

МОДЕЛИРОВАНИЕ СИЛОВЫХ КАБЕЛЕЙ КАК КАНАЛОВ ВЫСОКОЧАСТОТНОЙ СВЯЗИ НА ОСНОВЕ ИЗМЕРЕНИЯ ПАРАМЕТРОВ РЕАЛЬНЫХ КАБЕЛЕЙ

И. Ф. Огороднейчук, В. Д. Остроухов
Харьков

Аналитические методы расчета шахтной силовой сети как каналов высокочастотной связи весьма трудоемки. Это объясняется сильной разветвленностью силовой сети, многообразием комбинаций конечных нагрузок и изменением конфигурации сети в процессе эксплуатации. Данные расчета, произведенного для этой конфигурации и данных конечных нагрузок могут оказаться непригодными в других случаях. В связи с этим целесообразно поставить вопрос о моделировании шахтной силовой сети и создании моделирующего устройства, с помощью которого можно было бы производить расчеты для различных вариантов силовой сети.

В данной статье рассматривается моделирование силовых кабелей. Для построения модели кабеля необходимо определить его первичные параметры. Ввиду того, что аналитическое определение параметров кабелей весьма затруднительно, нами был выбран путь экспериментального определения первичных параметров измерением на реальных кабелях. На первом этапе определялись только параметры L и C , т. е. полагалось, что R и G равны нулю, что не вносит, как показывает опыт, больших погрешностей в широком диапазоне частот для сравнительно коротких кабелей (до 3 км).

Поверхностный эффект и эффект близости не учитывался.

Моделирование можно производить двумя путями: строить модель для каждой из схем включения в отдельности, например, для систем $\Phi - \Phi$, $\Phi - 3$, $3\Phi - 3$, $2\Phi - \Phi$ или создавать универсальную модель.

Универсальная модель представляет собой $2n$ — полюсник с числом n , равным числу жил кабеля.

Мы остановились на универсальной модели, по нашему мнению наиболее удобной и соответствующей конечным нагрузкам.

Очевидно, что для наиболее точного копирования характеристик кабеля, его модель необходимо представить в виде бесконечной цепочки элементов. Однако для практического выполнения такое дробление нецелесообразно, ввиду малости величин параметров элементов и значительной погрешности при их практическом выполнении.

Предварительные расчеты показывают, что для воспроизведения характеристики, например, кабеля ГРШСНЭ $3 \times 35 + 1 \times 10 + 3 \times 4$ длиной 100 м в диапазоне 0—1 мГц с точностью 20% необходимо представить модель в виде цепочки из 5 элементов. При этом параметры элементов (L и C) оказываются практически выполнимыми.

В соответствии с высказанными выше замечаниями измерения производились на отрезках кабелей длиной 20—25 м, в результате чего

определились частичные параметры, т. е. емкости между жилами и индуктивности каждой жилы.

Ниже приводятся примеры расчета частичных параметров (L и C) для некоторых типов кабелей.

Кабель ГРШС $3 \times 35 + 1 \times 10$ $l = 25$ м.

1. **Определение частичных емкостей.** Кабель ГРШС $3 \times 35 + 1 \times 10$ имеет конфигурацию сечения, представленную на рис. 1.

1, 2, 3 — силовые жилы, 4 — заземляющая. Из соображений симметрии следует при-

нять

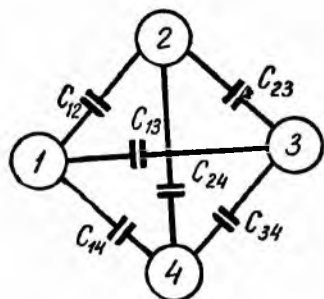


Рис. 1.

$$C_{12} = C_{23} = C_{13};$$

$$C_{14} = C_{34};$$

$$C_{13} = C_{15};$$

$$C_{24} = C_{24}.$$

Число неизвестных равно четырем. Поэтому необходимо иметь четыре уравнения, т. е. произвести четыре измерения.

Будем обозначать измеренную емкость штрихом.

1. Емкость между жилами 2—4

$$C'_{24} = C_{24} + 2 \frac{C_{12}C_{14}}{C_{12} + C_{14}},$$

или

$$C'_{24}C_{12} + C'_{24}C_{14} - C_{24}C_{12} - C_{24}C_{14} - 2C_{12}C_{14} = 0. \quad (1)$$

2. Емкость между 1—3

$$C'_{13} = C_{13} + \frac{C_{12}}{2} + \frac{C_{14}}{2}; \quad 2C'_{13} = 2C_{13} + C_{12} + C_{14}.$$

3. Емкость между 1—2.

Представим рис. 1 в виде рис. 2, т. е. преобразовав треугольник емкостей C_{13} , C_{14} , C_{34} в звезду C_1 , C_3 , C_4 , получим:

$$C'_{12} = C_{12} + \frac{C_1C_{20}}{C_1 + C_{20}}; \quad C_{20} = \frac{C_3C_{23}}{C_3 + C_{23}} + \frac{C_4C_{24}}{C_4 + C_{24}};$$

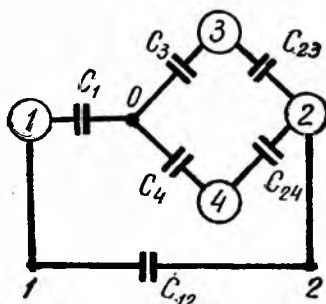


Рис. 2.

$$C_1 = C_{13} + C_{14} + \frac{C_{14}C_{13}}{C_{34}} = 2C_{13} + C_{14}(C_{12} - C_{12}) = 2C'_{13} - C_{12}.$$

$$C_3 = C_1 = 2C'_{13} - C_{12},$$

$$C_4 = C_{14} + C_{34} + \frac{C_{14}C_{34}}{C_{13}}.$$

Принимая $\frac{C_4}{C_4 + C_{24}} \approx 1$, получим $C_{20} \approx \frac{C_1C_{12}}{C_1 + C_{12}} + C_{24}$.

Следовательно,

$$C'_{12} = \frac{C_{12} + C_1 \left(\frac{C_1C_{12}}{C_1 + C_{12}} + C_{24} \right)}{C_1 + \frac{C_1C_{12}}{C_1 + C_{12}} + C_{24}} = C_{12} + \frac{C_1(C_1C_{12} + C_1C_{24} + C_{12}C_{24})}{C_1(C_1 + C_{12}) + C_1C_{12} + C_1C_{24} + C_{12}C_{24}}.$$

Пренебрегая в числителе величиной $C_{12}C_{24}$, а в знаменателе $C_1C_{24} + C_{12}C_{24}$, получим:

$$C'_{12} = C_{12} + \frac{C_1(C_1C_{12} + C_1C_{24})}{C_1(C_1 + C_{12} + C_{12})};$$

$$C'_{12} = C_{12} + \frac{(2C'_{13} - C_{12})(C_{12} + C_{24})}{2C'_{13} + C_{12}};$$

так как $C + C_{12} = 2C'_{13}$; $C_1 = 2C'_{13} - C_{12}$, то

$$C_{12} = \frac{2C'_{13}C'_{12} - (2C'_{13}C_{24} - C_{12}C_{24})}{4C'_{13} - C'_{12}}. \quad (3)$$

Обозначим

$$2C'_{13}C'_{12} = 0,$$

$$2C'_{13} = \bar{b},$$

$$4C'_{13} - C'_{12} = \bar{d},$$

$$C_{12} = \frac{\bar{a} - \bar{b}C_{24}}{\bar{d} - C_{24}}.$$

Разлагая C_{12} в ряд по C_{24} и ограничиваясь двумя первыми членами, получим:

$$C_{12} = \frac{\bar{a}}{\bar{d}} - \left(\frac{\bar{b}}{\bar{d}} - \frac{\bar{a}}{\bar{d}^2} \right) C_{24} = \frac{\bar{a}}{\bar{d}} + \frac{(\bar{a} - \bar{b}\bar{d})}{\bar{d}^2} C_{24}. \quad (3a)$$

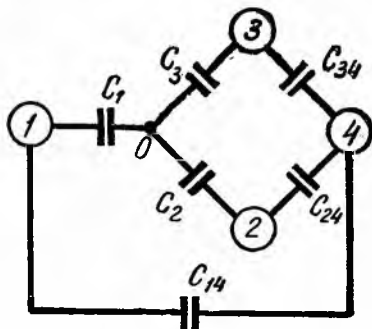


Рис. 3.

4. Емкость между жилами 1—4.

Представим рис. 1 в виде рис. 3, т. е. преобразовав треугольник емкостей C_{12} , C_{23} , C_{13} , в эквивалентную звезду емкостей C_1 , C_3 , C_2 , получим

$$C'_{14} = C_{14} + \frac{C'_1 + C_{40}}{C'_1 + C_{40}}.$$

Произведя ряд преобразований, аналогичных пункту 3, придем к выражению C'_{14} :

$$C'_{14} = C_{14} + \frac{(2C'_{13} - C_{14})(C_{14} + C_{24})}{2C'_{13} + C_{14} + C_{24}}; \quad (4)$$

откуда

$$2C'_{13}C'_{14} = (4C'_{13} - C'_{14})C_{14} + (2C'_{13} - C'_{14})C_{24}.$$

Обозначая

$$2C'_{13}C'_{14} = K; \quad 4C'_{13} - C'_{14} = \bar{m}; \quad 2C'_{13} - C'_{14} = \bar{\Pi},$$

получим

$$K = \bar{m}C_{14} + \bar{\Pi}C_{24},$$

откуда

$$C_{24} = \frac{K - \bar{m}C_{14}}{\bar{\Pi}}. \quad (4)$$

Записывая $C_{12} = \alpha - \beta C_{24}$, где $\alpha = \frac{\bar{a}}{\bar{d}}$; $\beta = \frac{\bar{b}\bar{d} - \bar{a}}{\bar{d}^2}$ и $C_{24} = \gamma - \delta C_{14}$, где

$$\gamma = \frac{K}{\bar{\Pi}}; \quad \frac{\bar{m}}{\bar{\Pi}} = \delta.$$

Подставив выражение C_{24} в выражение C_{12} , получим

$$C_{12} = \bar{p} + \bar{q}C_{14}, \text{ где } p = \alpha - \beta\gamma; \bar{q} = \beta\delta.$$

Выражая C_{12} и C_{24} через C_{14} в уравнение (1), найдем:

$$AC_{14}^2 + BC_{14} + D = 0.$$

Как показывают расчеты, физический смысл имеет корень

$$A = \delta(\bar{q} + 1) - 2\bar{q};$$

$$C_{14} = \frac{B + \sqrt{B^2 - 4AD}}{2A}, \text{ где } B = (C_{24}' - \gamma)(\bar{q} + 1) + (\delta - 2)p;$$

$$D = p(C_{24}' - \gamma).$$

При измерениях было получено

$$C_{12}' = 4700 \pi \Phi,$$

$$C_{14}' = 4200 \pi \Phi,$$

$$C_{13}' = 3800 \pi \Phi,$$

$$C_{24}' = 3200 \pi \Phi.$$

Сводя расчеты в таблицу и производя вычисления, найдем:

$$C_{14} = \frac{7,87 + \sqrt{77}}{7,64} = 2170 \pi \Phi,$$

$$C_{12} = 2800 \pi \Phi,$$

$$C_{13} = 1700 \pi \Phi,$$

$$C_{14} = 1000 \pi \Phi.$$

Как видим, такой путь определения частичных емкостей связан с большим объемом вычислений. Он может быть упрощен, если считать частичные емкости распределенными симметрично. при этом можно принять

$$C_{12}' = \frac{C_{12}' + C_{14}'}{2}; \quad C_{13}' = \frac{C_{13}' + C_{24}'}{2}. *$$

Сделав такое допущение, будем иметь:

$$C_{12}' = C_{12} + 2 \frac{C_{14}C_{24}}{C_{14} + C_{24}} = C_{12} + \frac{2C_{12}C_{13}}{C_{12} + C_{13}}; \quad (5)$$

$$C_{13}' = C_{13} + C_{12}; \quad (6)$$

$$C_{12}^2 + 3C_{12}C_{13} - C_{13}'C_{12} - C_{12}'C_{13} = 0.$$

Из (Б)

$$C_{13} = C_{13}' - C_{12}. \quad (6a)$$

Подставив (6a) в (5a), получим уравнение

$$2C_{12}^2 - 3C_{13}'C_{12} + C_{12}'C_{13} = 0,$$

откуда

$$C_{12} = \frac{3}{4} C_{13}' + \sqrt{\frac{9}{16} (C_{13}')^2 - \frac{C_{12}'C_{13}}{2}}. \quad (7)$$

Подставляя в (7) значения C_{12}' и C_{13}' , найденные из выражений *, для кабеля ГРШС $3 \times 35 + 1 \times 10$, получим

$$C_{12} = 2700 \pi \Phi,$$

$$C_{13} = 1000 \pi \Phi.$$

Результирующие значения емкостей C'_{12} и C'_{13} системы, собранной по схеме рис. 1 из емкостей $C_{12} = 2700 \pi \Phi$ и $C_{13} = 1000 \pi \Phi$, отличается от действительных не более, чем на 10%.

2. **Определения частичных индуктивностей.** Представим каждую жилу на модели катушкой индуктивности (рис. 4).

Измеряя индуктивность пары жил и сопоставляя ее с индуктивностью соответствующего соединения на модели, ввиду симметрии будем иметь:

$$L_{14} = L_1 + L_4 = L_{34} = L_3 + L_4; \quad (1')$$

$$L_{12} = L_1 + L_2 = L_3 + L_2; \quad (2')$$

$$L_{13} = L_1 + L_3; \quad (3')$$

$$L_{24} = L_2 + L_4. \quad (4')$$

Из (1') $L_1 = L_3$.

Из (3') $L_{13} = 2L_1 = 2L_3$, откуда $L_1 = \frac{L_{13}}{2}$.

Найдя $L_1 = L_3 = \frac{L_{13}}{2}$, можно определить и остальные частичные индуктивности.

Из (2') $L_2 = L_{12} - L_1$;

Из (1') $L_4 = L_{14} - L_1$.

Для кабеля ГРШС $3 \times 35 + 1 \times 10 \text{ л} = 25 \text{ м}$ было получено:

$$L_{12} = 18 \text{ мкГн}; \quad L_{13} = 20 \text{ мкГн},$$

$$L_{14} = 19 \text{ мкГн}; \quad L_1 = L_3 = 10 \text{ мкГн},$$

$$L_2 = L_{12} - L_1 = 18 - 10 = 8 \text{ мкГн},$$

$$L_4 = L_{14} - L_1 = 19 - 10 = 9 \text{ мкГн}.$$

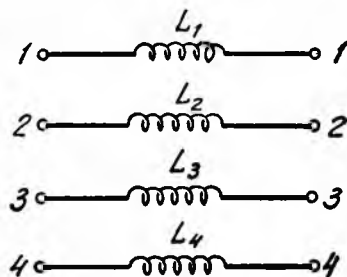


Рис. 4.

3. **Построение звена модели.** Определив первичные частичные параметры, построим звено модели, эквивалентное 25 м кабеля ГРШС $3 \times 35 + 1 \times 10$.

Как известно, для воспроизведения волнового сопротивления линий с распределенными параметрами наиболее благоприятны искусственные линии, составленные из звеньев, собранных по скрещенной мостиковой схеме (рис. 5) из элементов a и b .

Для четырехполюсника мостикового типа можно записать следующие:

$$\text{ch} \bar{g} = \frac{\bar{a} + \bar{b}}{\bar{b} - \bar{a}}; \quad \text{sh} \bar{g} = \frac{2\sqrt{\bar{a}\bar{b}}}{\bar{b} - \bar{a}}; \quad \text{th} \bar{g} = \frac{2\sqrt{\bar{a}\bar{b}}}{\bar{a} + \bar{b}}, \quad (8)$$

$$Z = \sqrt{\bar{a}\bar{b}} = \sqrt{\frac{R + j\omega L}{G + j\omega C}}.$$

Рассмотрим соотношение

$$\text{th} \bar{g} = \frac{2\sqrt{\bar{a}\bar{b}}}{\bar{a} + \bar{b}}, \quad \text{или} \quad \frac{e^{\bar{g}} + e^{-\bar{g}}}{e^{\bar{g}} - e^{-\bar{g}}} = \frac{\bar{a} + \bar{b}}{2\sqrt{\bar{a}\bar{b}}}.$$

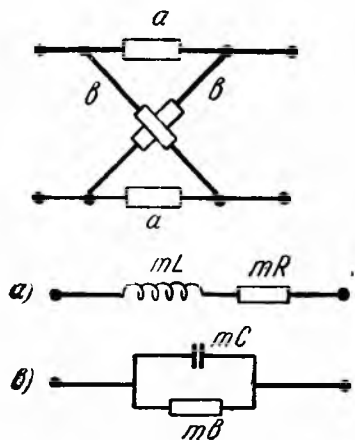


Рис. 5.

Отсюда

$$e^g = \frac{\sqrt{\bar{a}} + \sqrt{\bar{b}}}{\sqrt{\bar{b}} - \sqrt{\bar{a}}} = \frac{1 + \bar{m}\gamma}{1 - \bar{m}\gamma}. \quad (9)$$

Для линии с равномерно распределенными постоянными:

$$e^{gl} = \frac{e^{\frac{\gamma l}{2}}}{e^{-\frac{\gamma l}{2}}} = \frac{1 + \frac{\gamma l}{2} + \frac{\gamma^2 l^2}{2^2 2!}}{1 - \frac{\gamma l}{2} + \frac{\gamma^2 l^2}{2^2 2!}}.$$

Ограничиваясь членом $\frac{\gamma l}{2}$, получим

$$e^{gl} = \frac{1 + \frac{\gamma l}{2}}{1 - \frac{\gamma l}{2}}. \quad (10)$$

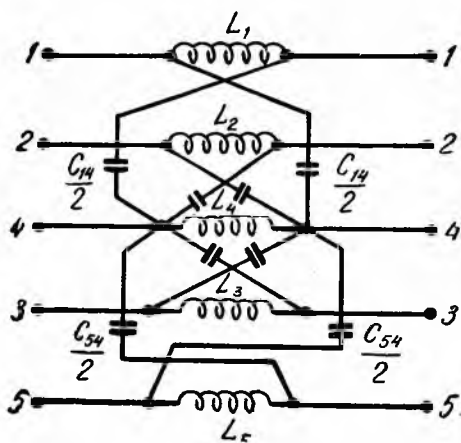


Рис. 6.

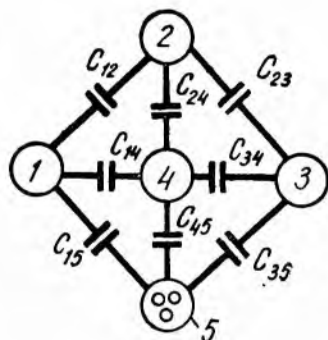


Рис. 7.

Сравнивая (9) и (10), найдем:

$$\bar{m} = \frac{l}{2}; \text{ при } l = 1; \bar{m} = \frac{1}{2}.$$

Поскольку индуктивность пары жил уже представлена нами в виде двух несвязанных катушек индуктивностей (как показывает опыт, примерно равных друг другу), то остается частичные емкости включить по скрещенной мостиковой схеме между соответствующими катушками индуктивностей (рис. 6).

Такое построение звена модели не является строго обоснованным.

Однако можно показать, что волновые характеристики звена модели, определяемые как параметры четырехполюсника будут равны волновым параметрам кабеля в соответствующих схемах включения.

4. Определение частичных параметров кабеля ГРШСНЭ $3 \times 35 + 1 \times 10 + 3 \times 4$ $l = 20$ м.

Конфигурация сечения этого кабеля представлена на рис. 7, 1, 2, 3 — силовые жилы,

4 — заземляющая жила,

5 — жилы дистанционного управления.

Будем считать, что частичные емкости распределены симметрично.

$$C_{12} = C_{23} = C_{35} = C_{15} = C_{12},$$

$$C_{14} = C_{24} = C_{34} = C_{54} = C_{14},$$

$$C'_{12} = \frac{C'_{12} + C'_{23} + C'_{35} + C'_{15}}{4}.$$

$$C'_{13} = \frac{C_{14}}{2} + C_{12}; \quad C'_{13} = \frac{C'_{13} + C_{25}}{2}. \quad (11)$$

$$2C'_{13} = 2C_{12} + C_{14}.$$

Для определения C'_{12} преобразуем треугольники емкостей C_2 , C_{14} , C_{24} и C_{45} , C_{35} , C_{34} в эквивалентные звезды (рис. 8):

$$C_1 = C_2 = C_3 = C_5 = C_{14} + C_{12} + \frac{C_{14}C_{12}}{C_{14}}$$

$$= 2C_{12} + C_{14} = 2C'_{13};$$

$$C'_{12} = \frac{C_1}{2} + C'_{12}; \quad \frac{1}{C'_{12}} =$$

$$= \frac{1}{C_{12}} + \frac{1}{C_1} + \frac{1}{C_1} + \frac{1}{C_{12}} = \frac{2(C_{12} + C_1)}{C_{12}C_1} =$$

$$= \frac{2C'_{13} + C_{12}}{C'_{13}C_{12}};$$

$$C'_{12} = \frac{C'_{13}C_{12}}{2C'_{13} + C_{12}}; \quad C'_{12} = C'_{13} + \frac{C'_{13}C_{12}}{2C'_{13} + C_{12}}.$$

Отсюда

$$C_{12} = \frac{2C'_{13}(C'_{12} - C'_{13})}{2C'_{13} - C'_{12}}; \quad (12)$$

$$C_{14} = 2C'_{13} - 2C_{12}. \quad (13)$$

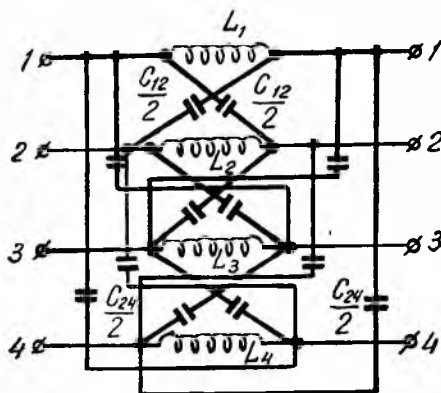


Рис. 9.

В результате проведенных измерений получено

$$L_1 = L_3 = 8 \text{ мкГн};$$

$$L_2 = 7 \text{ мкГн};$$

$$L_4 = 7 \text{ мкГн};$$

$$L_5 = 11 \text{ мкГн}.$$

По данным измерений было получено $C'_{13} = 3300\pi\Phi$.

$C'_{12} = 3300\pi\Phi$. Подставляя эти величины в формулы (12) и (13), получим

$$C_{12} = 0, \quad C_{14} = 6800\pi\Phi.$$

Определение частичных индуктивностей ввиду симметрии следует считать

$$L_{13} = L_1 + L_3; \quad L_1 = L_3 = \frac{L_{13}}{2};$$

$$L_2 = L_{12} - L_1; \quad L_4 = L_{14} - L_1,$$

$$L_5 = L_5 - L_1.$$

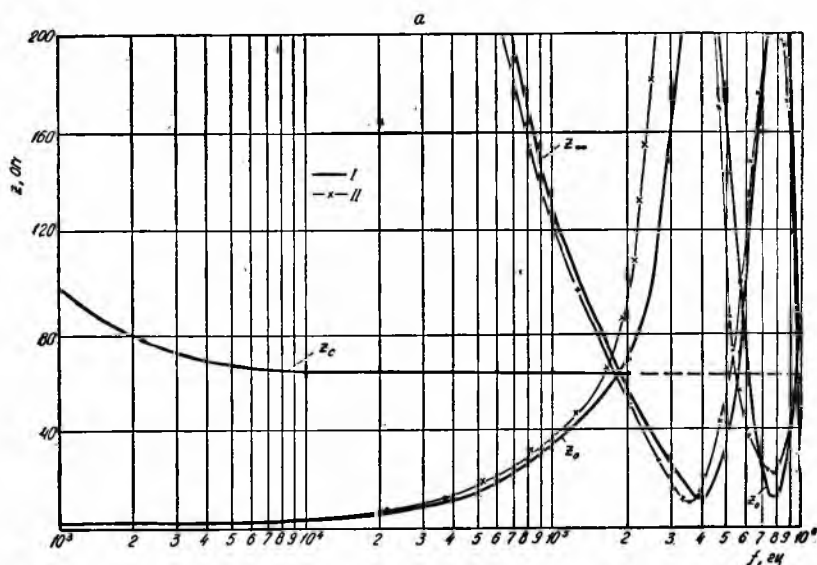


Рис. 10, а.

По найденным частичным параметрам построим звено модели таким же способом, который рассмотрен в разделе 1.

Звено модели кабеля ГРШСНЭ $3 \times 35 + 1 \times 10 + 3 \times 4$, воспроизводящее отрезок кабеля длиной 20 м, представлено на рис. 9.

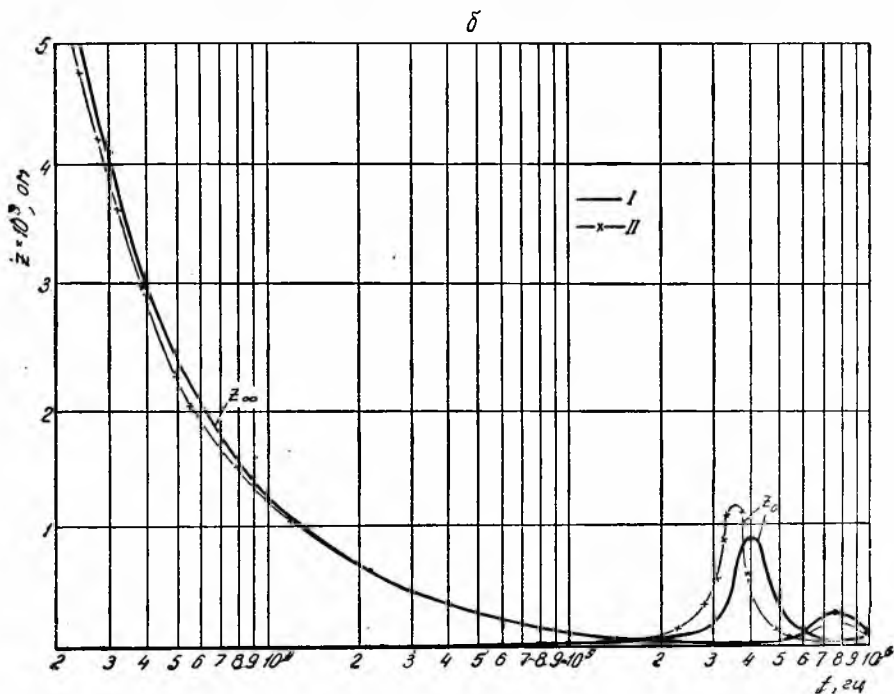


Рис. 10. б.

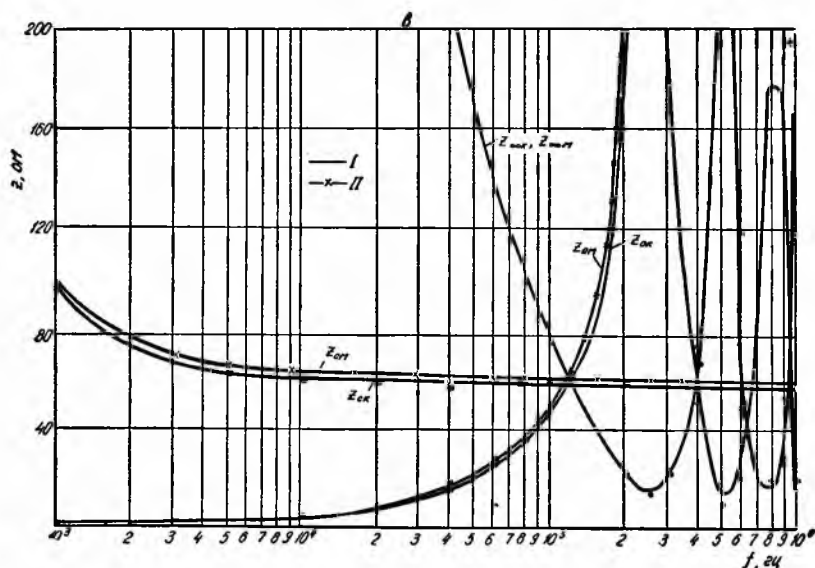


Рис. 10, в.

Из сравнения характеристик кабелей (I) ГРШС и ГРШСНЭ и их моделей (II) (рис. 10, а, б, в, г) видно, что входные сопротивления Z_∞ и Z_0 и волновые сопротивления совпадают с точностью до 10—15% в диапазоне 1 кГц — 20 кГц.

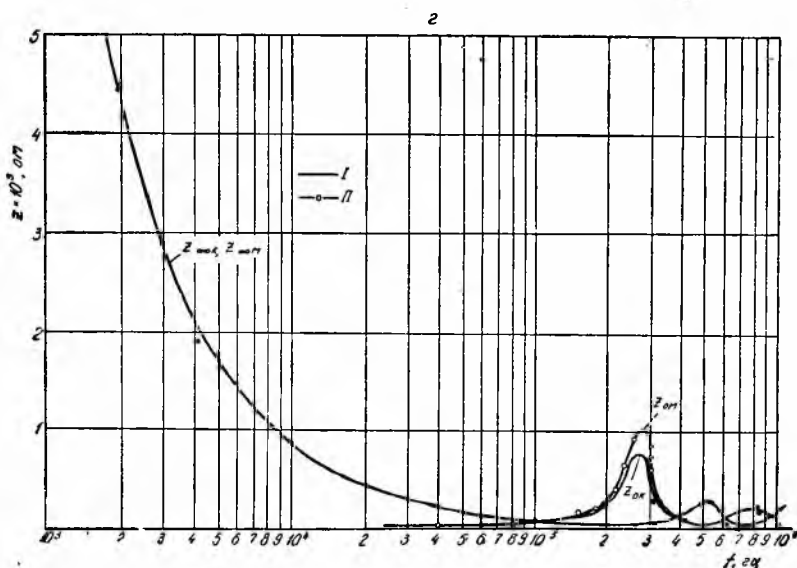


Рис. 10, г.