

**МИНОБРНАУКИ РОССИИ**  
**САНКТ-ПЕТЕРБУРГСКИЙ ГОСУДАРСТВЕННЫЙ**  
**ЭЛЕКТРОТЕХНИЧЕСКИЙ УНИВЕРСИТЕТ**  
**«ЛЭТИ» ИМ. В.И. УЛЬЯНОВА (ЛЕНИНА)**  
**Кафедра Теоретических основ радиотехники**

**ОТЧЕТ**  
по лабораторной работе №4  
по дисциплине «Основы метрологии и радиоизмерений»  
Тема: ИЗМЕРЕНИЕ ФАЗОВОГО СДВИГА

Студент гр. 1111

Искаков Б.

Студент гр. 1111

Кузнецов Г.В.

Студент гр. 1111

Федоров В.А.

Студент гр. 1111

Поздняков А.А.

Преподаватель

Митянин Е.А.

Санкт-Петербург

2023

**Цель работы:** изучение методов определения фазового сдвига между 2-мя сигналами, измерение фазового сдвига реакции на фазовращателе, Т-мосте и линии задержки. Знакомство с устройствами измерения фазового сдвига (фазометр Ф2-16).

## **Основные теоретические положения:**

### **Понятие фазы:**

Понятие фазы связано с гармоническими (синусоидальными) колебаниями. Для напряжения  $u(t) = U_m \cdot \sin(\omega \cdot t + \alpha)$  полной фазой является весь аргумент гармонической функции; величину  $\varphi$  называют начальной фазой.

Для двух гармонических колебаний с равными частотами  $u_1(t) = U_{1m} \cdot \sin(\omega \cdot t + \alpha_1)$  и  $u_2(t) = U_{2m} \cdot \sin(\omega \cdot t + \alpha_2)$  вводят понятие разности фаз  $\varphi = \alpha_1 - \alpha_2$ , которую обычно называют фазовым сдвигом.

Обычно за начало отсчета принимают момент времени, при котором начальная фаза первого (опорного) колебания равна  $\alpha_1 = 0$ . Тогда  $u_1(t) = U_{1m} \cdot \sin(\omega \cdot t)$  и  $u_2(t) = U_{2m} \cdot \sin(\omega \cdot t + \varphi)$  где  $\varphi$  – фазовый сдвиг между этими напряжениями.

Для негармонических, в частности импульсных, колебаний понятие фазового сдвига заменяют понятием сдвига во времени. В этом случае измеряют время задержки. Для гармонических колебаний времени задержки  $t_3$  соответствует фазовый сдвиг  $\varphi = 2 \cdot \pi \cdot f \cdot t_3$ .

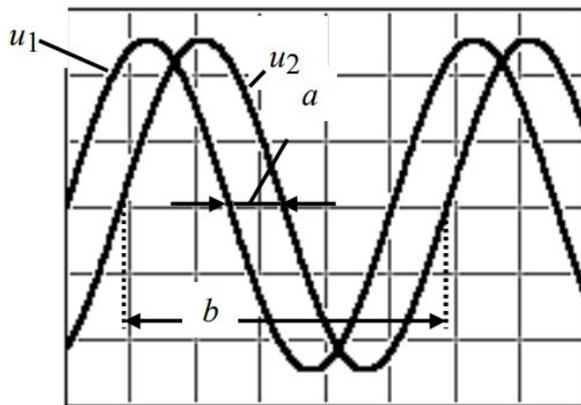
### **Измерение фазового сдвига с помощью осциллографа:**

Фазовый сдвиг можно измерить непосредственно по осциллограммам исследуемых напряжений, наблюдая их одновременно на экране осциллографа (рис.1). Очевидно, что  $\varphi = 360^\circ \cdot \frac{a}{b}$ , где  $a$  – расстояние в делениях между пересечениями осциллограммами нулевой линии;  $b$  – длительность периода, выраженная в делениях шкалы. Для этих измерений используют осциллограф с двухлучевой электронной трубкой или со встроенным электронным коммутатором. Погрешность измерения угла  $\varphi$  этим способом определяется погрешностями измерения длин отрезков  $a$  и  $b$ :

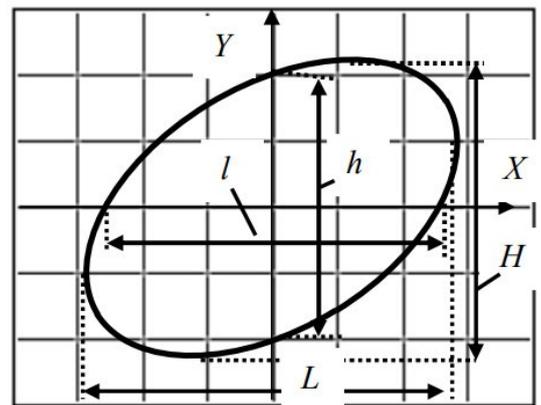
$\Delta \varphi = \varphi \cdot \sqrt{\left(\frac{\Delta a}{a}\right)^2 + \left(\frac{\Delta b}{b}\right)^2}$ , где  $\Delta \varphi$  – погрешность измерения  $\varphi$ ;  $\Delta a$ ,  $\Delta b$  – абсолютные погрешности измерения отрезков  $a$  и  $b$ .

Можно считать максимально возможной погрешностью одно малое деление шкалы осциллографа  $\Delta a = \Delta b = 1$ ;  $\Delta \varphi = \varphi \cdot \frac{\sqrt{a^2 + b^2}}{a \cdot b}$ . Здесь  $\Delta \varphi$ ,  $\varphi$  – в градусах;  $a$ ,  $b$  – в малых делениях шкалы осциллографа. При измерении фазового сдвига способом эллипса одно из исследуемых напряжений подают на вход  $Y$ , а другое – на вход  $X$  осциллографа. Осциллограф работает в  $XY$ -режиме (генератор линейной развертки отключен). При этом луч на экране описывает эллипс (рис.2). Фазовый сдвиг определяют по формуле

$\varphi = \arcsin\left(\frac{h}{H}\right) = \arcsin\left(\frac{l}{L}\right)$ , где  $l$ ,  $h$  – отрезки, отсекаемые эллипсом по осям  $X$  и  $Y$ ;  $L$ ,  $H$  – максимальные отклонения по осям  $X$  и  $Y$ .



**Рисунок 1.** Измерение фазового сдвига с помощью осциллографа в режиме DUAL.



**Рисунок 2.** Измерение фазового сдвига эллиптическим методом, осциллографа в режиме XY.

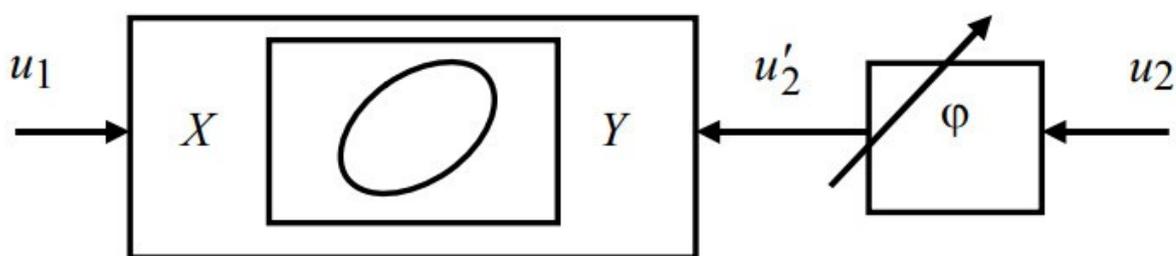
Погрешность измерения этим способом вычисляют по формуле:

$\Delta \varphi = \frac{180^\circ}{\pi} \cdot \sqrt{\left(\frac{\Delta l}{l}\right)^2 + \left(\frac{\Delta L}{L}\right)^2} \cdot \operatorname{tg}(\varphi)$ . Погрешность  $\Delta l = \Delta L$  принимается равной

одному малому делению шкалы осциллографа;  $l$  и  $L$  – размеры эллипса, выраженные в малых делениях шкалы осциллографа. При измерениях этим способом необходимо учитывать фазовый сдвиг, вызываемый неидентичностью фазочастотных характеристик усилителей вертикального и горизонтального отклонений осциллографа,  $\varphi = \varphi_{\text{изм}} + \varphi_{xy}$ , где  $\varphi_{xy}$  – сдвиг фаз между каналами  $Y$  и  $X$ .

Измерение фазового сдвига нулевым (компенсационным) способом поясняет рис.3. С помощью предварительно отградуированного фазовращателя

( $\varphi_{\phi} = var$ ) к фазе напряжения  $u_2$  добавляют фазовый угол  $\varphi_{\phi}$ , такой, чтобы фазовый сдвиг между напряжениями  $u_1$  и  $u'_2$  на входах индикатора равенства фаз (нуль-индикатор) был равен 0. При этом измеряемый фазовый сдвиг равен фазовому сдвигу, вносимому фазовращателем:  $\varphi = \varphi_{\phi}$ . В качестве нуль-индикатора в данной работе используется осциллограф в XY – режиме. Равенству фаз напряжений  $u_1$  и  $u'_2$  соответствует момент стягивания эллипса в прямую линию. Погрешность измерения угла  $\varphi$  этим способом складывается из погрешности градуировки фазовращателя, систематической погрешности  $\varphi_{xy}$ , погрешности определения момента равенства фаз. К недостаткам метода следует отнести необходимость градуировки фазовращателя на каждой частоте, так как  $\varphi_{\phi}$  зависит от частоты.



**Рисунок 4.** Компенсационный способ измерения фазового сдвига.

**Приборы, используемые в лабораторной работе:**

### 1. Цифровой фазометр Ф2-16.

Основные технические характеристики цифрового фазометра

- 1) диапазон рабочих частот 0,002...2000, кГц;
- 2) диапазон входных напряжений 0,002...2, В;
- 3) пределы измерения разности фаз  $\pm 180^\circ$ ; 0...360°;
- 4) основная погрешность измерения разности фаз (при относительной нестабильности частоты сигнала не более  $10^{-4}$  за 10 мин)  
 $\Delta \varphi \leq (0,2 + 0,004 \cdot \varphi + 0,05 \cdot A)$ , где  $\varphi$  – измеряемая разность фаз в градусах,  $A$  – отношение входных напряжений в дБ;
- 5) входное сопротивление прибора более 1 МОм, входная емкость 30 пФ;

Принцип действия:

В фазометре Ф2-16 измеряемый фазовый сдвиг преобразуется во временной интервал (рис. 4, а и б). С помощью формирующих устройств (ФУ) из исследуемых напряжений  $u_1$  и  $u_2$  вырабатываются кратковременные импульсы в моменты перехода напряжений через 0 в сторону увеличения. Эти импульсы поступают на входы S и R триггера Т, и на его выходе формируются прямоугольные импульсы. Длительность импульсов

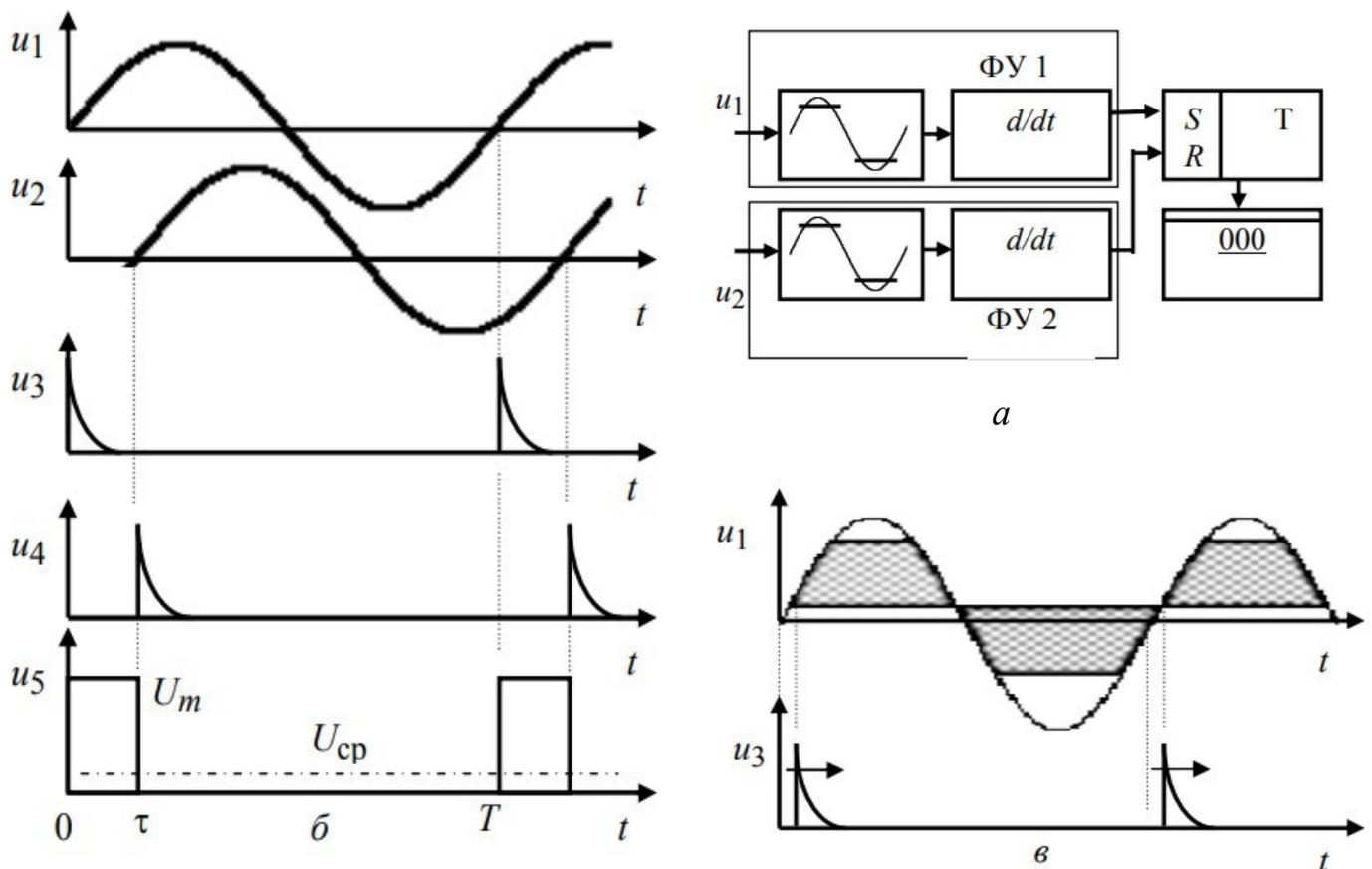
триггера  $\tau$  пропорциональна измеряемому сдвигу фаз:  $\tau = \frac{\varphi \cdot T}{360^\circ}$ .

Среднее значение напряжения на выходе триггера, пропорциональное

измеряемому фазовому сдвигу  $U_{cp} = \frac{1}{T} \cdot \int_0^\tau U_m \cdot dt = U_m \cdot \frac{\tau}{T} = U_m \cdot \frac{\varphi}{360^\circ}$ ,

измеряется встроенным цифровым вольтметром постоянного напряжения.

При этом амплитуда импульсов  $U_m$  выбирается таким образом, чтобы показания вольтметра численно совпадали с фазовым сдвигом  $\varphi$ , выраженным в градусах. При таком способе измерения фазового сдвига может возникнуть систематическая погрешность из-за несимметричного ограничения исследуемых напряжений в ФУ. В этом случае напряжение на выходе ограничителя, например в ФУ1, будет иметь постоянную составляющую (рис. 4, в). Дифференцирующая цепь, входящая в ФУ, постоянную составляющую не пропускает, поэтому моменты перехода напряжения через нуль смещаются (показано на рисунке стрелками). Изменение интервала  $\tau$  приводит к погрешности измерения фазового сдвига.

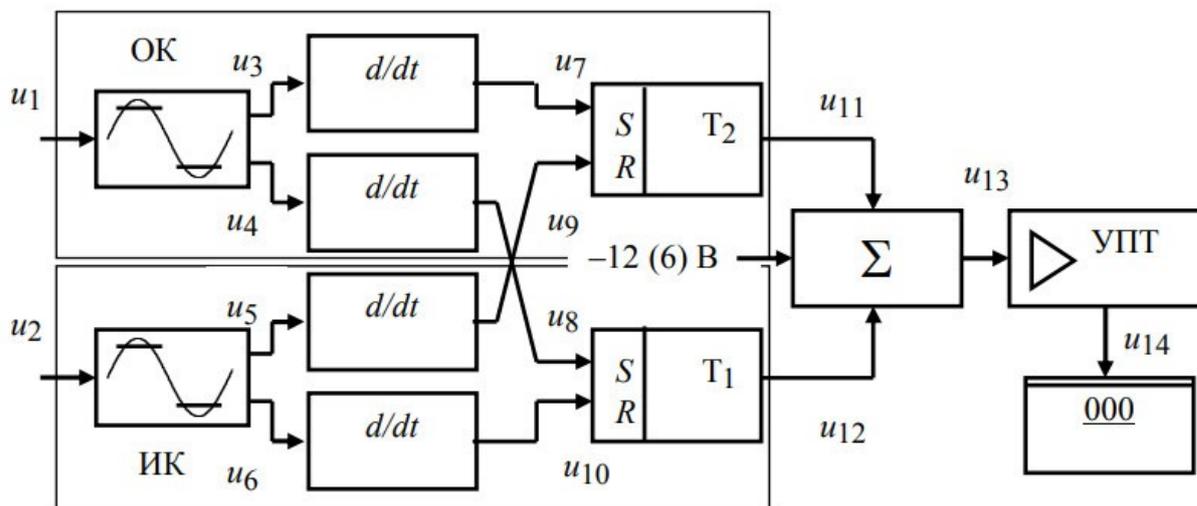


**Рисунок 4.** Структурная схема и временные диаграммы фазометра.

Структурная схема.

Фазометр Ф2-16 выполнен по двухканальной схеме; опорный канал (ОК) и измерительный канал (ИК) идентичны (рис.5). Для устранения погрешности

из-за несимметричного ограничения в фазометре используются два триггера. Усилители ограничители выполнены по двухтактной схеме, поэтому их выходные напряжения  $u_3, u_4$  и  $u_5, u_6$  противофазны (рис.6). Роль дифференцирующих цепочек выполняют дискриминаторы уровня.



**Рисунок 5.** Детальная схема фазометра Ф2-16.

Дискриминаторы ОК срабатывают при прохождении через 0 напряжений  $u_3, u_4$  в сторону увеличения, а дискриминаторы ИК срабатывают при прохождении через 0 напряжений  $u_5, u_6$  в сторону уменьшения. Триггер Т2 переключается положительным импульсом  $u_7$  и отрицательным импульсом  $u_9$ . Триггер Т2 переключается соответственно импульсами  $u_8$  и  $u_{10}$ , которые сдвинуты на полпериода относительно  $u_7$  и  $u_9$ . Прямоугольные импульсы  $u_{11}$  и  $u_{12}$  амплитудой 6 В с Т1 и Т2 складываются в сумматоре, образуя  $u_{13}$ . Туда же подается напряжение смещения – 12 В. Усилитель постоянного тока (УПТ) выделяет постоянную составляющую и изменяет ее полярность, после чего напряжение измеряется цифровым вольтметром. Если в первом канале, например, ограничение несимметричное, то импульсы  $u_7$  и  $u_8$  сдвинуты, как показано стрелками на рис.6. Импульс  $u_{11}$  станет короче, а импульс  $u_{12}$  – длиннее, поэтому результирующая постоянная составляющая останется без изменения.

В фазометре Ф2-16 предусмотрен режим измерения сдвига фаз  $\pm 180^\circ$ .

В этом режиме с помощью переключателя напряжения  $u_7$  и  $u_8$  меняются местами, на сумматор подается напряжение смещения не –12, а –6 В.

Графики напряжений для этого режима показаны на рис.6 справа.



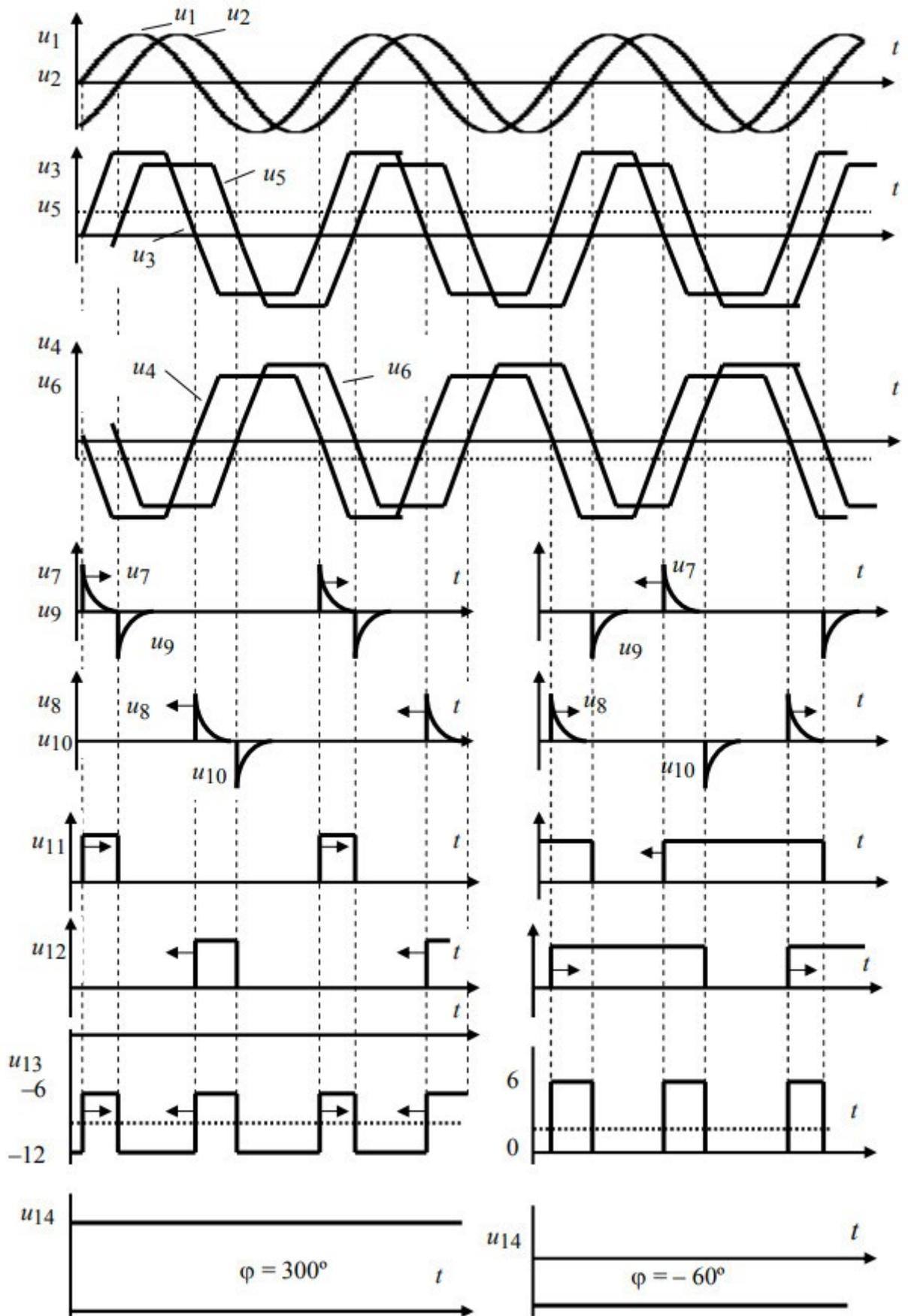


Рисунок 6. Временные диаграммы сигналов внутри фазометра Ф2-16.

В лабораторном макете смонтированы регулируемый фазовращатель, фазосдвигающий Т-мост и набор из трех линий задержки.

### Фазовращатель:

Схема используемого фазовращателя приведена на рис.7, а. Векторная диаграмма (рис.7, б) поясняет его работу. Фазовый угол между напряжениями на конденсаторе и на резисторе равен  $90^\circ$ . Сумма этих напряжений в данной схеме при любых значениях  $R$  и  $C$  остается постоянной, равной входному напряжению. Выходное напряжение снимается между точками  $e$  и  $f$  фазовращателя. Из диаграммы видно, что при одновременном изменении сопротивлений резисторов  $R$  от  $0$  до  $\infty$  фазовый сдвиг между входным и выходным напряжениями меняется от  $0$  до  $180^\circ$ . Амплитуда выходного напряжения остается при этом постоянной, равной амплитуде входного.

Фазовый сдвиг определяется формулой  $\varphi_\phi = 2 \cdot \arctg(2 \cdot \pi \cdot f \cdot R \cdot C)$

В реальной схеме сопротивления резисторов не могут меняться от  $0$  до бесконечности, поэтому фазовый сдвиг в фазовращателе будет изменяться в пределах  $0^\circ < \varphi_\phi < 180^\circ$ .

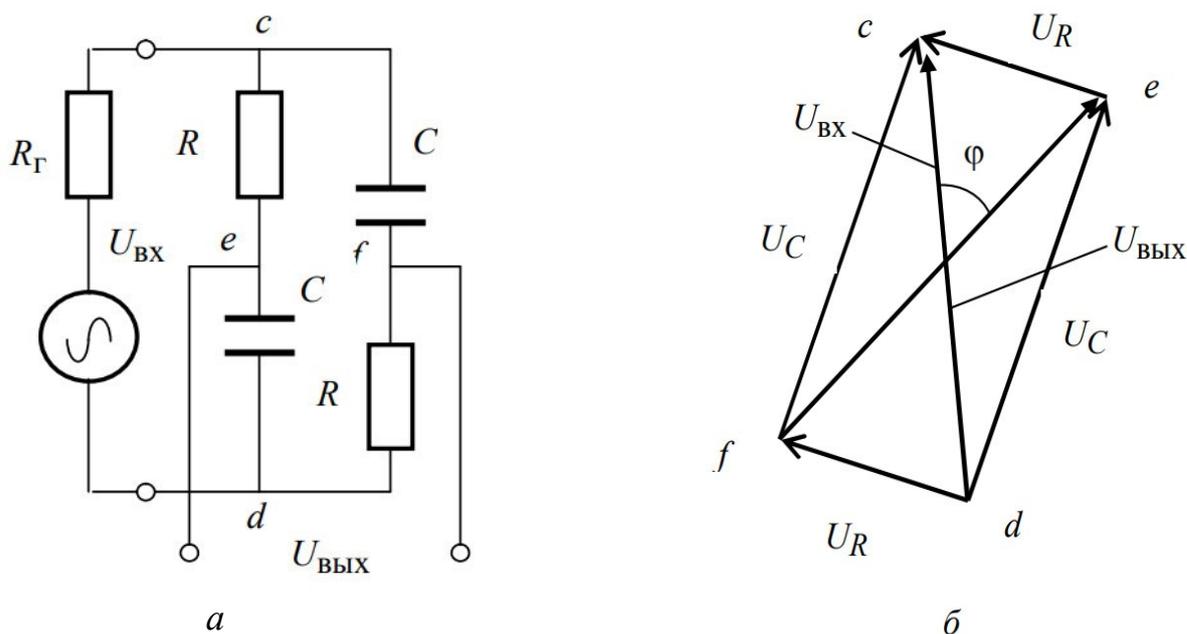


Рисунок 7. Схема и векторная диаграмма напряжений фазовращателя.

### Т-мост:

Схема фазосдвигающего Т-моста приведена на рис. 8. Нагрузкой его в данной работе является осциллограф, входное сопротивление которого много больше выходного сопротивления Т-моста. В этом случае выражение для фазового сдвига, создаваемого Т-мостом, имеет вид

$$\varphi_T = -\arctg\left(\frac{1}{2 \cdot \pi \cdot f \cdot R \cdot C}\right)$$

### Линии задержки:

Простейшая линия задержки представляет собой ряд каскадно включенных LC-звеньев (рис. 9). Каждое звено дает временную задержку  $t_3 = \sqrt{L \cdot C}$ ; общее время задержки линии из  $n$  звеньев  $t_3 = n \cdot \sqrt{L \cdot C}$ .

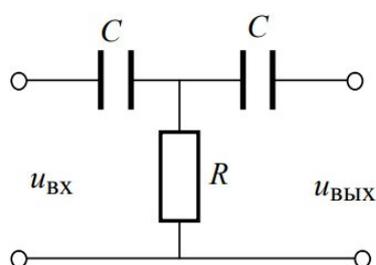


Рисунок 8. Т-мост.

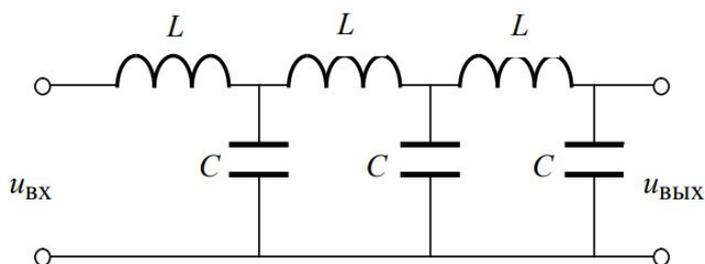


Рисунок 9. Линия задержки.

Волновое сопротивление такой линии  $\rho = \sqrt{\frac{L}{C}}$ . Для неискаженной передачи сигналов линия задержки должна быть нагружена на сопротивление  $R_n = \rho$ , а полоса ее пропускания должна быть больше ширины спектра сигнала. Фазовый сдвиг, создаваемый линией задержки, может быть вычислен по формуле  $\varphi_3 = 360^\circ \cdot f \cdot t_3$ .

ФЧХ линии задержки представляет собой прямую линию с наклоном, определяемым временем задержки  $t_3$ .

## Обработка результатов эксперимента:

### 1. Измерение сдвига между каналами CH1X и CH2Y осциллографа GOS620 способом эллипса.

разберемся как получилось выражение  $\varphi_{xy} = \arcsin\left(\frac{h}{H}\right) = \arcsin\left(\frac{l}{L}\right)$ .

Уравнение эллипса в нашем случае запишется следующим образом:

$$x = u_1(t) = U_{1m} \cdot \sin(\omega \cdot t)$$

$$y = u_2(t) = U_{2m} \cdot \sin(\omega \cdot t + \varphi_{xy})$$

$$y = \frac{U_{2m}}{U_{1m}} \cdot \left( x \cdot \cos(\varphi_{xy}) + \sqrt{1 - x^2} \cdot \sin(\varphi_{xy}) \right)$$

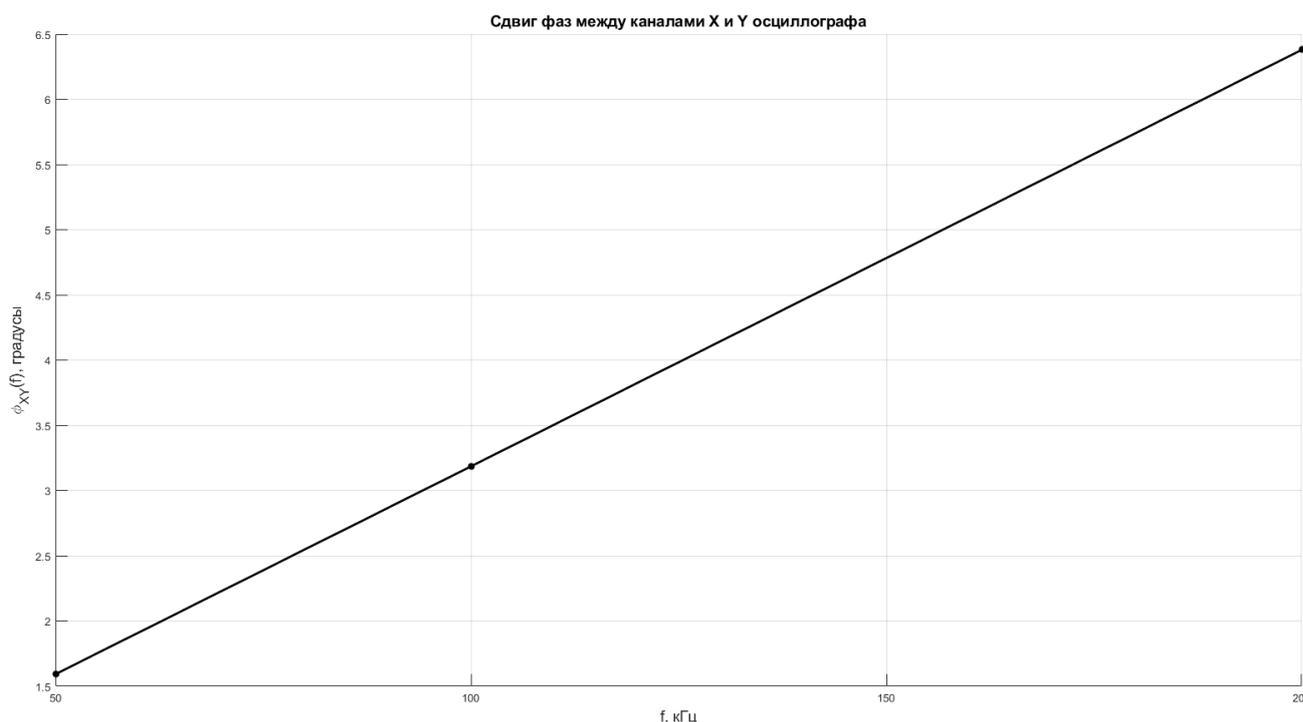
$$\text{при } x=0 \quad y_0 = y(0) = U_{2m} \cdot \sin(\varphi) = \frac{h}{2} \quad \text{и} \quad U_{2m} = \frac{H}{2}$$

$$\text{при } y=0 \quad x_0 = U_{1m} \cdot \sin(\varphi) = \frac{l}{2} \quad \text{и} \quad U_{1m} = \frac{L}{2}$$

$$\sin(\varphi_{xy}) = \frac{y_0}{U_{2m}} = \frac{2 \cdot h}{2 \cdot H} \rightarrow \varphi_{xy} = \arcsin\left(\frac{h}{H}\right)$$

$$\text{по аналогии получим } \varphi_{xy} = \arcsin\left(\frac{l}{L}\right)$$

Построим график зависимости  $\varphi_{xy}(f)$  – рис.10.



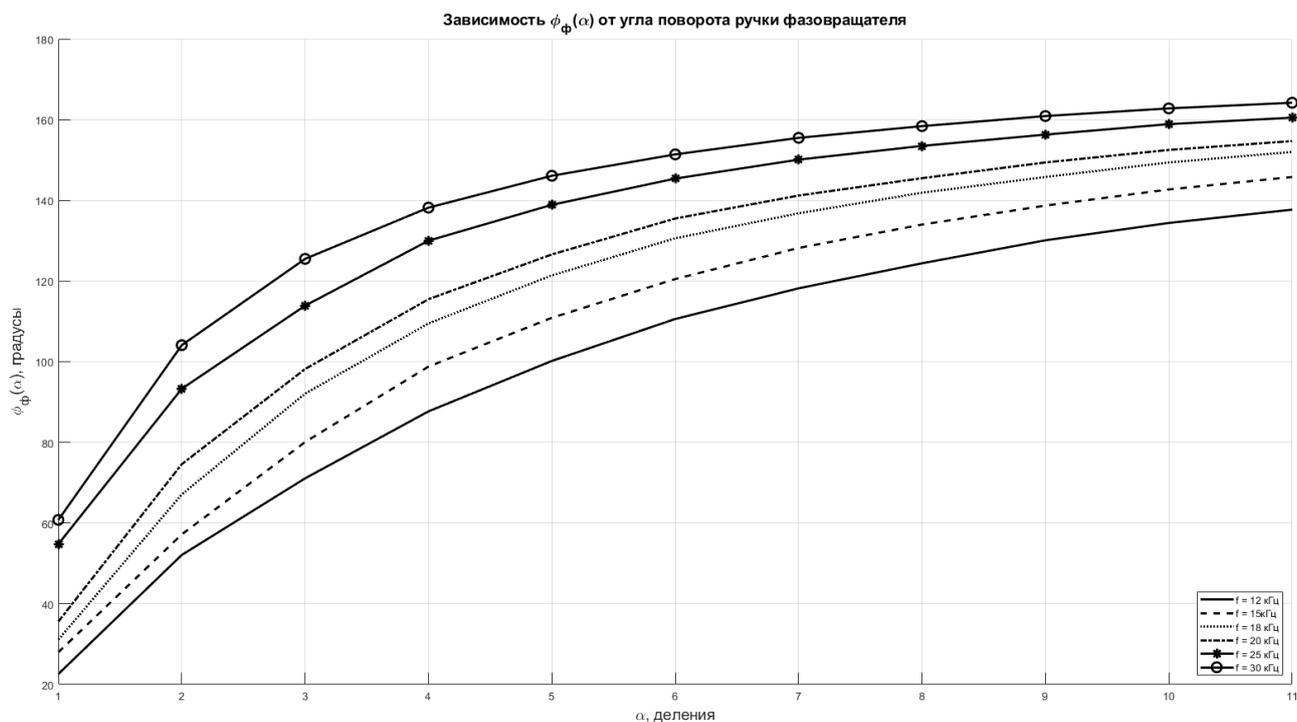
**Рисунок 10.** Сдвиг фаз между каналами X и Y осциллографа GOS620.

Как видно из графика, разность фаз между каналами X и Y линейно зависима от частоты. Такой простой род зависимости упрощает дальнейший анализ двух входных гармонических сигналов в режиме отображения XY осциллографа. Также заметим, что с ростом частоты возрастает и вносимый самим осциллографом сдвиг фаз, можно сделать вывод, что для анализа

гармонических сигналов низких частот метод эллипса достаточно хорошо применим, но для более высоких частот следует учитывать инструментальную и систематическую погрешность осциллографа.

## 2. Градуировка фазовращателя лабораторного макета с помощью фазометра Ф2-16.

Построим на одном графике градуировочные кривые фазовращателя  $\varphi_{\phi}(\alpha)$  для указанных частот – рис. 11.



**Рисунок 11.** Зависимость разности фаз на входе и выходе фазовращателя. Из рис. 11 можно сделать вывод, что шкала фазовращателя размечена логарифмическим образом и измерения, в общем то, выполнены верно, так как графики по своей форме похожи друг на друга.

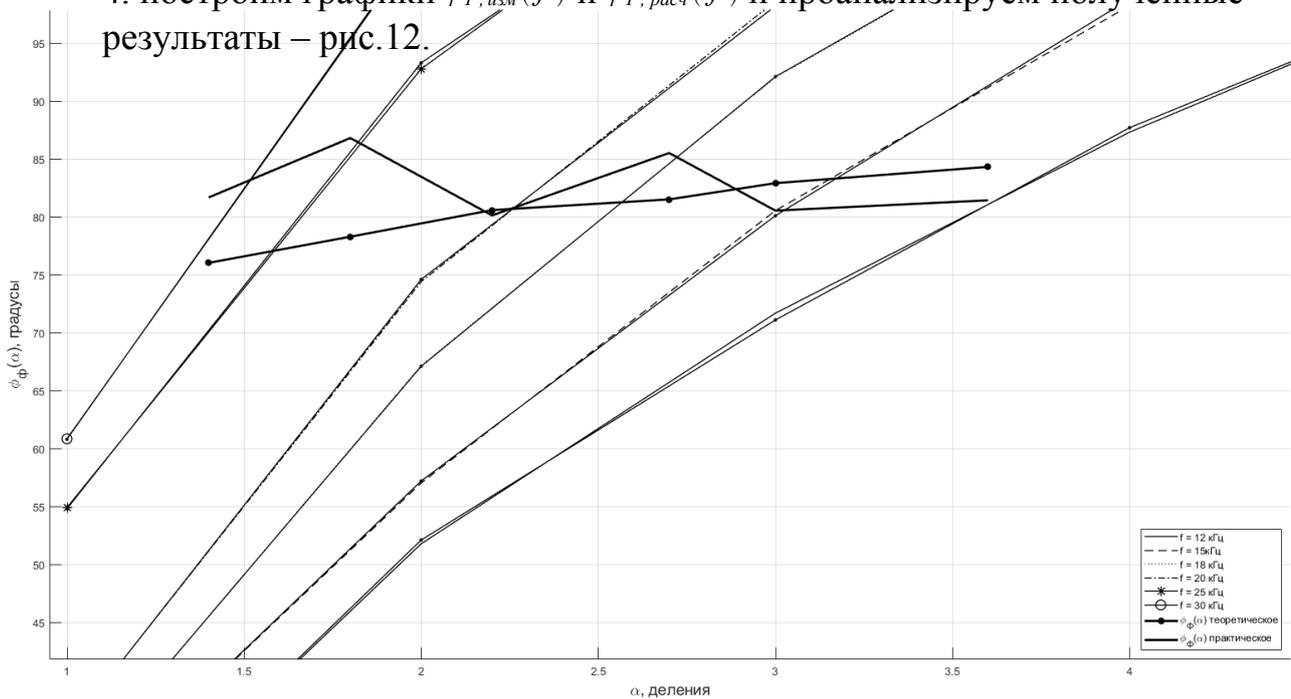
## 3. Измерение фазового сдвига Т-моста нулевым способом.

Измерения для разных частот воздействия проводились с использованием метода эллипса (регулировкой фазовращателя добивались стягивания эллипса в прямую на осциллограмме, что соответствует разности фаз в 0 на входе X – подключен фазовращатель, и Y – подключен выход с Т-моста). Так как разность фаз, создаваемая фазовращателем зависит от исследуемой частоты воздействия, сделаем следующее:

1. аппрокимируем каждую из 6 кривых на графике рис. 11 полиномом 6 степени для большей точности (см. код в MatLab).
2. по эмперическим значениям из протокола получим экспериментальную разность фаз  $\varphi_{T, изм}$  (см. код в MatLab).

3. найдем по формуле  $\varphi_{T, расч} = -\arctg\left(\frac{1}{2 \cdot \pi \cdot f \cdot R \cdot C}\right)$  теоретическое значение разности фаз, создаваемой Т-мостом (см. код в MatLab).

4. построим графики  $\varphi_{T, изм}(f)$  и  $\varphi_{T, расч}(f)$  и проанализируем полученные результаты – рис.12.



**Рисунок 12.** На данном графике изображены аппроксимированные и экспериментальные зависимости фазового сдвига фазовращателя от частоты воздействия и величины деления, поверх них жирными линиями нанесены графики фазовго сдвига на Т-мосте.

Не стоит забывать, что цепь Т-моста имеет емкостной характер, по этому разность фаз  $< 0$ . Практический график примерно схож с теоретическим, хоть и с небольшими погрешностями, которые, как мы думаем, являются систематическими и пришли к нам из 2 пункта. Грубых промахов нет – результат можно считать удовлетворительным.

#### 4. Измерение фазочастотных характеристик трех линий задержки с помощью фазометра Ф2-16.

Проанализируем как LC цепь на рис.9 задерживает/создает разность фаз входного и выходного сигналов – рис 13.

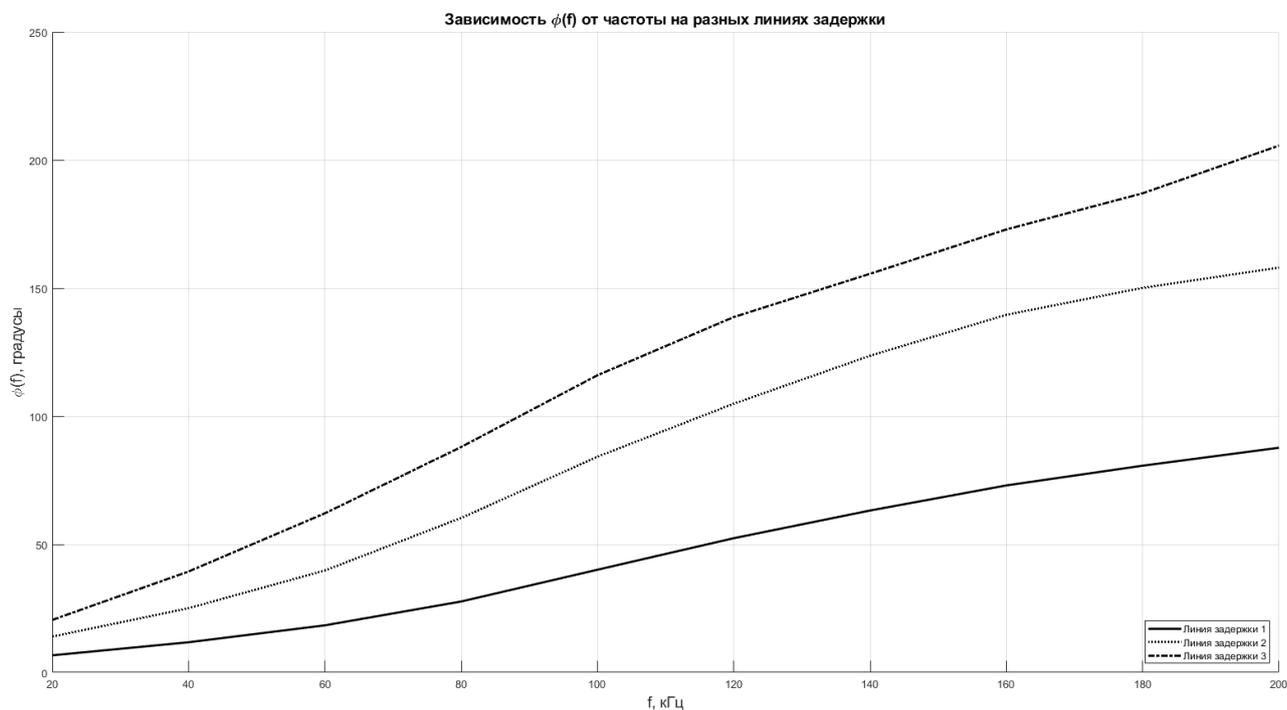
Найдем время задержки для каждой из линий по следующей формуле:

$$t_3 = \frac{\Delta \varphi}{360^\circ \cdot \Delta f}$$

$$t_{31} = \frac{73 - 18,4}{360^\circ \cdot (160 - 60) \cdot 10^3} = 1,5 \cdot 10^{-6} (c)$$

$$t_{32} = \frac{139,6 - 39,8}{360^\circ \cdot (160 - 60) \cdot 10^3} = 2,8 \cdot 10^{-6} (c)$$

$$t_{33} = \frac{73 - 18,4}{360^\circ \cdot (160 - 60) \cdot 10^3} = 3,1 \cdot 10^{-6} (c)$$



**Рисунок 13.** Зависимость разности фаз входного и выходного сигналов от частоты на разных линиях задержки.

**Вывод:** в ходе данной лабораторной работы были изучены методы определения фазовых сдвигов и принцип действия приборов, с которыми производились опыты. Были произведены расчёты по измеренным величинам и построены графики зависимостей. Можно сделать вывод, что метод эллипса позволяет достаточно быстро и наглядно найти разность фаз между

двумя исследуемыми гармоническими сигналами одной частоты, но при этом дает низкую точность. Также мы пользовались электронным фазометром и по измеренным и обработанным данным из 2 пункта смогли посчитать данные в пункте 3. Схема исследуемого фазовращателя является достаточно непрактичной из-за сложных зависимостей величины разности фаз от градуировки шкалы и частоты входного сигнала.

by mactelco