y_{p+3, 1}^6 & Y_{p+3, 2}^6 & Y_{p+3, 3}^6 \end{vmatrix}; \quad (19)$$

$$\vec{Y}_{bb}^6 = \begin{vmatrix} Y_{p+1, p+1} & Y_{p+1, p+2} & Y_{p+1, p+3} \\ Y_{p+2, p+1} & Y_{p+2, p+2} & Y_{p+2, p+3} \\ Y_{p+3, p+1} & Y_{p+3, p+2} & Y_{p+3, p+3} \end{vmatrix}. \quad (20)$$

Здесь индексы 1, 2, 3 относятся к левой стороне проходного многополюсника, а  $p+1$ ,  $p+2$ ,  $p+3$  к правой стороне проходного многополюсника.

Аналогично можно найти проводимости для проходного многополюсника гибкого кабеля.

Таким образом, для расчета разветвленных энергетических сетей, как каналов телемеханики, матрицы отдельных элементов сети могут быть определены по 1, 2, 4, 5, 10, 12.

Теперь перейдем непосредственно к расчету канала, организованного на разветвленной энергетической сети, которая состоит из одного сило-

вого понижающего трансформатора, бронированных и гибких кабелей и электродвигателей, рис. 6.

Таблица 1

|   | 1                   | 2                                       | 3                       | 4                   |
|---|---------------------|-----------------------------------------|-------------------------|---------------------|
| 1 | $Y_1 + Y_{aa}^{II}$ | $Y_{ab}^{II}$                           |                         |                     |
| 2 | $Y_{ba}^{II}$       | $Y_{bb}^{II} + Y_{aa}^{III} + Y_{aa}^V$ | $Y_{ab}^{III}$          | $Y_{ab}^V$          |
| 3 |                     | $Y_{ba}^{III}$                          | $Y_{bb}^{III} + Y_{IV}$ |                     |
| 4 |                     | $Y_{ba}^V$                              |                         | $Y_{ab}^V + Y_{VI}$ |

Пользуясь методом [1], найдем матрицу проводимости схемы, рис. 6.

Представим себе кабельную сеть в виде двухпроводных линий с соответствующими первичными и вторичными параметрами, а концевые нагрузки (электродвигатели и трансформаторы), как двухполюсники с соответствующими проводимостями.

Для такой сети эквивалентная схема показана на рис. 7.

Матрица проводимости схемы 7 записывается следующим образом: в клетки на пересечении  $P$ -ой строки и  $P$ -го столбца,  $g$ -ой строки и  $g$ -го столбца вписываются собственные проводимости проходного четырехполюсника  $Y_{pp}$ ,  $Y_{gg}$ , а взаимные проводимости  $Y_{pg}$ ,  $Y_{gp}$  вписываются на пересечении  $P$ -ой строки  $g$ -го столбца, или  $g$ -ой строки  $P$ -го столбца, который включен между  $P$  и  $g$  узлами.

Проводимость двухполюсника, включенного между  $P$ -ым узлом и базисным вписывается в клетки на пересечении  $P$ -ой строки и  $P$ -го столбца.

В соответствии с этим матрица проводимости схемы запишется следующим образом: (табл. 1)

Так как  $Y_1^I$ ,  $Y_{VI}^V$ ,  $Y_{VI}$  в многопроводной схеме являются не двухполюсниками, а многополюсниками типа  $(P+1)$ , и  $Y^{II}$ ,  $Y^{III}$ ,  $Y^V$  — проходными многополюсниками типа  $2(P+1)$ , то матрица проводимости схемы, рис. 6 представленная таблица 1 является сложной матрицей, у которой элементы являются, в свою очередь, матрицами.

Так как матрицы проводимости трансформатора, электродвигателей и кабелей имеют в общем виде третий порядок, то легко можно получить простую матрицу, порядок которой будет равен произведению порядка сложной матрицы на порядок матрицы элемента. В данном конкретном случае порядок матрицы равен 12.

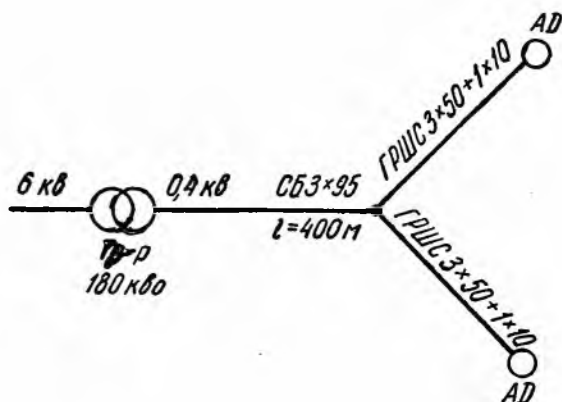


Рис. 6. Разветвленная энергетическая сеть.

Элементы матрицы в табл. 2 записаны на основе матриц многополюсников  $P+1$  и  $2(P+1)$  и матрицы, см табл. 1.  
где

$$Y_I = Y_{\Delta/\Delta} \quad \vec{Y}_{IV} = \vec{Y}_{\Delta}^{IV}$$

$$\vec{Y}_{II} = Y_{\Delta}^{II} = \begin{Bmatrix} Y_{aa}^{II} & Y_{ab}^{II} \\ Y_{ba}^{II} & Y_{bb}^{II} \end{Bmatrix}; \quad \vec{Y}_V = \vec{Y}_{\Delta}^V = \begin{Bmatrix} Y_{aa}^V & Y_{ab}^V \\ Y_{ba}^V & Y_{bb}^V \end{Bmatrix};$$

$$Y_{III} = Y_{\Delta}^{III} = \begin{Bmatrix} Y_{aa}^{III} & Y_{ab}^{III} \\ Y_{ba}^{III} & Y_{bb}^{III} \end{Bmatrix}; \quad \vec{Y}_{VI} = \vec{Y}_{\Delta}^{VI}.$$

Методика записи матрицы проводимости схемы, табл. 2, простая, в каждую клетку матрицы, табл. 1 следует вписывать соответствующие матрицы многополюсников. Откуда можно определить входное сопротивление, относительно любых зажимов. Например, для зажимов 1 и базисного в режиме холостого хода, т. е. при  $Y_I = 0$ ,  $Y_{IV} = 0$  и  $Y_{VI} = 0$ .

$$Z_{bx} = \frac{\Delta_{11}}{\Delta}, \quad (21)$$

где  $\Delta_{11}$  — алгебраическое дополнение определителя матрицы проводимости схемы,  $\Delta$  — определитель матрицы проводимости схемы. Коэффициент передачи по напряжению между узлами 1 и  $n$  равен в режиме холостого хода

$$K_{1n}^u = \frac{\Delta_{1n}}{\Delta_{11}}, \quad (22)$$

где  $\Delta_{1n}$  и  $\Delta_{11}$  — алгебраические дополнения определителя матрицы проводимости схемы. Отсюда можно определить затухание и другие параметры схемы. Если же нужно определить параметры канала сети с учетом конечных нагрузок, то необходимо матрицу проводимости конечной нагрузки преобразовать в матрицу  $\vec{Z}$  по формуле

$$\vec{Z} = Y^{-1}$$

и в этом случае матрица входного сопротивления определится

$$Z_{bx} = \frac{Z_n \Delta_{aa} + \Delta_{aabb}}{Z_n \Delta + \Delta_{bb}}. \quad (23)$$

Матрица коэффициента передачи по напряжению равна:

$$K_u = \frac{Z_n \Delta_{ab}}{Z_n \Delta_{aa} + \Delta_{aa, bb}}. \quad (24)$$

Здесь расчет разветвленных сетей дан в самом общем виде. На практике требуется знать параметры канала для какой-нибудь определенной системы («фаза — земля», «три фазы — земля», «фаза — фаза», «две фазы —

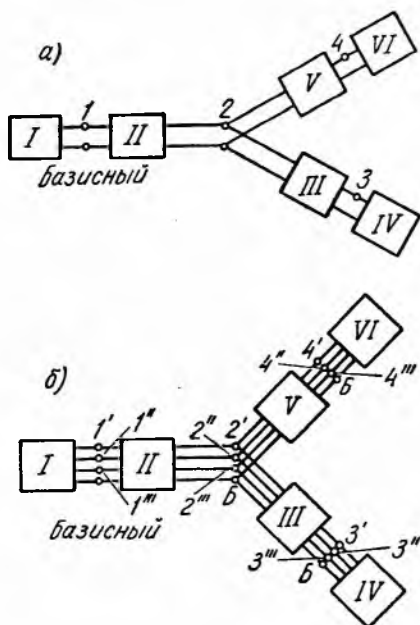


Рис. 7. Блок-схема разветвленной энергетической сети.

земля»). Очевидно, запись матрицы проводимости для различных систем будет различная. Для того, чтобы записать матрицу проводимости схемы для различных систем подключения, вначале найдем матрицы проводимости отдельных элементов сети.

1. Для системы «фаза — земля». Пусть подключение аппаратуры телемеханики произведено по системе «фаза — земля». Так как напряжение высокой частоты на второй и первой фазе равны, а задающий ток равен сумме токов первой и второй фаз, то в системе уравнений, записанных на основе метода узловых напряжений, вместо первого и второго уравнения появится одно уравнение, у которого в левой части задающие токи суммируются, а в правой части суммируются коэффициенты  $U_1$  и  $U_2$ .

Таким образом, в матрице проводимости суммируются третья и вторая строка и третий и второй столбцы.

Для асинхронного короткозамкнутого электродвигателя с обмоткой, соединенной треугольником, матрица проводимости для системы «фаза — земля» будет иметь вид

$$\vec{Y}_\Delta = Y_{23} + Y_{13} \left\| \begin{array}{cc} \frac{Y_{3k}}{Y_{23} + Y_{13}} + 1, & -1 \\ -1, & \frac{Y_{3k} + Y_{1k}}{Y_{23} + Y_{13}} + 1 \end{array} \right\|_{\Phi-s}; \quad (25)$$

для симметричной обмотки

$$\vec{Y}_\Delta = 2Y_{12} \left\| \begin{array}{cc} \frac{Y_{1k}}{2Y_{12}} + 1, & -1 \\ -1, & \frac{Y_{1k}}{Y_{12}} + 1 \end{array} \right\|; \quad (26)$$

для двигателя с обмоткой, соединенной звездой

$$\left\| \begin{array}{cc} \left[ \frac{Y_3(Y_2 + Y_1)}{\Sigma Y_t} + \frac{Y_{3k}(Y_{2k} + Y_{1k})}{\Sigma Y_{tk}} \right], & - \left[ \frac{Y_3(Y_2 + Y_1)}{\Sigma Y_t} + \frac{Y_{3k}(Y_{2k} + Y_{1k})}{\Sigma Y_{tk}} \right] \\ \left[ \frac{Y_3(Y_2 + Y_1)}{\Sigma Y_t} + \frac{Y_{3k}(Y_{2k} + Y_{1k})}{\Sigma Y_{tk}} \right], & \left[ \frac{2Y_2Y_1 + Y_3(Y_1 - Y_2)}{\Sigma Y_1} + \frac{2Y_{1k}Y_{2k} + Y_{3k}(Y_{1k} - Y_{2k})}{\Sigma Y_{tk}} \right] \end{array} \right\| \quad (27)$$

для симметричной обмотки

$$\vec{Y}_\lambda = \frac{2(Y_1 + Y_{1k})}{3} \left\| \begin{array}{cc} 1, & -1 \\ -1, & 1 \end{array} \right\|_{\Phi-s} \quad (28)$$

Аналогичные матрицы проводимости получим для трансформатора и поэтому их не приводим.

Матрицы проводимости проходных многополюсников при условии симметрии для системы «фаза — земля» запишутся следующим образом:

$$\vec{Y}_{aa} = \left\| \begin{array}{cc} Y_{11}, & 2Y_{12} \\ 2Y_{12}, & 2(Y_{11} + Y_{12}) \end{array} \right\|_{\Phi-s}, \quad (29)$$

$$\vec{Y}_{ab} = \left\| \begin{array}{cc} Y_{1, p+1}, & 2Y_{1, p+2} \\ 2Y_{1, p+2}, & 2(Y_{1, p+1} + Y_{1, p+2}) \end{array} \right\|_{\Phi-s},$$

$$\vec{Y}_{ba} = \left\| \begin{array}{cc} Y_{p+1, 1}, & 2Y_{p+1, 2} \\ 2Y_{p+1, 2}, & 2(Y_{p+1, 1} + Y_{p+1, 2}) \end{array} \right\|_{\Phi-s},$$

Таблица 1

| $i$ | $r_i$    | $i$ | $r_i$    | $i$ | $q_i$   |
|-----|----------|-----|----------|-----|---------|
| 1   | 0,77     | 59  | 0,0792   | 26  | 11,4517 |
| 2   | 0,606    | 60  | 0,0148   | 27  | 27,09   |
| 3   | 1,421    | 61  | 0,105    | 28  | 5 7290  |
| 4   | 0,542    | 62  | 0,329    | 29  | 6,8103  |
| 5   | 0,671    | 63  | 300      | 30  | 7,0166  |
| 6   | 1,064    | 64  | 0,001 12 | 31  | 7,1184  |
| 7   | 0,9041   | 65  | 0,007 98 | 32  | 9,6517  |
| 8   | 0,608    | 66  | 0,015    | 33  | 9,3272  |
| 9   | 1        | 67  | 0,0295   | 34  | 54,1965 |
| 10  | 4        | 68  | 0,0165   | 35  | 27,0982 |
| 11  | 17,3     | 69  | 0,0072   | 36  | 32,8281 |
| 12  | 6,3      | 70  | 0,002 06 | 37  | 5,7298  |
| 13  | 5,5      | 71  | 0,196    | 38  | 32,8281 |
| 14  | 295,3    | 72  | 0,0303   | 39  | 65,62   |
| 15  | 10       | 73  | 0,00551  | 40  | 30,7358 |
| 16  | 150      | 74  | 0,0128   | 41  | 29,7853 |
| 17  | 10       | 75  | 0,0181   | 42  | 28,8339 |
| 18  | 0,01     | 76  | 0        | 43  | 17,5438 |
| 19  | 0,12     | $i$ | $r_{pi}$ | 44  | 16,6136 |
| 20  | 0,1112   | 1   | 0,1402   | 45  | 14,8103 |
| 21  | 0,004 58 | 2   | 0        | 46  | 6,8103  |
| 22  | 32       | 3   | 2,6411   | 47  | 10,8103 |
| 23  | 38,6     | 29  | 0,0045   | 48  | 14,8103 |
| 24  | 3,3      | 30  | 0,6254   | 49  | 16,6136 |
| 25  | 76,18    | 31  | 0,5226   | 50  | 38,0065 |
| 26  | 0,0663   | 32  | 1,0495   | 51  | 38,9579 |
| 27  | 0,0003   | 33  | 1,2062   | 52  | 41,7984 |
| 28  | 0,000 96 | $i$ | $H_i^a$  | 53  | 32,34   |
| 29  | 0,0341   | 76  | 427,399  | 54  | 28,6617 |
| 30  | 0,0548   | $i$ | $q_i$    | 55  | 11,29   |
| 31  | 0,00711  | 1   | 4        | 56  | 17,635  |
| 32  | 0,0864   | 2   | 4        | 57  | 16,0166 |
| 33  | 0,187    | 3   | 3,5      | 58  | 5,5166  |
| 34  | 0,0029   | 4   | 4        | 59  | 10,5166 |
| 35  | 0,0003   | 5   | 5        | 60  | 17,635  |
| 36  | 0,0011   | 6   | 5,6      | 61  | 20,4627 |
| 37  | 0,000 96 | 7   | 7        | 62  | 21,393  |
| 38  | 0,0011   | 8   | 2,8103   | 63  | 0,9506  |
| 39  | 0,005 38 | 9   | 2,0166   | 64  | 34,92   |
| 40  | 0,002 56 | 10  | 1,2184   | 65  | 33,0303 |
| 41  | 0,001 08 | 11  | 2,6517   | 66  | 30,4087 |
| 42  | 0,029    | 12  | 2,3272   | 67  | 18,9789 |
| 43  | 0,0022   | 13  | 0,9513   | 68  | 9,6517  |
| 44  | 0,07     | 14  | 1,8033   | 69  | 9,3272  |
| 45  | 0,0331   | 15  | 0,9302   | 70  | 18,9789 |
| 46  | 0,0165   | 16  | 2,8277   | 71  | 21,2361 |
| 47  | 0,0351   | 17  | 2,8405   | 72  | 23,8578 |
| 48  | 0,0588   | 18  | 9,1726   | 73  | 33,3171 |
| 49  | 0,337    | 19  | 9,4584   | 74  | 36,9945 |
| 50  | 0,0676   | 20  | 3,6784   | 75  | 65,6562 |
| 51  | 0,00191  | 21  | 2,2572   | 76  | 77,0365 |
| 52  | 0,005 21 | 22  | 2,6216   |     |         |
| 53  | 0,0153   | 23  | 11,3803  |     |         |
| 54  | 0,0214   | 24  | 1,8892   |     |         |
| 55  | 0,0514   | 25  |          |     |         |
| 56  | 0,0103   |     |          |     |         |
| 57  | 0,0512   |     |          |     |         |
| 58  | 0,0165   |     |          |     |         |

$$Y'_{12} = -Y_{23} - \frac{Y_{13}Y_{12}}{Y_{12} + Y_{13} + Y_{1k}}; \quad (40)$$

$$Y'_{21} = -Y_{23} - \frac{Y_{12}Y_{13}}{Y_{12} + Y_{13} + Y_{1k}}; \quad (41)$$

$$Y'_{22} = Y_{23} + Y_{12} + Y_{2k} - \frac{Y_{12}^2}{Y_{12} + Y_{13} + Y_{1k}}. \quad (42)$$

Таким образом, для системы «фаза—фаза» матрица проводимости равна:

$$\vec{Y}_\Delta = \left\| \begin{array}{cc} Y_{3k} + Y_{23} + Y_{13} - \frac{Y_{13}^2}{Y_{1k} + Y_{12} + Y_{13}}, & -Y_{13} - \frac{Y_{13}Y_{12}}{Y_{1k} + Y_{12} + Y_{13}} \\ -Y_{23} - \frac{Y_{12}Y_{13}}{Y_{1k} + Y_{12} + Y_{13}}, & Y_{2k} + Y_{12} + Y_{23} - \frac{Y_{12}^2}{Y_{1k} + Y_{12} + Y_{13}} \end{array} \right\|_{\phi-\phi}. \quad (43)$$

Для симметричной обмотки

$$\vec{Y}_\Delta = \left\| \begin{array}{cc} Y_{1k} + 2Y_{12} - \frac{Y_{12}^2}{Y_{1k} + 2Y_{12}}, & -Y_{12} - \frac{Y_{12}^2}{Y_{1k} + 2Y_{12}} \\ -Y_{12} - \frac{Y_{12}^2}{Y_{1k} + 2Y_{12}}, & Y_{1k} + 2Y_{12} - \frac{Y_{12}^2}{Y_{1k} + 2Y_{12}} \end{array} \right\|_{\phi-\phi}. \quad (44)$$

или

$$\left\| \begin{array}{cc} Y_{1k} + 2Y_{12}, & -Y_{12} \\ -Y_{12}, & Y_{1k} + 2Y_{12} \end{array} \right\|_{\phi-\phi} = Y_{12} \left\| \begin{array}{cc} \frac{Y_{1k}}{Y_{12}} + 2, & -1 \\ -1, & \frac{Y_{1k}}{Y_{12}} + 2 \end{array} \right\|_{\phi-\phi}.$$

Для систем «фаза—фаза» и «2 фазы—фаза» целесообразно выбрать за базисный полюс одну из фаз, к которой подключается система телемеханики, объединив ее с базисным полюсом.

В соответствии с этим для системы «фаза—фаза» получим

$$\vec{Y}_\Delta = \left\| \begin{array}{cc} Y_{3k} + Y_{23} + Y_{13}, & -Y_{23} \\ -Y_{23}, & Y_{2k} + Y_{12} + Y_{23} \end{array} \right\|_{\phi-\phi}. \quad (45)$$

В случае симметричной обмотки

$$\vec{Y}_\Delta = \left\| \begin{array}{cc} Y_{1k} + 2Y_{12}, & -Y_{12} \\ -Y_{12}, & Y_{1k} + 2Y_{12} \end{array} \right\| = Y_{12} \left\| \begin{array}{cc} \frac{Y_{1k}}{Y_{12}} + 2, & -1 \\ -1, & \frac{Y_{1k}}{Y_{12}} + 2 \end{array} \right\|_{\phi-\phi}. \quad (46)$$

Для двигателя с обмоткой, соединенной звездой

$$\vec{Y}_\lambda = \left\| \begin{array}{cc} \left[ \frac{Y_3(Y_2 + Y_1)}{\Sigma Y_t} + \frac{Y_{3k}(Y_{2k} + Y_{1k})}{\Sigma Y_{tk}} \right], & -\left[ \frac{Y_3Y_2}{\Sigma Y_t} + \frac{Y_{3k}Y_{2k}}{\Sigma Y_{tk}} \right] \\ \left[ \frac{Y_2Y_3}{\Sigma Y_t} + \frac{Y_{3k}Y_{2k}}{\Sigma Y_{tk}} \right], & \left[ \frac{Y_2(Y_1 + Y_3)}{\Sigma Y_t} + \frac{Y_{2k}(Y_{1k} + Y_{3k})}{\Sigma Y_{tk}} \right] \end{array} \right\|. \quad (47)$$

Для симметричной обмотки

$$Y_\lambda = \frac{Y_1 + Y_{1k}}{3} \left\| \begin{array}{cc} 2, & -1 \\ -1, & 2 \end{array} \right\|. \quad (48)$$

Для системы «2 фазы—фаза».

При нахождении упрощенных матриц многополюсника следует объединить две фазы в одну эквивалентную. Отсюда матрица проводимости будет равна.

Для двигателя с обмоткой, соединенной треугольником:

$$\vec{Y}_\Delta = Y_{3k} + Y_{13} + Y_{2k} + Y_{12} = Y_{2\Phi-\Phi}. \quad (49)$$

Для двигателя, с обмоткой, соединенной звездой

$$\vec{Y}_\lambda = \frac{Y_1(Y_2 + Y_3)}{\Sigma Y_i} + \frac{Y_{1k}(Y_{2k} + Y_{3k})}{\Sigma Y_{ik}}. \quad (50)$$

Для симметричной обмотки:

$$\vec{Y}_\lambda = \frac{2}{3}(Y_1 + Y_{ik}). \quad (51)$$

Так, как в силовых распределительных сетях трансформаторы также являются концевыми нагрузками, то легко найти преобразованной матрицы проводимости схемы замещения трансформатора.

Для системы «2 фазы — фаза» матрица проводимости может быть упрощена путем объединения двух полюсов в один.

Представляя трансформатор и электродвигатель, как активный  $(P + 1)$ -полюсник, матрицы задающих токов будут равны.

Для системы «фаза — земля»:

$$\vec{I} = \begin{Bmatrix} 0 \\ 0 \\ Y_{3k} E_{3k} \end{Bmatrix}.$$

Для системы «3 фазы — земля»:

$$\vec{I} = \begin{Bmatrix} Y_{1k} E_{1k} \\ Y_{2k} E_{2k} \\ Y_{3k} E_{3k} \end{Bmatrix}.$$

Для системы «фаза — фаза»:

$$\vec{I} = \begin{Bmatrix} Y_{12} E_{12} \\ -Y_{12} E_{12} \\ 0 \end{Bmatrix}.$$

Для системы «2 фазы — фаза»:

$$\vec{I} = \begin{Bmatrix} Y_{12} E_{12} + Y_{12} E_{13} \\ -Y_{12} E_{12} \\ -Y_{13} E_{13} \end{Bmatrix}.$$

Матрицы концевых нагрузок (электрических машин с высокочастотной нагрузкой устройств телемеханики и связи) могут быть найдены по вышеприведенным формулам с учетом высокочастотной нагрузки.

Введем двухполюсник (высокочастотную нагрузку) в матрицу  $(P + 1)$  полюсника, то есть определим матрицу эквивалентной концевой нагрузки. Представим себе многополюсник в виде многополюсника типа  $(P + 1)$ , у которого все элементы равны нулю за исключением проводимости высокочастотной нагрузки.

Для системы «фаза — земля»:

$$\vec{Y}_{\phi-3}^H = \begin{vmatrix} 0, & 0, & 0 \\ 0, & 0, & 0 \\ 0, & 0, & Y_{1k}^H \end{vmatrix}.$$

Для системы «3 фазы — земля»;

$$\vec{Y}_{3\phi-3} = \begin{vmatrix} Y_{3k}^H, & & \\ & Y_{2k}^H, & \\ & & Y_{1k}^H \end{vmatrix}. \quad (48)$$

Для системы «фаза — фаза» (1—2):

$$\vec{Y}_{\phi-\phi} = \begin{vmatrix} 0, & 0, & 0 \\ 0, & Y_{12}, & -Y_{12} \\ 0, & -Y_{12}, & Y_{12} \end{vmatrix}. \quad (49)$$

Для системы «2 фазы — фаза» (3, 2—1):

$$\vec{Y}_{2\phi-\phi} = \begin{vmatrix} Y_{13}, & 0, & -Y_{13} \\ 0, & Y_{12}, & -Y_{12} \\ -Y_{13}, & -Y_{12}, & Y_{12} + Y_{13} \end{vmatrix}. \quad (50)$$

Зная матрицы проводимости нагрузки и матрицы эквивалентных схем замещения, легко определить матрицы эквивалентного многополюсника для следующих систем:

$$\begin{aligned} \vec{Y}_{\phi-3}^3 &= \vec{Y}_\Delta + \vec{Y}_{\phi-3}^H; & \vec{Y}_{\phi-\phi}^3 &= \vec{Y}_\Delta + \vec{Y}_{\phi-\phi}^H; \\ \vec{Y}_{3\phi-3}^3 &= \vec{Y}_\Delta + \vec{Y}_{3\phi-3}^H; & \vec{Y}_{2\phi-\phi}^3 &= \vec{Y}_\Delta + \vec{Y}_{2\phi-\phi}^H. \end{aligned} \quad (51)$$

То же самое можно записать для электродвигателя с обмоткой, соединенной звездой и для трансформатора при приведенном соединении к  $\Delta$  или  $\lambda$ .

Зная матрицы проводимости отдельных элементов (многополюсников) можно записать матрицу проводимости для схемы при подключении систем телемеханики по различным системам.

Из этого следует, что для системы «три фазы — земля» матрица проводимости аналогична матрице проводимости для обычной двухпроводной сети и в этом случае расчет канала в многофазной сети ничем не отличается от расчета канала для двухпроводной сети с нагрузками, представленными в виде двухполюсников.

Для всех других систем «фаза — земля», «2 фазы — фаза» и «фаза — фаза» расчет нужно производить по матрице, табл. 2. При этом следует заметить, что для этих систем порядок матрицы снижается, так матрицы элементов многополюсников для этих систем имеют второй порядок.

Для системы «три фазы — земля» можно вместо матрицы  $2(P+1)$ -полюсника пользоваться матрицей проводимости для двухпроводной линии с эквивалентными вторичными параметрами:

$$\vec{Y} = \begin{vmatrix} \frac{1}{Z_c} \operatorname{cth} \gamma l, & -\frac{1}{Z_c \operatorname{sh} \gamma l} \\ \frac{1}{Z_c \operatorname{sh} \gamma l}, & -\frac{1}{Z_c} \operatorname{cth} \gamma l \end{vmatrix}. \quad (52)$$

Желательно найти матрицу проводимости линий. Это значительно упростит вычисление параметров проходных многополюсников, и, в целом, весь расчет высокочастотных каналов.

#### ЛИТЕРАТУРА

1. В. П. Сигорский. Анализ электронных схем. Гостехиздат УССР, 1963.
  2. Э. Г. Дендер, И. Ф. Огороднейчук. Основы теории моделирования асинхронных электродвигателей, Сб. «Приборы и устройства автоматики и телемеханики». Вып. 1, изд-во ХГУ, 1965.
  3. Э. Г. Зелях. Основы общей теории линейных электрических схем. Изд-во АН СССР, 1951.
  4. И. Ф. Огороднейчук, В. Д. Остроухов. Моделирование силовых кабелей как каналов высокочастотной связи на основе изменения параметров реальных кабелей, Сб. «Приборы и устройства автоматики и телемеханики». Вып. 1, изд-во ХГУ, 1965.
-