

МИНОБРНАУКИ РОССИИ

Санкт-Петербургский государственный электротехнический
университет «ЛЭТИ» им. В. И. Ульянова (Ленина)

Лабораторная работа 4

ИЗМЕРЕНИЕ ФАЗОВОГО СДВИГА

Санкт-Петербург
2016

4. ИЗМЕРЕНИЕ ФАЗОВОГО СДВИГА

Цель работы – изучение методов определения фазового сдвига и принципов действия приборов, применяемых при этих измерениях. Фазовый сдвиг измеряется способом эллипса; нулевым способом с помощью предварительно отградуированного фазовращателя; цифровым фазометром Ф2-16, работающим по принципу преобразования фазового сдвига во временной интервал.

4.1. Общие сведения

Понятие *фазы* связано с гармоническими (синусоидальными) колебаниями. Для напряжения $u(t) = U_{1m} \sin(\omega t + \varphi)$ полной фазой является весь аргумент гармонической функции; величину φ называют начальной фазой. Для двух гармонических колебаний с равными частотами

$$u_1(t) = U_{1m} \sin(\omega t + \varphi_1);$$

$$u_2(t) = U_{2m} \sin(\omega t + \varphi_2),$$

вводят понятие разности фаз $\varphi = \varphi_1 - \varphi_2$, которую обычно называют *фазовым сдвигом*.

Обычно за начало отсчета принимают момент времени, при котором начальная фаза первого (опорного) колебания равна 0. Тогда

$$U_1(t) = U_{1m} \sin \omega t;$$

$$U_2(t) = U_{2m} \sin(\omega t + \varphi)$$

где φ – 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 $\varphi = 2\pi f t_3$.

4.2. Измерение фазового сдвига с помощью осциллографа

Фазовый сдвиг можно измерить непосредственно *по осциллограммам исследуемых напряжений*, наблюдая их одновременно на экране осциллографа (рис. 4.1). Очевидно, что $\varphi = 360^\circ a/b$, 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 φ этим способом определяется погрешностями измерения длин отрезков a и b :

$$\Delta\varphi = \varphi \sqrt{\left(\frac{\Delta a}{a}\right)^2 + \left(\frac{\Delta b}{b}\right)^2},$$

где $\Delta\varphi$ – погрешность измерения φ ; $\Delta a, \Delta b$ – абсолютные погрешности измерения отрезков a и b .

Можно считать максимально возможной погрешностью одно малое деление шкалы осциллографа $\Delta a = \Delta b = 1$; $\Delta\varphi = \varphi \sqrt{a^2 + b^2} / ab$. 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. 4.2). Фазовый сдвиг определяют по формуле

$$\varphi = \arcsin(h/H) = \arcsin(l/L), \quad (4.1)$$

где l, h – отрезки, отсекаемые эллипсом по осям X и Y ; L, H – максимальные отклонения по осям X и Y .

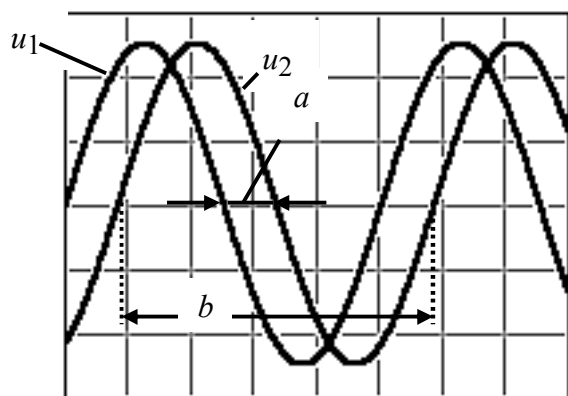


Рис. 4.1. Измерение фазового сдвига с помощью двухлучевого осциллографа

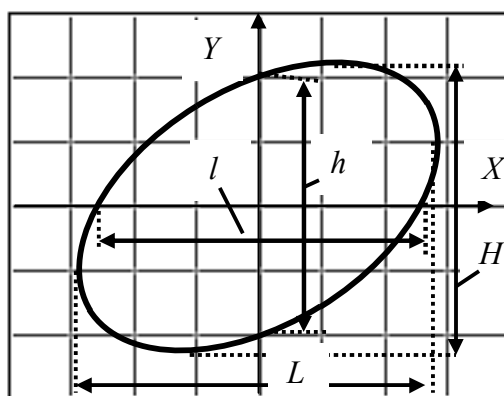


Рис. 4.2. Измерение фазового сдвига с помощью осциллографа в XY -режиме

Погрешность измерения этим способом вычисляют по формуле

$$\Delta\varphi = \frac{180^\circ}{\pi} \sqrt{\left(\frac{\Delta h}{h}\right)^2 + \left(\frac{\Delta H}{H}\right)^2} \operatorname{tg} \varphi, \quad (4.2)$$

а погрешность Δh принимается равной одному малому делению шкалы осциллографа; H и h – 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, $\varphi = \varphi_{\text{изм}} - \varphi_{yx}$, где φ_{yx} – сдвиг фаз между каналами Y и X .

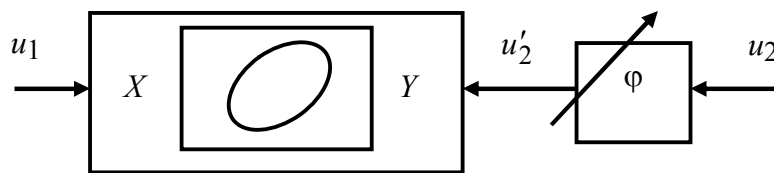


Рис. 4.3. Компенсационный способ измерения фазового сдвига

Измерение фазового сдвига нулевым (компенсационным) способом поясняет рис. 4.3. С помощью предварительно отградуированного фазовращателя ($\varphi_{\text{ф}} = \text{var}$) к фазе напряжения u_2 добавляют фазовый угол $\varphi_{\text{ф}}$, 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: $\varphi = \varphi_{\text{ф}}$. 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 φ этим способом складывается из погрешности градуировки фазовращателя, систематической погрешности φ_{yx} , погрешности определения момента равенства фаз. К недостаткам метода следует отнести необходимость градуировки фазовращателя на каждой частоте, так как $\varphi_{\text{ф}}$ зависит от частоты.

4.3. 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°;

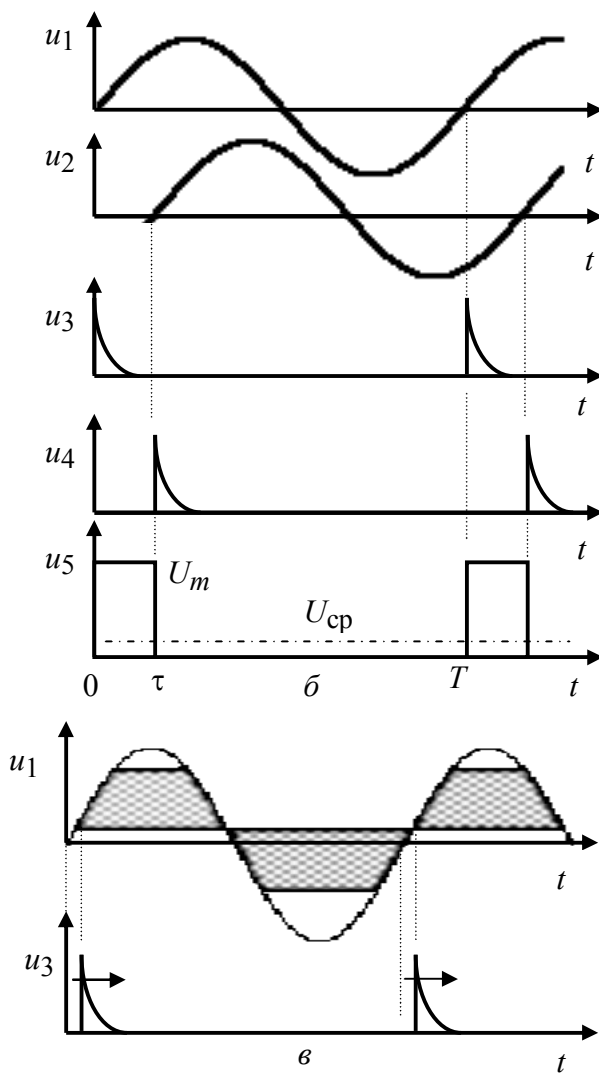
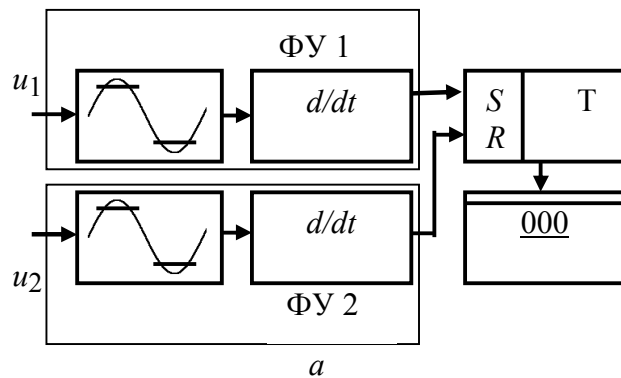


Рис. 4.4. Структурная схема и временные диаграммы фазометра с преобразованием фазового сдвига во временной интервал

4) основная погрешность измерения разности фаз (при относительной нестабильности частоты сигнала не более 10^{-4} за 10 мин) $\Delta\varphi \leq \pm(0,2 + 0,004\varphi + 0,05 A)$, где φ – измеряемая разность фаз в градусах; A – отношение входных напряжений, 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. 4.4, 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 T , и на его выходе формируются прямоугольные импульсы. Длительность импульсов триггера τ пропорциональна измеряемому сдвигу фаз: $\tau = \varphi T / 360^\circ$. Среднее значение напряжения на выходе триггера, пропорциональное измеряемому фазовому сдвигу

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

измеряется встроенным цифровым вольтметром постоянного напряжения. При этом амплитуда импульсов U_m выбирается таким образом, что-

бы показания вольтметра численно совпадали с фазовым сдвигом φ , 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. 4.4, в). Дифференцирующая цепь, входящая в ФУ, постоянную составляющую не пропускает, поэтому моменты перехода напряжения через нуль смещаются (показано на рисунке стрелками). Изменение интервала τ приводит к погрешности измерения фазового сдвига.

Структурная схема. Фазометр Ф2-16 выполнен по двухканальной схеме; опорный канал (ОК) и измерительный канал (ИК) идентичны (рис. 4.5). 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. 4.6).

Роль дифференцирующих цепочек выполняют дискриминаторы уровня.

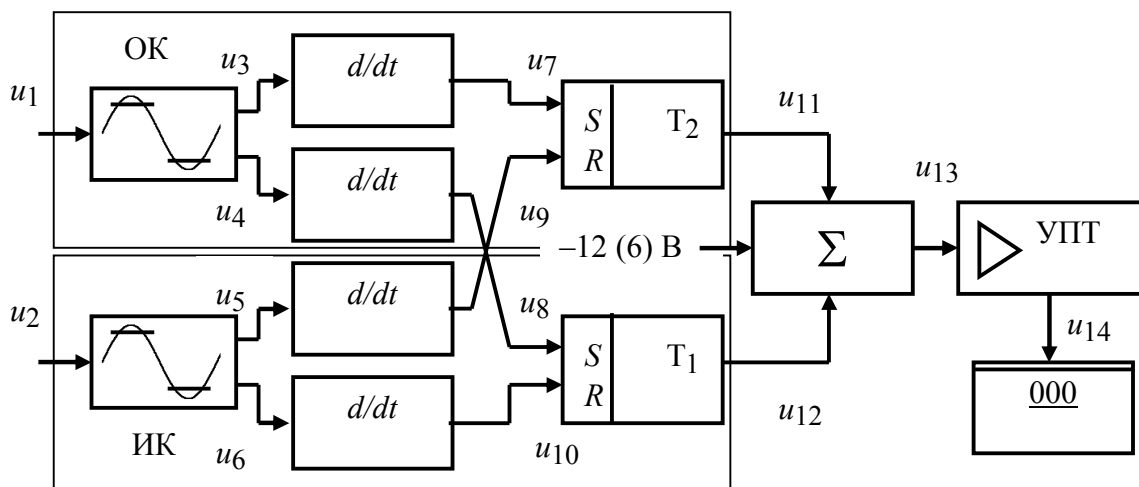


Рис. 4.5. Структурная схема фазометра Ф2-16

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 T_2 переключается положительным импульсом u_7 и отрицательным импульсом u_9 . Триггер T_1 переключается соответственно импульсами u_8 и u_{10} , которые

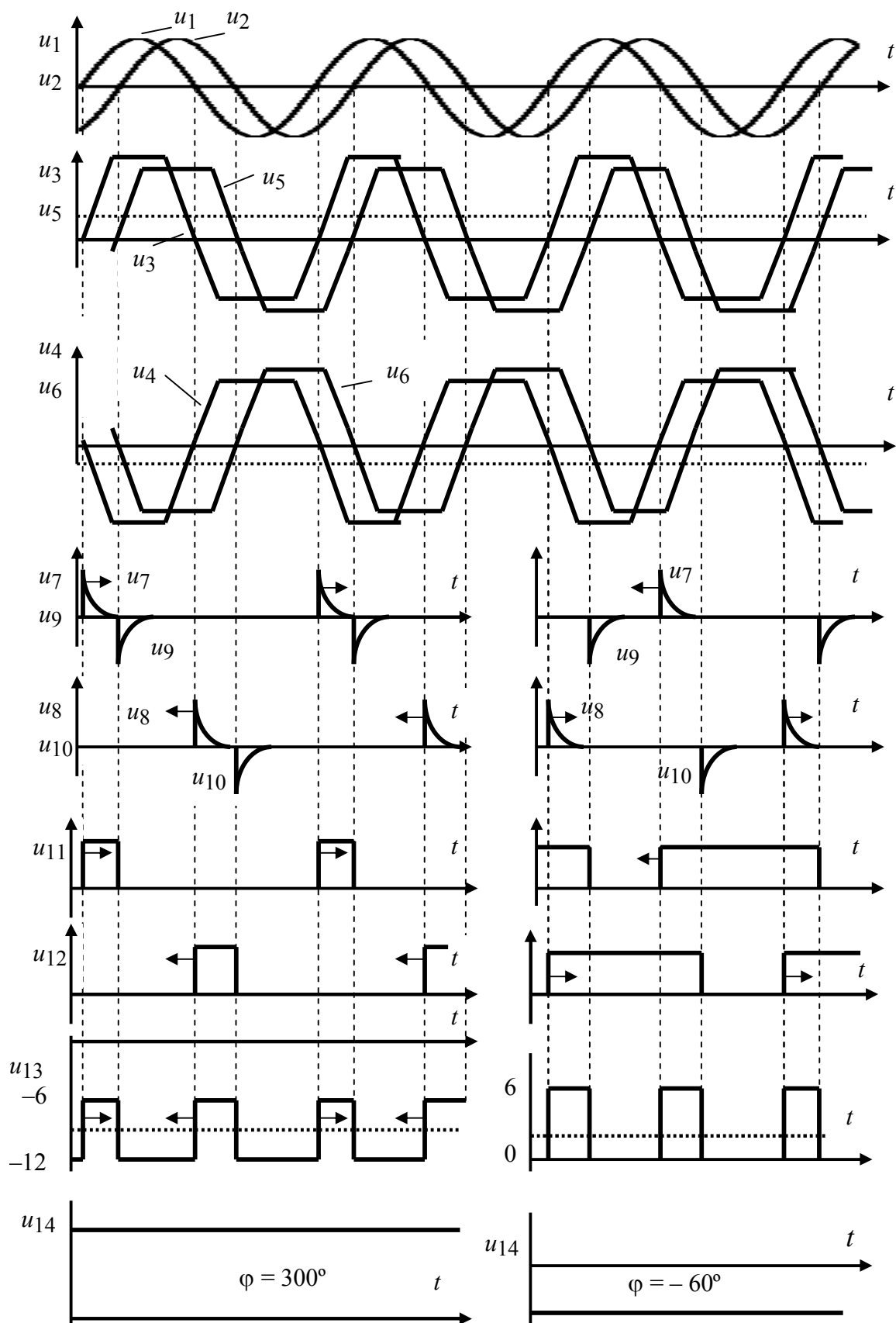


Рис. 4.6. Временные диаграммы, поясняющие работу фазометра Ф2-16

сдвинуты на полпериода относительно u_7 и u_9 . Прямоугольные импульсы u_{11} и u_{12} амплитудой 6 В с T_1 и T_2 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. 4.6. 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. 4.6 справа.

4.4. Описание лабораторного макета

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

Фазовращатель. Схема используемого фазовращателя приведена на рис. 4.7, а. Векторная диаграмма (рис. 4.7, б) поясняет его работу. Фазовый угол между напряжениями на конденсаторе и на резисторе равен 90° . Сумма этих напряжений в данной схеме при любых значениях R и C остается

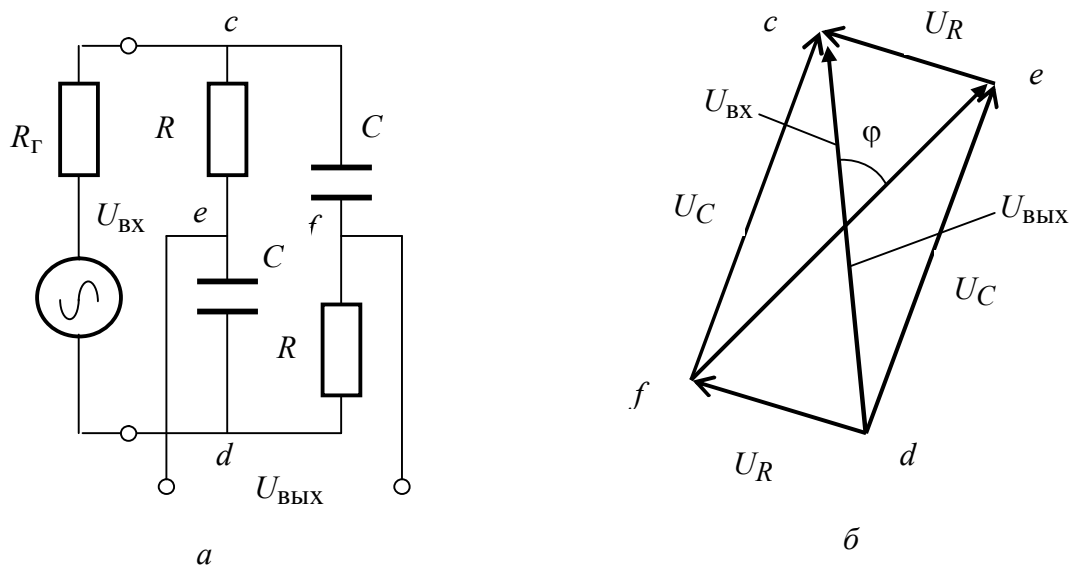


Рис. 4.7. Схема и векторная диаграмма напряжений фазовращателя

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 ∞ фазовый сдвиг между входным и выходным напряжениями меняется от 0 до 180° . Амплитуда выходного напряжения остается при этом постоянной, равной амплитуде входного. Фазовый сдвиг определяется формулой $\varphi_\Phi = 2 \arctg(2\pi fRC)$.

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

Т-мост. Схема фазосдвигающего Т-моста приведена на рис. 4.8. 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

$$\varphi_T = -\arctg\left(\frac{1}{2\pi fRC}\right). \quad (4.3)$$

Линии задержки. Простейшая линия задержки представляет собой ряд каскадно включенных LC -звеньев (рис. 4.9). Каждое звено дает временную задержку $t_3 = \sqrt{LC}$; общее время задержки линии из n звеньев $t_3 = n\sqrt{LC}$.

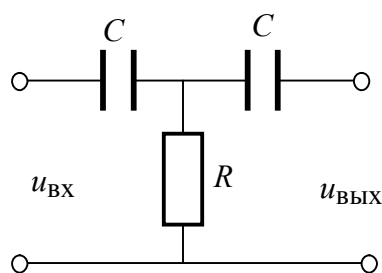


Рис. 4.8. Схема Т-моста

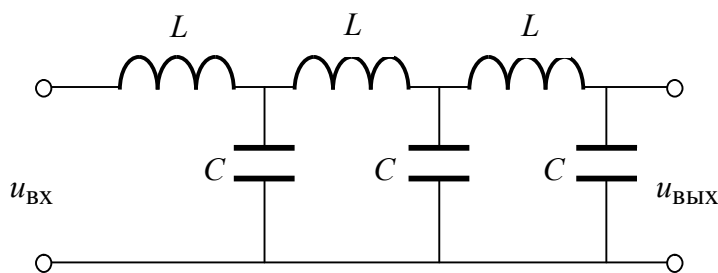


Рис. 4.9. Схема линии задержки

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

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

4.5. Задание и указания к выполнению работы

4.5.1. Измерение сдвига фаз между каналами $CH1X$ и $CH2Y$ осциллографа GOS-620 способом эллипса

Переключатель *РОДА РАБОТ* на макете установите в положение 1. Подайте напряжения с разъемов макета $BYX1$ и $BYX2$ на входы $CH1X$ и $CH2Y$ осциллографа. На осциллографе установите следующие положения регулировок: *TIME/DIV X-Y*, *VOLTS/DIV 2* – в обоих каналах. На генераторе установите следующие положения регулировок: *МНОЖИТЕЛЬ ЧАСТОТЫ* – 10^3 ; дискретный переключатель регулировки напряжения 1,5 В; *ВНУТР. НАГРУЗКА 600 Ω* . Измерения проведите на указанных в табл. 4.1 частотах. При этом способе измерения нужно точно совместить центр эллипса с центром экрана осциллографа, используя регулировки *POSITION*. Размер эллипса можно изменять с помощью ручки плавной *РЕГУЛИРОВКИ ВЫХ*. По формулам (4.1) и (4.2) рассчитайте фазовый сдвиг φ_{YX} и погрешность $\Delta\varphi_{YX}$. Данные измерений и расчетов занесите в табл. 4.1. Постройте график зависимости $\varphi_{YX}(f)$.

4.5.2. Градуировка фазовращателя лабораторного макета с помощью фазометра Ф2-16

Переключатель *РОДА РАБОТ* на макете переведите в положение 2. Определите зависимость фазового сдвига φ_Φ от угла поворота ручки потенциометра лабораторного макета на частотах 12, 15, 18, 20, 25 и 30 кГц. Одновременно наблюдайте на экране осциллографа исходное и сдвинутое по фазе напряжения. Для этого подайте на вход фазовращателя напряжение около 2 В (амплитуда 1 деление шкалы осциллографа) соответствующей частоты с генератора ГЗ-109. На осциллографе установите органы управления в следующие положения: *MODE DUAL*, *TIME/DIV 2...10 $\mu s/DIV$* в зависимости от установленной частоты (в обоих каналах). На фазометре нажмите кнопки \pm ; $\pm 180^\circ$; $[f]$ kHz 20–200. Проведите измерения фазового сдвига для всех делений шкалы потенциометра. Результаты занесите в табл. 4.2. Постройте на одном графике градуировочные кривые фазовращателя $\varphi_\Phi(\alpha)$ для указанных частот.

4.5.3. Измерение фазового сдвига Т-моста нулевым способом

Переключатель *РОДА РАБОТ* макета установите в положение 3. На осциллографе установите следующие положения регулировок: *TIME/DIV X-Y*.

Регулировкой фазовращателя добейтесь стягивания изображения эллипса в прямую линию. При этом $\varphi_T = \varphi_\Phi$. Запишите значения α , дел., в табл. 4.3. Пользуясь градуировочными кривыми фазовращателя, определите фазовый сдвиг Т-моста на указанных в табл. 4.3 частотах, запишите значения $\varphi_{T \text{ изм.}}$. Рассчитайте фазочастотную характеристику Т-моста по формуле (4.3). Учтите, что $C = 400 \text{ пФ}$, $R = 3.3 \text{ кОм}$. Результаты измерений и расчета занесите в табл. 4.3. Постройте экспериментальную и расчетную ФЧХ Т-моста и сравните их.

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

Переключатель *РОДА РАБОТ* макета переведите в положение 4. Фазометр используется в режиме $0 \dots 360^\circ$. Измерения проведите в диапазоне частот от 20 до 200 кГц. Переключатель рода работ макета установите в положение ЛЗ. На фазометре Ф2-16 нажмите кнопки $0 - 360^\circ$; $[f] \text{ kHz } 20-200$. Результаты измерений занесите в табл. 4.4 и постройте графики зависимостей $\varphi_L(f)$. По данным табл. 4.4 вычислите среднее время задержки для каждой линии по формуле $t_3 = \Delta\varphi / (360^\circ \Delta f)$, здесь $\Delta\varphi$ – приращение фазы при изменении частоты на Δf . Сравните найденные значения t_3 с указанными на макете.

4.6. Содержание отчета

Отчет должен содержать: упрощенную и полную структурные схемы фазометра Ф2-16, схему измерения фазового сдвига Т-моста и линии задержки, таблицы с результатами измерений и расчетов по установленной форме и графики по всем пунктам работы.

4.7. Рекомендуемые формы таблиц

Таблица 4.1

Измеряемая величина	$f, \text{ кГц}$						
	5	10	15	20	50	100	200
l , дел.							
L , дел.							
$\Phi_{УХ}$							
$\Delta\Phi_{УХ}$							

Таблица 4.2

α , дел.	f , кГц					
	12	15	18	20	25	30
1						
2						
:						
11						

Таблица 4.3

Фазовый сдвиг	f , кГц					
	12	15	18	20	25	30
α , дел.						
$\varphi_{T \text{ изм}}$						
$\varphi_{T \text{ расч}}$						

Таблица 4.4

φ Л	f , кГц									
	20	40	60	80	100	120	140	160	180	200
$\varphi_{Л1}$										
$\varphi_{Л2}$										
$\varphi_{Л3}$										

4.8. Контрольные вопросы

1. Дайте определение фазового сдвига. Для каких сигналов вводится это понятие?
2. Как измерить фазовый сдвиг по осциллограммам исследуемых напряжений с помощью двухлучевого осциллографа? Чем определяются погрешность этого способа?
3. Как измерить фазовый сдвиг способом эллипса? Чем определяется погрешность этого способа?
4. Поясните методику измерения фазового сдвига нулевым способом.
5. Как устранить погрешность, вызванную неидентичностью фазовых характеристик X- и Y-каналов осциллографа?
6. Поясните принцип действия фазометра с преобразованием измеряемого фазового сдвига во временной интервал.
7. Назовите технические характеристики фазометра Ф2-16.
8. По структурной схеме фазометра Ф2-16 поясните принцип его работы. Используйте графики рис. 4.6.
9. Как устраняется погрешность в фазометре Ф2-16?

10. Нарисуйте схему и векторную диаграмму симметричного RC -фазовращателя, поясните его работу.
11. Сохраняется ли градуировка симметричного RC -фазовращателя при переходе на другую частоту?
12. Как определить по ФЧХ среднее время задержки?
13. Каковы условия неискаженной передачи сигналов линией задержки?
14. От чего зависит фазовый сдвиг в линии задержки?