

Федеральное государственное автономное образовательное учреждение высшего образования «Национальный исследовательский Нижегородский государственный университет им. Н.И. Лобачевского»

Отчёт по лабораторной работе № 210  
«Исследование линейных двухполюсников и  
четырёхполюсников»

Выполнили:

Студенты 2 курса, ВШОПФ

Зинягин Алексей

Мурзина Полина

2022 г.

Дата допуска: 21.09.22 г.

Дата лабораторной работы: 28.09.22 г.

Дата отчета: 03.11.22 г.

**Цель работы:** исследовать свойства электрических двухполюсников и четырехполюсников, составленных из линейных элементов, ознакомиться с понятиями импеданса, коэффициента передачи, вычислить соответствующие импедансы двухполюсников и коэффициенты передачи четырехполюсников.

**Оборудование:** установка для исследования четырехполюсников и двухполюсников, осциллограф, звуковой генератор.

### Теоретические обоснования.

Двухполюсник – электрическая цепь, состоящая из произвольного числа элементов и имеющая два наружных контакта (зажима), с помощью которых она подключается к другим цепям. Четырехполюсники же имеют четыре наружных зажима. Обычно два зажима называют входными (к ним подключается источник энергии), а два других – выходными (с них снимается выходное напряжение). При анализе двухполюсников и четырехполюсников предполагается, что энергия к ним подводится от идеального генератора напряжения (генератора, внутреннее сопротивление которого равно нулю), а регистрирующие приборы имеют входное сопротивление  $R_{вх} \rightarrow \infty$ .

Мы ограничимся изучением линейных четырехполюсников, поведение которых описывается линейными дифференциальными уравнениями, т.е. они составлены из линейных элементов, имеющих линейную вольтамперную или аналогичные ей характеристики (резисторы, конденсаторы, катушки индуктивности).

В данной работе мы рассмотрели двухполюсники, приведенные на рис.1.

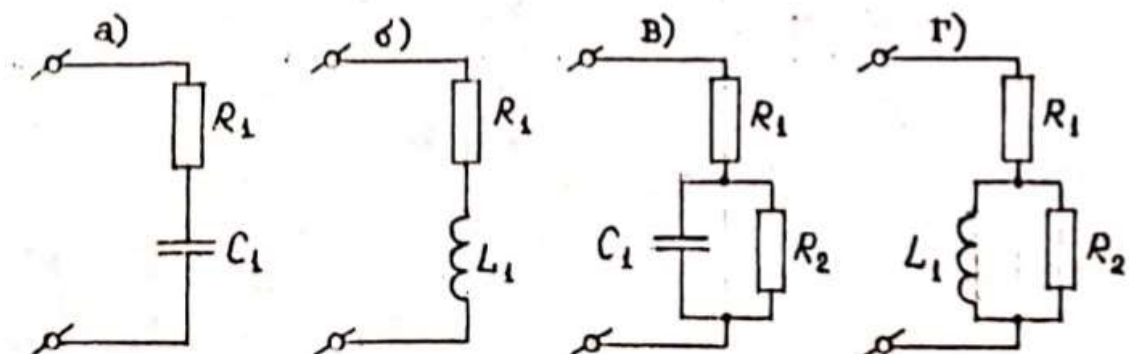


Рис.1

При подключении линейных двухполюсников к гармонической ЭДС в них возникают гармонические напряжения и токи той же частоты, что и частота подключаемой ЭДС. Запишем их в виде:

$$u = Ue^{i(\omega t - \varphi_u)}, i = Ie^{i(\omega t - \varphi_i)},$$

Им соответствуют комплексные амплитуды:

$$\dot{U} = Ue^{-i\varphi_u}, \dot{I} = Ie^{-i\varphi_i}$$

Комплексный импеданс - отношение комплексных амплитуд, имеющее размерность сопротивления, основная характеристика двухполюсников:

$$\frac{\dot{U}}{\dot{I}} = \dot{z} = \frac{U}{I} e^{i(\varphi_i - \varphi_u)} = ze^{i\varphi}$$

Коэффициент передачи – важнейшая характеристика четырехполюсника, равная отношению комплексной амплитуды напряжения на выходе к комплексной амплитуде напряжения на входе:

$$\dot{K} = \frac{\dot{U}_{\text{ВЫХ}}}{\dot{U}_{\text{ВХ}}} = Ke^{i\varphi}$$

Коэффициент передачи четырехполюсника зависит только от частоты. Модуль коэффициента передачи  $K(\omega)$  – амплитудная характеристика четырехполюсника, а его аргумент  $\varphi(\omega)$  – фазовая характеристика.

Четырехполюсники применяются в различных случаях, например, дифференцирование и интегрирование сигналов, изменение величины и полярности импульсов, линии задержки, линейные формирующие цепи и т.д.

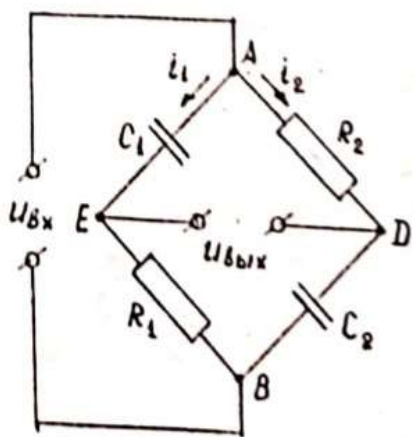


Рис. 2

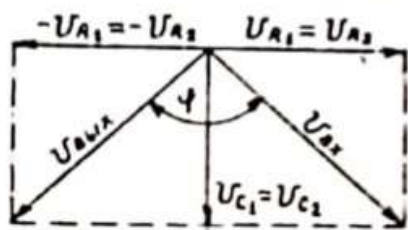


Рис. 3

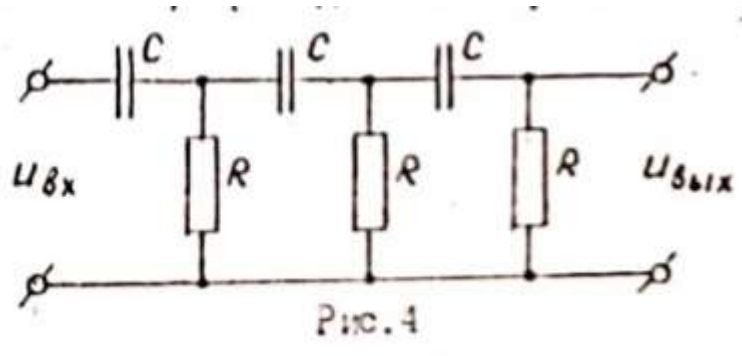
На рис. 2. Представлена схема мостового четырехполюсника, которым можно пользоваться в качестве фазовращателя. В этой схеме  $R_1 = R_2 = R, C_1 = C_2 = C$ . Тогда токи  $i_1, i_2$  в ветвях схемы будут иметь одинаковую амплитуду и совпадать по фазе.  $U_{\text{ВХ}}$  подводится к одной диагонали моста (AB), а выходное – снимается с диагонали (DE).

На рис.3. представлена векторная диаграмма этой схемы.  $U_{\text{ВХ}}$  можно представить как сумму двух взаимно перпендикулярных векторов, изображающих напряжения на  $C_1, R_1$  или  $C_2, R_2$ , а выходное напряжение (между точками Д и Е) – в виде разности напряжения на  $R_1$  и  $C_2$ . Из диаграммы следует, что напряжение на выходе по амплитуде равно напряжению на входе, а по фазе сдвинуто на угол  $\varphi$ , и

$$\operatorname{tg} \frac{\varphi}{2} = \frac{V_R}{V_C} = \frac{IR}{I * 1/\omega C} = \omega RC$$

Это соотношение показывает, что сдвиг фаз между входным и выходным напряжениями может изменяться от нуля до  $180^\circ$ . Но получить сдвиг фаз в точности равный  $180^\circ$  в такой схеме

не удастся, так как  $\omega RC$  всегда конечно. Для получения этого сдвига и больше можно использовать четырёхполюсники, приведенные на рис.4.



Его амплитудная и фазовая характеристика будут соответственно:

$$K(\omega) = \frac{\Omega^3}{\sqrt{(1 - 6\Omega)^2 + \Omega^2(5 - \Omega^2)^2}};$$

$$\varphi(\omega) = \frac{3\pi}{2} - \operatorname{arctg} \frac{\Omega(5 - \Omega^2)}{1 - 6\Omega^2},$$

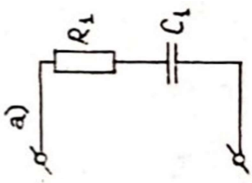
где  $\Omega = \omega RC$  - безразмерная циклическая частота. Тогда частота, при которой входное и выходное напряжение будут противофазны, равна

$$\omega = \frac{1}{RC\sqrt{6}}$$

Модуль коэффициента передачи при этом равен  $1/29$ , т.е. амплитуда напряжения на выходе в 29 раз меньше амплитуды входного напряжения. Изменяя  $R$ ,  $C$  можно в широких пределах менять частоту, для которой входное и выходное напряжение будут противофазны. Эти частоты могут быть от долей герца до десятков мегагерц, при этом четырехполюсники будут в любом случае иметь достаточно малые габариты. Вместо конденсаторов можно использовать индуктивности, но габариты тогда резко возрастут, особенно в области низких частот.

## Экспериментальная часть.

1. Для двухполюсников на рис.1 измерили  $z$  и аргумент  $\varphi$  при нескольких значениях частоты в диапазоне звукового генератора. Также рассчитали зависимость модуля импеданса  $z$  и аргумента  $\varphi$  от частоты. Занесли результаты в табл.1-4. Построили соответствующие графики, для удобства откладывали частоту в логарифмическом масштабе (рис.5-6, 7-8, 9-10, 11-12).



а)  $z = \frac{1}{i\omega} + R$ , где  $\frac{1}{i\omega C}$  – импеданс конденсатора,  $R$  – импеданс сопротивления.

$$|z| = \frac{\sqrt{1+(\omega RC)^2}}{\omega C}, \quad \varphi = \arctg \frac{|Imz|}{|Rez|} = \arctg \frac{1}{\omega RC}, \quad R = 13 \text{ кОм}, \quad C = 0,05 \text{ мкФ}.$$

| $\nu$ ,<br>Гц | $\omega$ ,<br>рад/с | $U_{\text{вх}}, \text{В}$ | $U_{\text{вых}}, \text{В}$ | $20\lg$ | $20\lg$ | $\varphi_{\text{т}}, \text{рад}$ | $\varphi_{\text{з}}, \text{рад}$ | $ z _{\text{т}},$<br>кОм | $ z _{\text{з}},$<br>кОм |
|---------------|---------------------|---------------------------|----------------------------|---------|---------|----------------------------------|----------------------------------|--------------------------|--------------------------|
| 50            | 314                 | 23,6                      | 6,4                        | 23,6    | 23      | 1,37                             | 1,34                             | 65                       | 47,94                    |
| 60            | 376,8               | 23,6                      | 7,56                       | 23,6    | 21,8    | 1,33                             | 1,18                             | 54,65                    | 40,58                    |
| 70            | 439,6               | 23,6                      | 8,64                       | 23,6    | 21,2    | 1,29                             | 1,12                             | 47,32                    | 35,51                    |
| 90            | 565,2               | 23,2                      | 10,6                       | 23,2    | 20      | 1,22                             | 1,04                             | 37,7                     | 28,45                    |
| 100           | 628                 | 23,4                      | 11,3                       | 23,4    | 19,2    | 1,18                             | 0,96                             | 34,4                     | 26,92                    |
| 110           | 690,8               | 23,2                      | 12                         | 23,2    | 19,2    | 1,15                             | 0,97                             | 31,74                    | 25,13                    |
| 120           | 753,6               | 23,2                      | 12,7                       | 23,2    | 18,4    | 1,12                             | 0,92                             | 29,55                    | 23,75                    |
| 130           | 816,4               | 23,2                      | 13,4                       | 23,2    | 18      | 1,08                             | 0,89                             | 27,73                    | 22,51                    |
| 140           | 879,2               | 23,2                      | 14                         | 23,2    | 17,4    | 1,05                             | 0,85                             | 26,2                     | 21,54                    |
| 150           | 942                 | 23,2                      | 14,4                       | 23,2    | 17,2    | 1,02                             | 0,84                             | 24,9                     | 20,94                    |
| 160           | 1004,8              | 23,2                      | 14,9                       | 23,2    | 16,6    | 0,99                             | 0,80                             | 23,77                    | 20,24                    |
| 170           | 1067,6              | 23,2                      | 15,4                       | 23,2    | 16,2    | 0,96                             | 0,77                             | 22,8                     | 19,58                    |
| 180           | 1130,4              | 23,2                      | 15,8                       | 23,2    | 15,8    | 0,94                             | 0,75                             | 21,96                    | 19,09                    |
| 190           | 1193,2              | 23,2                      | 16,2                       | 23,2    | 15,4    | 0,91                             | 0,73                             | 21,21                    | 18,62                    |
| 200           | 1256                | 23                        | 16,5                       | 23      | 14,8    | 0,89                             | 0,70                             | 20,56                    | 18,12                    |
| 300           | 1884                | 23                        | 18,8                       | 23      | 11,6    | 0,68                             | 0,53                             | 16,78                    | 15,9                     |
| 400           | 2512                | 22,6                      | 20,2                       | 22,6    | 9,2     | 0,55                             | 0,42                             | 15,24                    | 14,54                    |
| 500           | 3140                | 22,2                      | 21                         | 22,2    | 7,8     | 0,46                             | 0,36                             | 14,48                    | 13,74                    |
| 600           | 3768                | 22,2                      | 21,4                       | 22,2    | 6,2     | 0,39                             | 0,28                             | 14,04                    | 13,49                    |

|      |      |      |      |      |     |      |      |       |       |
|------|------|------|------|------|-----|------|------|-------|-------|
| 700  | 4396 | 22,2 | 21,6 | 22,2 | 5,2 | 0,34 | 0,24 | 13,77 | 13,36 |
| 800  | 5024 | 22,2 | 21,6 | 22,2 | 4,8 | 0,30 | 0,22 | 13,6  | 13,36 |
| 900  | 5652 | 22,4 | 21,8 | 22,4 | 4,2 | 0,27 | 0,19 | 13,47 | 13,36 |
| 1000 | 6280 | 22,8 | 22,4 | 22,8 | 4,2 | 0,24 | 0,19 | 13,38 | 13,23 |

Табл.1

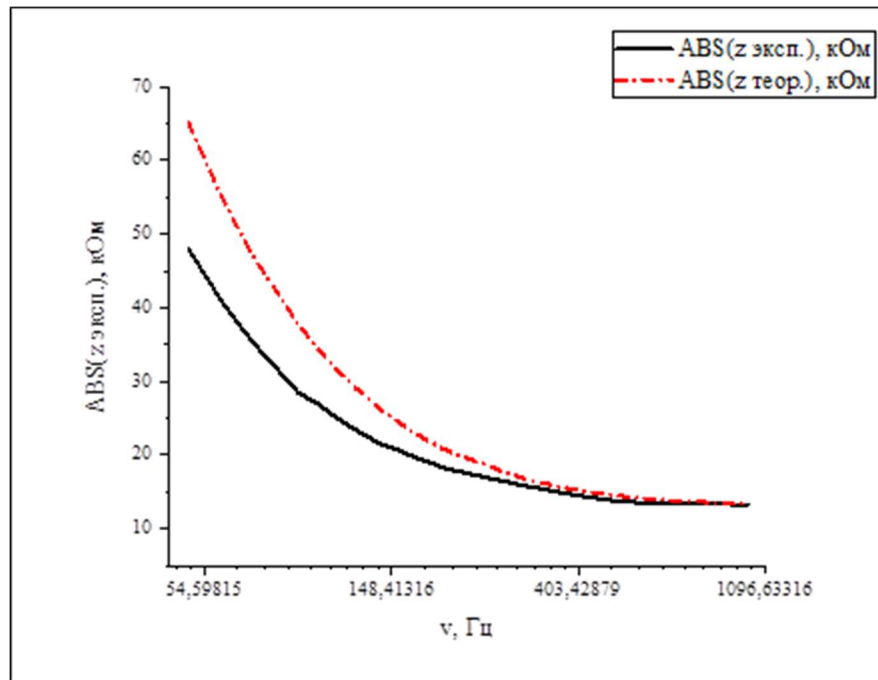


Рис.5. Зависимость модуля импеданса от логарифма частоты для двухполюсника с Рис.1а

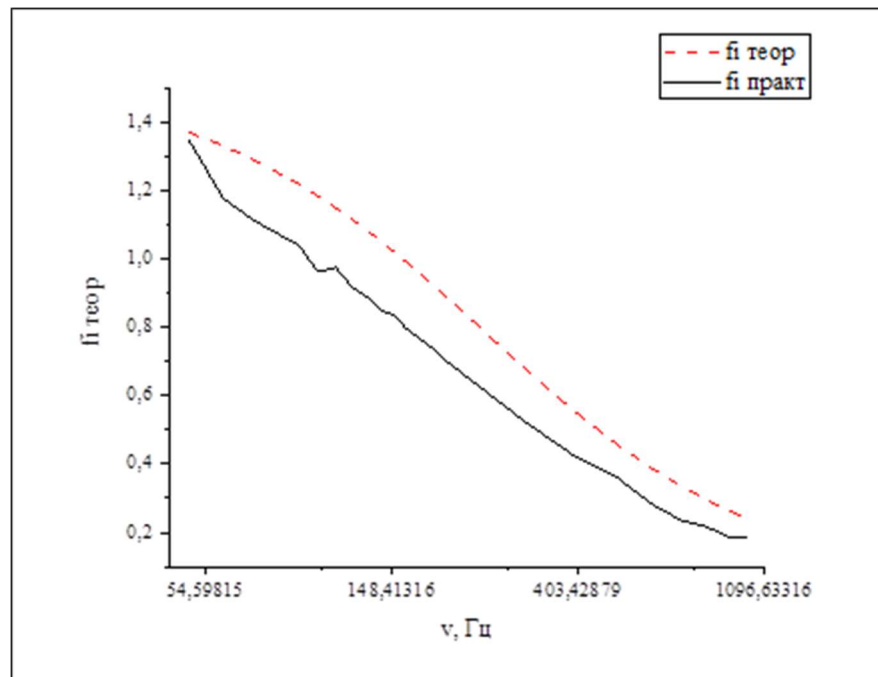
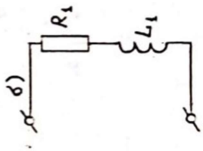


Рис.6. Экспериментально и теоретически полученные зависимости аргумента импеданса двухполюсника, изображенного на Рис.1а



б)  $z = i\omega L + R$ ,  $|z| = \sqrt{(\omega L)^2 + R^2}$ ,  $z = \frac{U_{\text{BX}}}{U_{\text{ВЫХ}}} R$ ,  $\varphi = \arctg \frac{\omega L}{R}$ ,  $R = 13 \text{ кОм}$ ,  $L = 0,28 \text{ Гн}$ .

| $\nu$ , Гц | $\omega$ , рад/с | $U_{\text{BX}}$ , В | $U_{\text{ВЫХ}}$ , В | 2of  | 2og  | $\varphi_{\text{Т}}$ , рад | $\varphi_{\text{Э}}$ , рад | $ z _{\text{Т}}$ , кОм | $ z _{\text{Э}}$ , кОм |
|------------|------------------|---------------------|----------------------|------|------|----------------------------|----------------------------|------------------------|------------------------|
| 1000       | 6280             | 22,8                | 22,2                 | 22,8 | 3    | 0,134                      | 0,132                      | 13,12                  | 13,35                  |
| 1100       | 6908             | 22,8                | 22,2                 | 22,8 | 3,8  | 0,148                      | 0,167                      | 13,14                  | 13,35                  |
| 1300       | 8164             | 22,8                | 22,2                 | 22,8 | 4    | 0,174                      | 0,176                      | 13,2                   | 13,35                  |
| 1700       | 10676            | 22,8                | 21,8                 | 22,8 | 5,8  | 0,226                      | 0,257                      | 13,34                  | 13,6                   |
| 2000       | 12560            | 22,8                | 21,6                 | 22,8 | 6,6  | 0,264                      | 0,294                      | 13,47                  | 13,72                  |
| 2200       | 13816            | 22,8                | 21,2                 | 23,2 | 7    | 0,289                      | 0,307                      | 13,56                  | 13,98                  |
| 2500       | 15700            | 23,2                | 20,8                 | 23   | 8    | 0,326                      | 0,355                      | 13,72                  | 14,5                   |
| 2700       | 16956            | 23                  | 20,6                 | 23,2 | 9    | 0,350                      | 0,398                      | 13,84                  | 14,51                  |
| 3000       | 18840            | 23,2                | 20,6                 | 23,2 | 9    | 0,385                      | 0,398                      | 14,03                  | 14,64                  |
| 3200       | 20096            | 23,2                | 20,4                 | 23,2 | 9,6  | 0,408                      | 0,427                      | 14,17                  | 14,78                  |
| 3500       | 21980            | 23,2                | 19,8                 | 23,2 | 10,6 | 0,442                      | 0,475                      | 14,38                  | 15,23                  |
| 3700       | 23236            | 23,2                | 19,8                 | 23,2 | 11,4 | 0,464                      | 0,514                      | 14,54                  | 15,23                  |
| 4000       | 25120            | 23,2                | 19,2                 | 23,2 | 12   | 0,496                      | 0,544                      | 14,78                  | 15,71                  |
| 4200       | 26376            | 23,2                | 19                   | 23,2 | 12,4 | 0,517                      | 0,564                      | 14,95                  | 15,87                  |
| 4500       | 28260            | 23,2                | 18,8                 | 23,4 | 13   | 0,547                      | 0,589                      | 15,22                  | 16,04                  |
| 4700       | 29516            | 23,4                | 18,6                 | 23,6 | 13,6 | 0,566                      | 0,614                      | 15,4                   | 16,35                  |
| 5000       | 31400            | 23,6                | 18,2                 | 23,6 | 14   | 0,595                      | 0,635                      | 15,69                  | 16,86                  |
| 5200       | 32656            | 23,6                | 18                   | 23,6 | 14,4 | 0,613                      | 0,656                      | 15,89                  | 17,04                  |
| 5500       | 34540            | 23,6                | 17,6                 | 23,6 | 14,6 | 0,64                       | 0,667                      | 16,2                   | 17,43                  |
| 5700       | 35796            | 23,6                | 17                   | 23,6 | 15   | 0,657                      | 0,689                      | 16,42                  | 18,05                  |
| 6000       | 37680            | 23,6                | 16,5                 | 23,6 | 15,8 | 0,682                      | 0,734                      | 16,74                  | 18,59                  |
| 7000       | 43960            | 23,6                | 15,5                 | 24   | 17,2 | 0,758                      | 0,799                      | 17,9                   | 19,79                  |
| 8000       | 50240            | 24                  | 14,4                 | 24   | 18,4 | 0,825                      | 0,874                      | 19,15                  | 21,67                  |
| 9000       | 56520            | 24                  | 13,5                 | 24   | 19,4 | 0,883                      | 0,941                      | 20,48                  | 23,11                  |
| 10000      | 62800            | 24                  | 12,5                 | 24   | 20   | 0,934                      | 0,985                      | 21,87                  | 24,96                  |

|       |        |    |      |    |      |       |       |       |       |
|-------|--------|----|------|----|------|-------|-------|-------|-------|
| 11000 | 69080  | 24 | 11,6 | 24 | 20,4 | 0,979 | 1,016 | 23,31 | 26,9  |
| 15000 | 94200  | 24 | 8,72 | 24 | 22,6 | 1,11  | 1,23  | 29,41 | 35,78 |
| 20000 | 125600 | 24 | 5,84 | 24 | 23,2 | 1,22  | 1,31  | 37,49 | 53,42 |
| 25000 | 157000 | 24 | 3,54 | 24 | 24   | 1,28  | 1,57  | 45,84 | 88,14 |

Табл.2

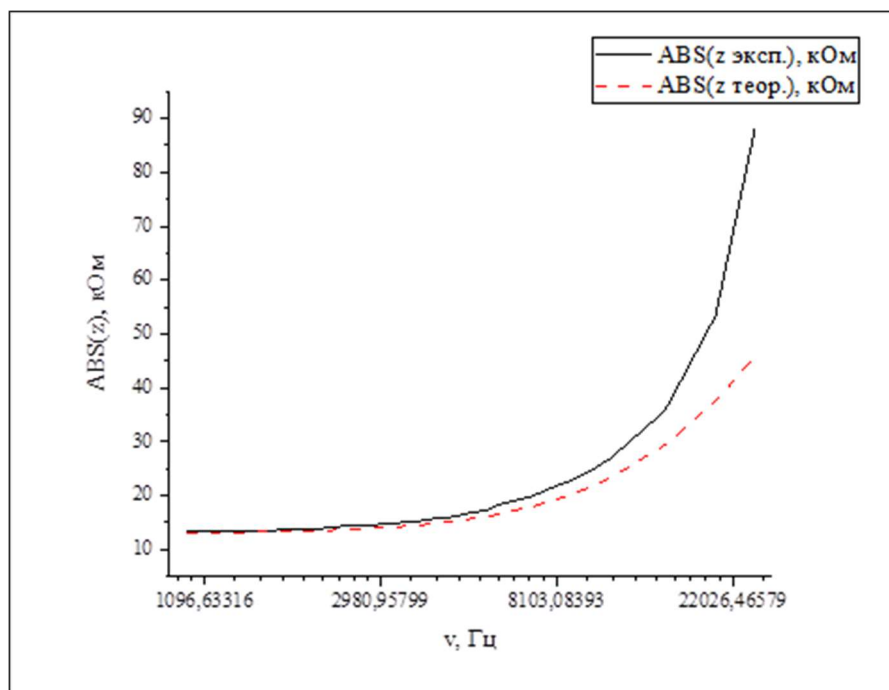


Рис.7. Зависимость модуля импеданса от логарифма частоты для двухполюсника с Рис.16

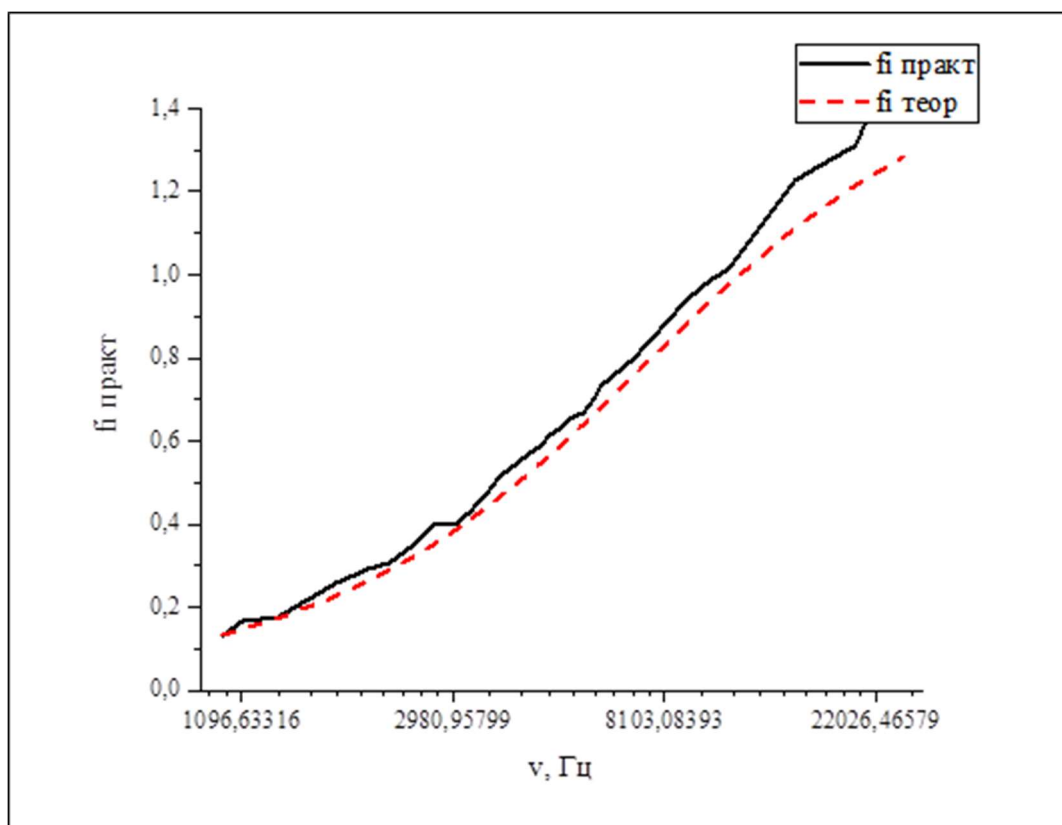
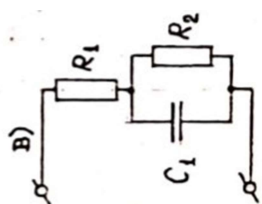




Рис.8. Экспериментально и теоретически полученные зависимости аргумента импеданса двухполюсника, изображенного на Рис.1б



$$\text{в) } \dot{z}_1 = \frac{R}{1+i\omega C}, \quad \dot{z} = \dot{z}_1 + R = \frac{R}{1+i\omega RC} + R = \frac{R(1-i\omega RC)}{1+(\omega RC)^2} + R,$$

$$|z| = R \sqrt{\left(1 + \frac{1}{1+(\omega RC)^2}\right)^2 + \left(\frac{\omega C}{1+(\omega RC)^2}\right)^2}; \quad \varphi = \arctg \frac{\omega RC}{2+(\omega RC)^2}; \quad R = 13 \text{ кОм}, \quad C = 0,05 \text{ мкФ}.$$

| $\nu$ , Гц | $\omega$ ,<br>рад/с | $U_{\text{вх}}$ , В | $U_{\text{вых}}$ , В | 2of  | 2og  | $\varphi_{\text{т}}$ , рад | $\varphi_{\text{э}}$ , рад | $ z _{\text{т}}$ ,<br>кОм | $ z _{\text{э}}$ ,<br>кОм |
|------------|---------------------|---------------------|----------------------|------|------|----------------------------|----------------------------|---------------------------|---------------------------|
| 50         | 314                 | 22,8                | 12,2                 | 22,8 | 4,6  | 0,099                      | 0,203                      | 25,48                     | 24,3                      |
| 60         | 376,8               | 22,4                | 12,4                 | 22,4 | 5    | 0,118                      | 0,225                      | 25,26                     | 23,48                     |
| 70         | 439,6               | 22,4                | 12,7                 | 22,4 | 4,8  | 0,136                      | 0,216                      | 25,02                     | 22,93                     |
| 100        | 628                 | 22,8                | 13,1                 | 22,8 | 4,6  | 0,186                      | 0,203                      | 24,14                     | 22,63                     |
| 110        | 690,8               | 22,8                | 13,2                 | 22,8 | 5    | 0,201                      | 0,221                      | 23,82                     | 22,45                     |
| 120        | 753,6               | 22,8                | 13,4                 | 22,8 | 5,2  | 0,215                      | 0,23                       | 23,48                     | 22,12                     |
| 130        | 816,4               | 22,8                | 13,5                 | 22,8 | 5,6  | 0,229                      | 0,248                      | 23,14                     | 22                        |
| 150        | 942                 | 22,8                | 13,8                 | 22,8 | 6    | 0,252                      | 0,266                      | 22,46                     | 21,48                     |
| 170        | 1067,6              | 22,8                | 14,1                 | 22,8 | 6,2  | 0,273                      | 0,275                      | 21,77                     | 21,02                     |
| 200        | 1256                | 22,8                | 14,8                 | 22,8 | 6,4  | 0,297                      | 0,285                      | 20,8                      | 20,03                     |
| 300        | 1884                | 22,8                | 16,4                 | 22,8 | 7    | 0,337                      | 0,312                      | 18,2                      | 18,07                     |
| 400        | 2512                | 22,8                | 17,7                 | 22,8 | 6,8  | 0,337                      | 0,303                      | 16,55                     | 16,75                     |
| 500        | 3140                | 22,6                | 18,6                 | 22,6 | 6,2  | 0,32                       | 0,278                      | 15,52                     | 15,8                      |
| 600        | 3768                | 22,6                | 19,2                 | 22,6 | 5,6  | 0,3                        | 0,25                       | 14,86                     | 15,30                     |
| 700        | 4396                | 22,4                | 20,2                 | 22,4 | 4,88 | 0,274                      | 0,22                       | 14,42                     | 14,42                     |
| 800        | 5024                | 22,4                | 20,6                 | 22,4 | 4,6  | 0,252                      | 0,207                      | 14,11                     | 14,14                     |
| 900        | 5652                | 22,4                | 20,8                 | 22,4 | 4,2  | 0,233                      | 0,189                      | 13,9                      | 14                        |
| 1000       | 6280                | 22,8                | 21,4                 | 22,8 | 4    | 0,215                      | 0,176                      | 13,74                     | 13,85                     |

Табл.3

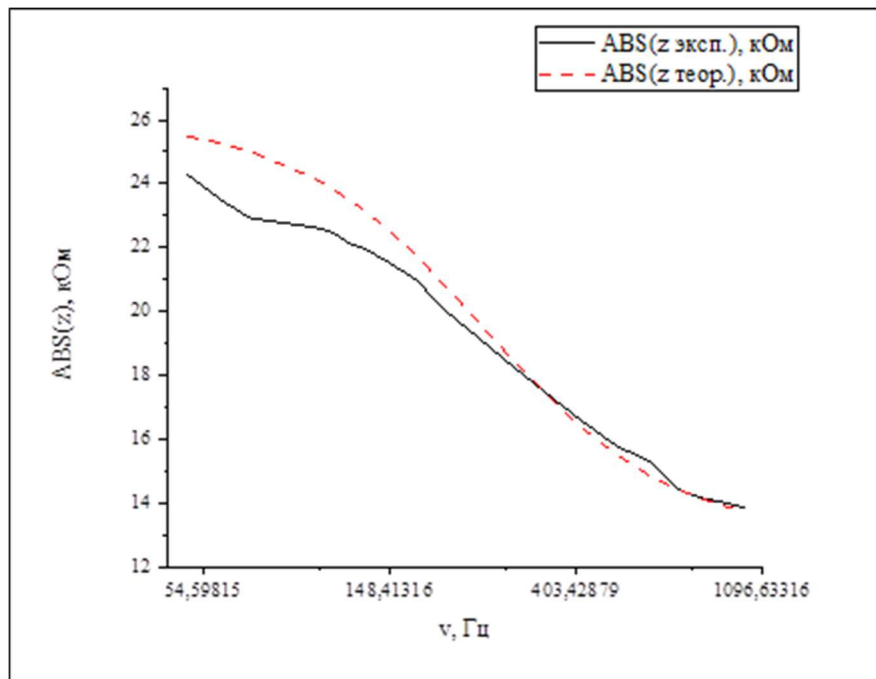


Рис.9. Зависимость модуля импеданса от логарифма частоты для двухполосника с Рис.1в

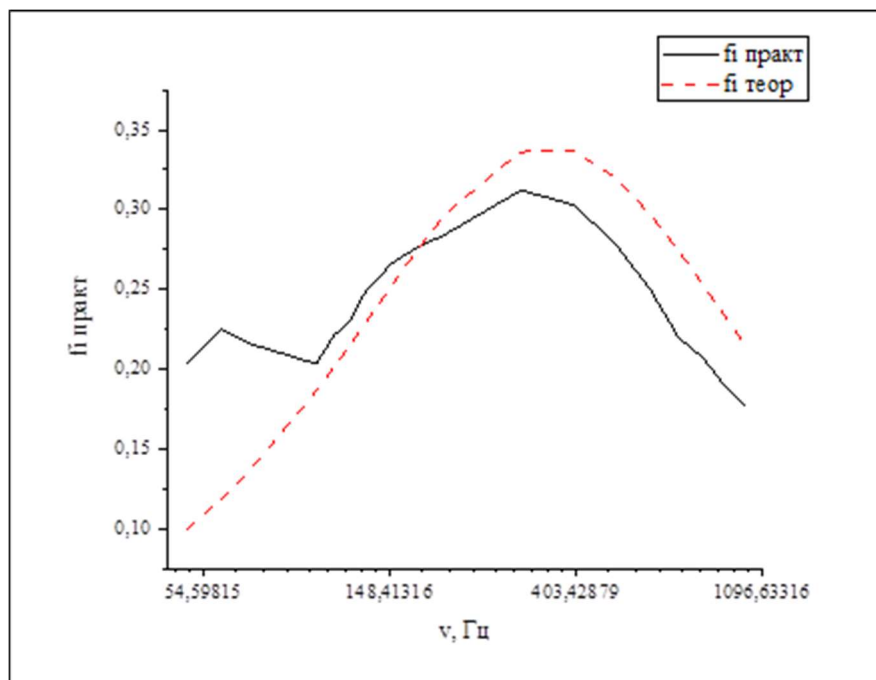
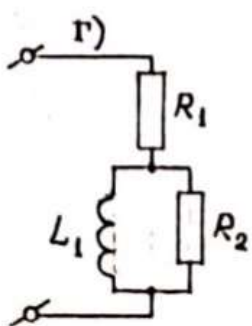


Рис.10. Экспериментально и теоретически полученные зависимости аргумента импеданса двухполосника, изображенного на Рис.1в



$$\Gamma) \frac{1}{z_1} = \frac{1}{R} + \frac{1}{i\omega L} = \frac{\omega L - iR}{\omega RL}, \quad z_1 = \frac{\omega^2 L^2 R + i\omega LR^2}{\omega^2 L^2 + R^2}, \quad z = z_1 + R = \frac{2\omega^2 L^2 R + R^3}{\omega^2 L^2 + R^2} + i \frac{\omega LR^2}{\omega^2 L^2 + R^2}, \quad |z| = \frac{\sqrt{(2\omega^2 L^2 R + R^3)^2 + (\omega LR^2)^2}}{\omega^2 L^2 + R^2};$$

$$\varphi = \arctg \frac{\omega LR}{2\omega^2 L^2 + R^2}; \quad R = 13 \text{ кОм}, \quad L = 0,28 \text{ Гн}.$$

| $\nu$ , Гц | $\omega$ ,<br>рад/с | $U_{\text{вх}}$ , В | $U_{\text{вых}}$ , В | 2of  | 2og | $\varphi_{\text{т}}$ , рад | $\varphi_{\text{э}}$ , рад | $ z _{\text{т}}$ ,<br>кОм | $ z _{\text{э}}$ ,<br>кОм |
|------------|---------------------|---------------------|----------------------|------|-----|----------------------------|----------------------------|---------------------------|---------------------------|
| 20         | 125,6               | 22,8                | 22,2                 | 22,8 | 4,2 | 0,002                      | 0,185                      | 13                        | 13,35                     |
| 30         | 188,4               | 22,2                | 22,2                 | 22,2 | 3,4 | 0,004                      | 0,154                      | 13                        | 13                        |
| 40         | 251,2               | 22,2                | 22,6                 | 22,2 | 2,4 | 0,005                      | 0,108                      | 13                        | 12,78                     |
| 100        | 628                 | 22                  | 22,8                 | 22   | 0,2 | 0,012                      | 0,009                      | 13                        | 12,54                     |
| 200        | 1256                | 22,2                | 22,4                 | 22,2 | 0,6 | 0,024                      | 0,027                      | 13                        | 12,88                     |
| 300        | 1884                | 22,2                | 22,4                 | 22,2 | 1,2 | 0,036                      | 0,054                      | 13                        | 12,88                     |
| 400        | 2512                | 22,4                | 22                   | 22,4 | 1,6 | 0,048                      | 0,0715                     | 13                        | 13,24                     |
| 500        | 3140                | 22,4                | 22                   | 22,4 | 2   | 0,06                       | 0,089                      | 13                        | 13,24                     |
| 600        | 3768                | 22,4                | 22                   | 22,4 | 2,4 | 0,072                      | 0,107                      | 13,1                      | 13,24                     |
| 700        | 4396                | 22,4                | 21,8                 | 22,4 | 2,6 | 0,083                      | 0,116                      | 13,14                     | 13,36                     |
| 800        | 5024                | 22,4                | 21,8                 | 22,4 | 2,8 | 0,095                      | 0,125                      | 13,18                     | 13,36                     |
| 900        | 5652                | 22,6                | 21,4                 | 22,6 | 3   | 0,11                       | 0,133                      | 13,23                     | 13,73                     |
| 1000       | 6280                | 22,8                | 21,4                 | 22,8 | 3,2 | 0,12                       | 0,141                      | 13,28                     | 13,85                     |
| 1500       | 9420                | 23                  | 20,6                 | 23   | 4,6 | 0,168                      | 0,201                      | 13,61                     | 14,51                     |
| 2000       | 12560               | 23                  | 19,8                 | 23   | 5,4 | 0,213                      | 0,237                      | 14,03                     | 15,1                      |
| 2500       | 15700               | 23                  | 19                   | 23   | 6   | 0,25                       | 0,264                      | 14,54                     | 15,74                     |
| 3000       | 18840               | 23                  | 18,2                 | 23   | 6,6 | 0,28                       | 0,291                      | 15,09                     | 16,43                     |
| 3500       | 21980               | 23                  | 17,6                 | 23   | 7   | 0,302                      | 0,309                      | 15,68                     | 16,99                     |
| 4000       | 25120               | 23                  | 17                   | 23   | 7,2 | 0,318                      | 0,318                      | 16,28                     | 17,59                     |
| 4500       | 28260               | 23                  | 16,4                 | 23   | 7,4 | 0,33                       | 0,328                      | 16,87                     | 18,23                     |
| 5000       | 31400               | 23,4                | 16,4                 | 23,4 | 7,4 | 0,336                      | 0,3218                     | 17,45                     | 18,55                     |
| 6000       | 37680               | 23,2                | 15,4                 | 23,2 | 7,2 | 0,34                       | 0,316                      | 18,54                     | 19,58                     |
| 7000       | 43960               | 23,2                | 14,6                 | 23,2 | 7   | 0,335                      | 0,307                      | 19,5                      | 20,66                     |
| 8000       | 50240               | 23,4                | 14,6                 | 23,4 | 7   | 0,325                      | 0,304                      | 20,34                     | 20,84                     |
| 9000       | 56520               | 23,4                | 14                   | 23,4 | 6,6 | 0,313                      | 0,286                      | 21,06                     | 21,73                     |
| 10000      | 62800               | 23,2                | 13,8                 | 23,2 | 6,4 | 0,299                      | 0,279                      | 21,67                     | 21,86                     |

Табл.4

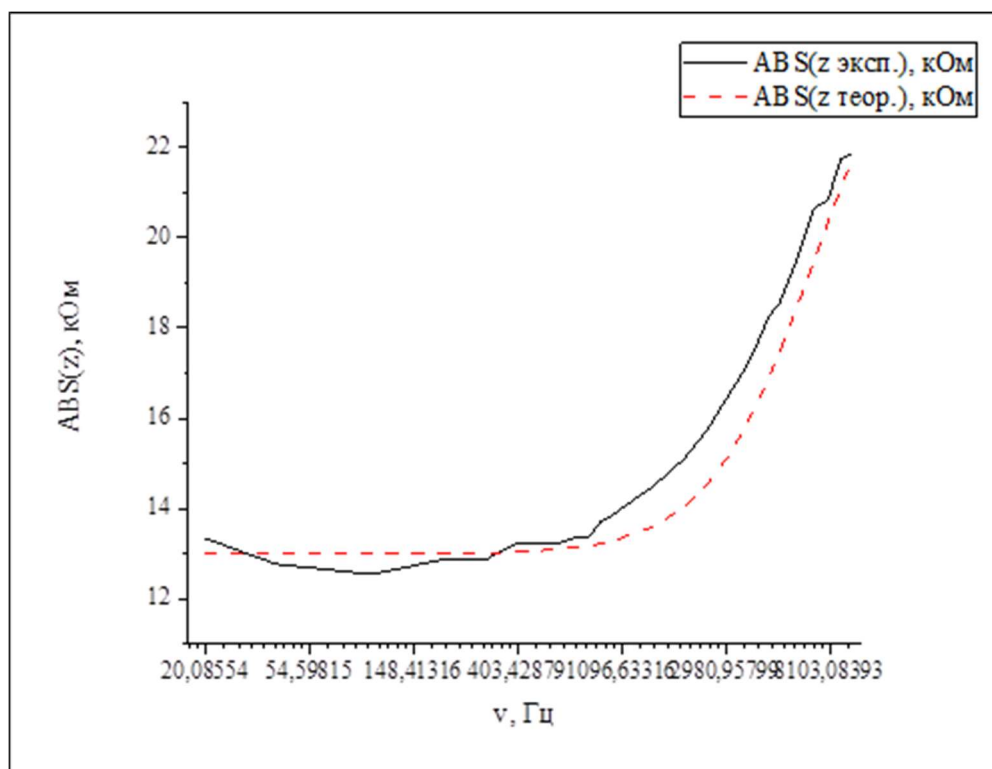


Рис.11. Зависимость модуля импеданса от логарифма частоты для двухполюсника с Рис.1г

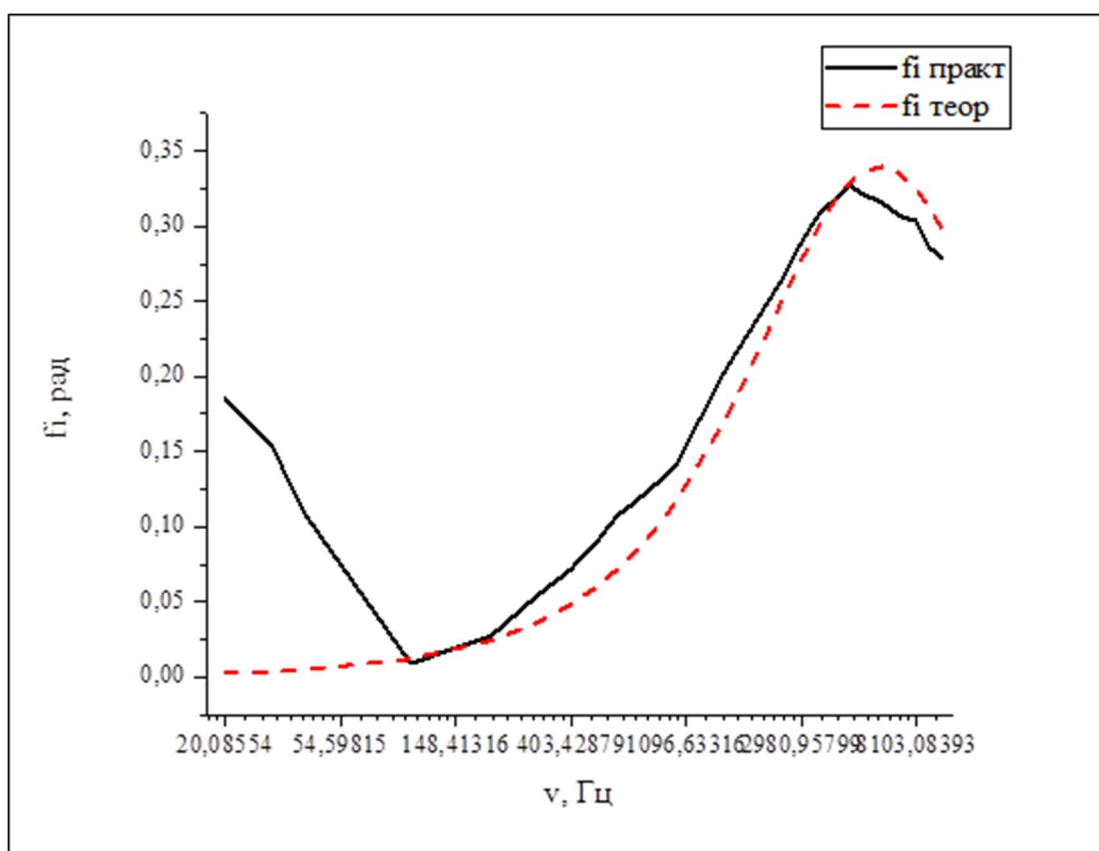
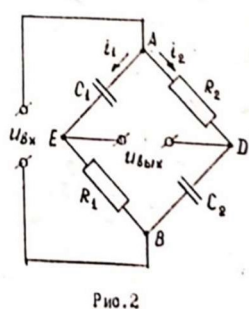


Рис.12. Экспериментально и теоретически полученные зависимости аргумента импеданса двухполюсника, изображенного на Рис.1г



2. Для схемы на рис.2 при максимальном значении сопротивления  $R_1 = R_2 = R = 140 \text{ кОм}$  получили экспериментальную кривую зависимости  $\varphi$  от частоты. Сравнили ее с теоретической (рис.13).

| наклон | $\nu$ , Гц | $\omega$ , рад/с | $2\phi_f$ | $2\phi_g$ | $\sin\phi_T$ , рад | $\sin\phi_3$ , рад |
|--------|------------|------------------|-----------|-----------|--------------------|--------------------|
| ○      | 20         | 125,6            | 12        | 8,8       | 0,493              | 0,733              |
|        | 25         | 157              | 12        | 9,44      | 0,595              | 0,787              |
|        | 30         | 188,4            | 12        | 10,1      | 0,684              | 0,842              |
|        | 35         | 219,8            | 12        | 10,6      | 0,761              | 0,883              |
|        | 40         | 251,2            | 12        | 11,1      | 0,825              | 0,925              |
|        | 45         | 282,6            | 12        | 11,4      | 0,878              | 0,95               |
|        | 50         | 314              | 12        | 11,7      | 0,919              | 0,975              |
|        | 55         | 345,4            | 12        | 11,7      | 0,951              | 0,975              |
|        | 60         | 376,8            | 12        | 12        | 0,973              | 1                  |
|        | 65         | 408,2            | 12        | 12        | 0,988              | 1                  |
| ○      | 70         | 439,6            | 11,9      | 12        | 0,997              | 1,008              |
|        | 75         | 471              | 12        | 12        | 0,999              | 1                  |
|        | 80         | 502,4            | 12,2      | 12        | 0,999              | 0,984              |
|        | 85         | 533,8            | 12,3      | 12,1      | 0,994              | 0,984              |
|        | 90         | 565,2            | 12,3      | 12,1      | 0,986              | 0,984              |
|        | 95         | 596,6            | 12,4      | 12,1      | 0,975              | 0,976              |
|        | 100        | 628              | 12,4      | 12        | 0,963              | 0,968              |
|        | 105        | 659,4            | 12,4      | 11,9      | 0,949              | 0,959              |
|        | 110        | 690,8            | 12,4      | 11,9      | 0,935              | 0,96               |
|        | 115        | 722,2            | 12,5      | 11,7      | 0,919              | 0,936              |
| ○      | 120        | 753,6            | 12,6      | 11,6      | 0,903              | 0,921              |
|        | 125        | 785              | 12,6      | 11,5      | 0,887              | 0,913              |

Табл.5

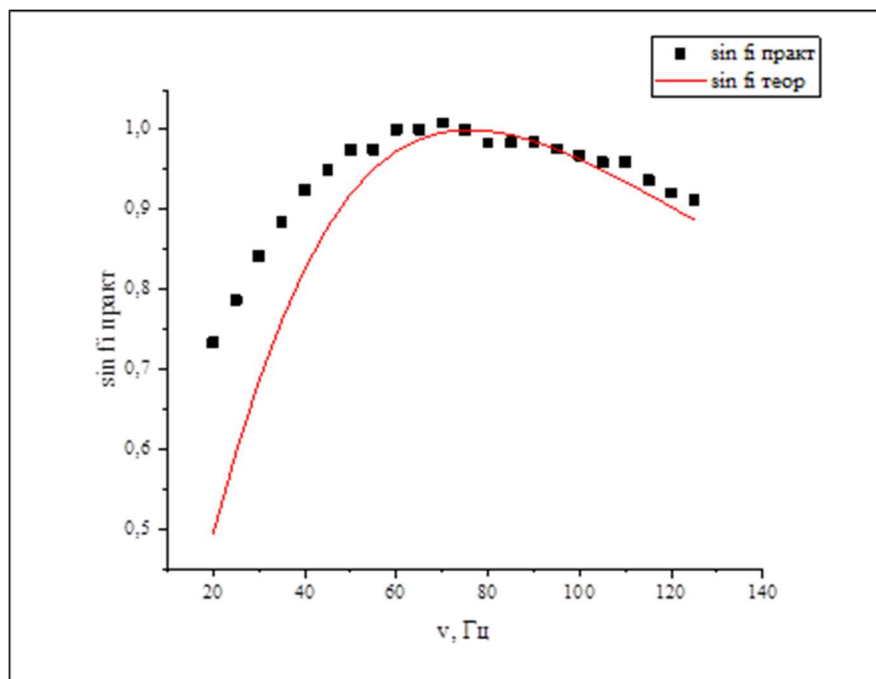


Рис.13

При постоянном значении частоты  $\nu=75$  Гц сняли зависимости  $\phi$  от  $R$ , результат занесли в табл.6.

| $R$ , кОм | $2\phi$ | $2\phi_g$ | $\Gamma$ эксп | $\Gamma$ теор |
|-----------|---------|-----------|---------------|---------------|
| 140       | 12      | 12        | 1,57          | 1,56          |
| 130       | 12,1    | 11,9      | 1,39          | 1,49          |
| 120       | 12,1    | 11,8      | 1,35          | 1,41          |
| 110       | 12,1    | 11,6      | 1,28          | 1,32          |
| 100       | 12,2    | 11,3      | 1,18          | 1,23          |
| 90        | 12,3    | 11,1      | 1,13          | 1,13          |
| 80        | 12,3    | 10,6      | 1,04          | 1,03          |
| 70        | 12,4    | 9,92      | 0,93          | 0,92          |
| 60        | 12,4    | 9,04      | 0,82          | 0,8           |
| 50        | 12,4    | 8,16      | 0,72          | 0,68          |
| 40        | 12,5    | 6,88      | 0,58          | 0,55          |
| 30        | 12,7    | 5,6       | 0,46          | 0,42          |
| 20        | 12,7    | 4,4       | 0,35          | 0,28          |

|    |      |      |       |      |
|----|------|------|-------|------|
| 10 | 12,7 | 2,4  | 0,19  | 0,14 |
| 0  | 12,8 | 0,58 | 0,045 | 0    |

Табл.6.

Построили теоретические и экспериментальные кривые этой зависимости  $\varphi$  от  $R$ .

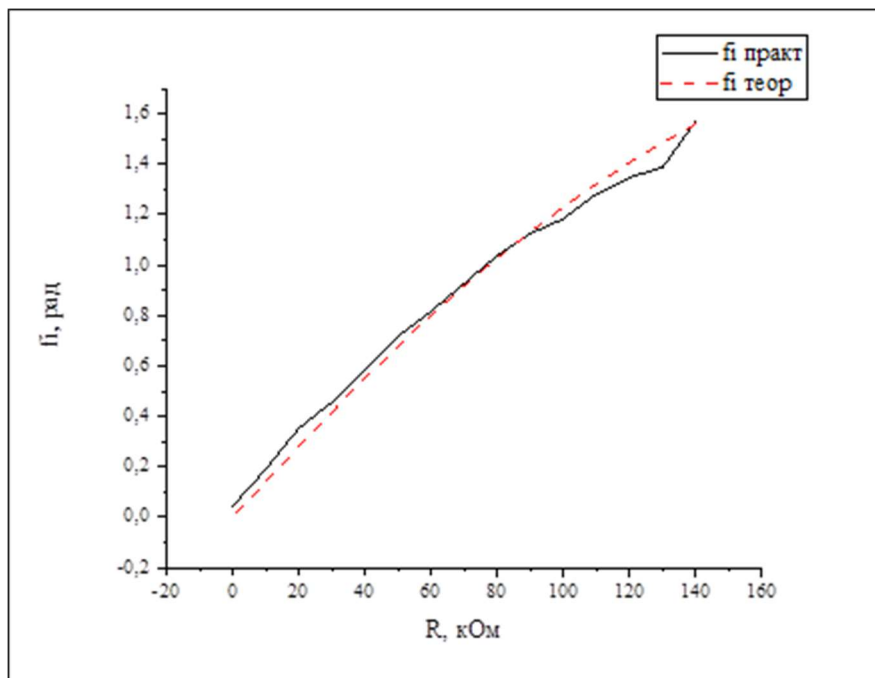
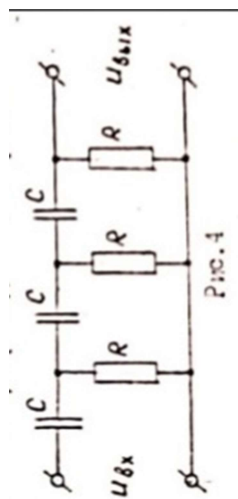


Рис.14

3. Для четырехполосника на рис. 4 сняли зависимость  $\varphi(\omega)$ , результаты занесли в табл. 7.

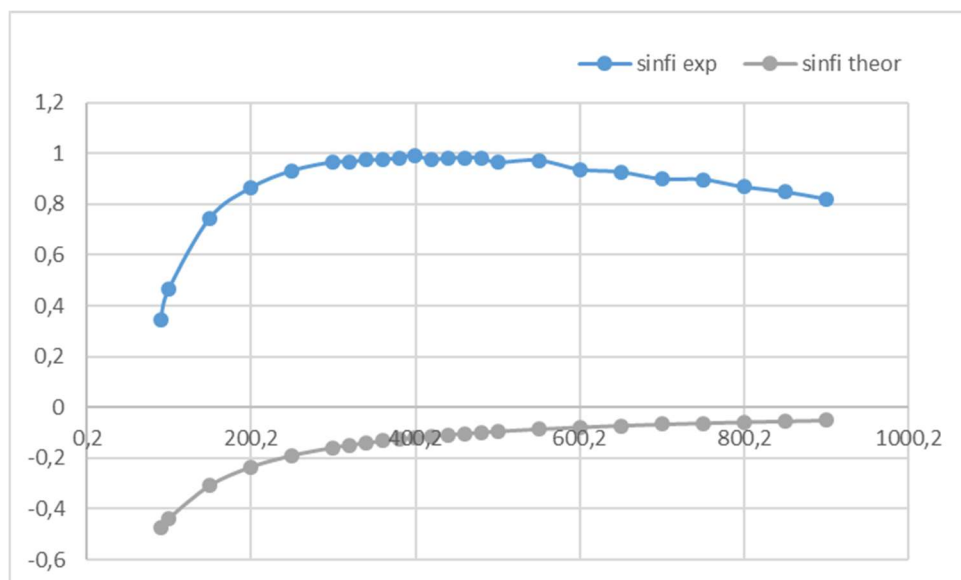
| наклон | V, Гц | $\omega$ , рад/с | 2of  | 2og  | $\sin\varphi_{\text{э}}$ , рад | $\sin\varphi_{\text{т}}$ , рад |
|--------|-------|------------------|------|------|--------------------------------|--------------------------------|
|        | 90    | 565,2            | 23,8 | 8,2  | 0,345                          | -0,476                         |
|        | 100   | 628              | 23,6 | 11   | 0,466                          | -0,437                         |
|        | 150   | 942              | 23,6 | 17,6 | 0,746                          | -0,308                         |
|        | 200   | 1256             | 23,6 | 20,4 | 0,864                          | -0,235                         |
| ○      | 250   | 1570             | 23,4 | 21,8 | 0,932                          | -0,189                         |
|        | 300   | 1884             | 23,2 | 22,4 | 0,966                          | -0,158                         |
|        | 320   | 2009,6           | 23,2 | 22,4 | 0,966                          | -0,148                         |
|        | 340   | 2135,2           | 23   | 22,4 | 0,974                          | -0,139                         |
|        | 360   | 2260,8           | 23   | 22,4 | 0,974                          | -0,132                         |
|        | 380   | 2386,4           | 22,8 | 22,4 | 0,982                          | -0,125                         |



|   |     |        |      |      |       |        |
|---|-----|--------|------|------|-------|--------|
| ○ | 400 | 2512   | 22,6 | 22,4 | 0,991 | -0,118 |
|   | 420 | 2637,6 | 22,8 | 22,2 | 0,974 | -0,113 |
|   | 440 | 2763,2 | 22,6 | 22,2 | 0,982 | -0,108 |
|   | 460 | 2888,8 | 22,2 | 21,8 | 0,982 | -0,103 |
|   | 480 | 3014,4 | 22,2 | 21,8 | 0,982 | -0,098 |
|   | 500 | 3140   | 22,4 | 21,6 | 0,964 | -0,094 |
| ○ | 550 | 3454   | 22   | 21,4 | 0,973 | -0,086 |
|   | 600 | 3768   | 22   | 20,6 | 0,936 | -0,078 |
|   | 650 | 4082   | 21,8 | 20,2 | 0,927 | -0,072 |
|   | 700 | 4396   | 21,8 | 19,6 | 0,899 | -0,067 |
|   | 750 | 4710   | 21,4 | 19,2 | 0,897 | -0,062 |
|   | 800 | 5024   | 21,2 | 18,4 | 0,868 | -0,058 |
|   | 850 | 5338   | 21,2 | 18   | 0,849 | -0,054 |
|   | 900 | 5652   | 21,2 | 17,4 | 0,821 | -0,051 |

Табл.7

Построили соответствующий график зависимости  $\phi(\nu)$ . Определили, при какой частоте он будет равен  $\pi/2$  (около 400 Гц).





## Выводы.

- Изучили устройство двухполюсников и четырехполюсников;
- Для двухполюсников рассчитали зависимости модуля импеданса и аргумента от частоты и построили соответствующие графики;
- Для четырехполюсника, схема которого представлена на рисунке 2, при постоянном значении частоты построили теоретические и экспериментальные кривые зависимости  $\varphi(R)$ ;

