МИНОБРНАУКИ РОССИИ
федеральное государственное автономное образовательное учреждение высшего образования
«Санкт-Петербургский государственный электротехнический университет «ЛЭТИ» им. В. И. Ульянова (Ленина)»
(СПбГЭТУ «ЛЭТИ»)

Кафедра теоретических основ радиотехники

А. А. Данилин

МЕТОДИЧЕСКИЕ УКАЗАНИЯ
к выполнению лабораторной работы по дисциплине
“ ПРИБОРЫ И ТЕХНИКА РАДИОИЗМЕРЕНИЙ ”
(электронный вариант)

ИЗМЕРЕНИЕ ФАЗОВОГО СДВИГА

Санкт-Петербург

2022 г.

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 Ч3-85/5, 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

$$u_1(t) = U_{m1}\sin(\omega t + \varphi_1), \quad u_2(t) = U_{m2}\sin(\omega t + \varphi_2)$$

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

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

Для негармонических, в частности импульсных, колебаний понятие фазового сдвига заменяют понятием сдвига во времени. В этом случае измеряют время задержки Δt. Для гармонических колебаний времени задержки Δt соответствует фазовый сдвиг $\Delta\varphi = \dfrac{360°\Delta t}{T}$.

4.2. Измерение фазового сдвига с помощью осциллографа

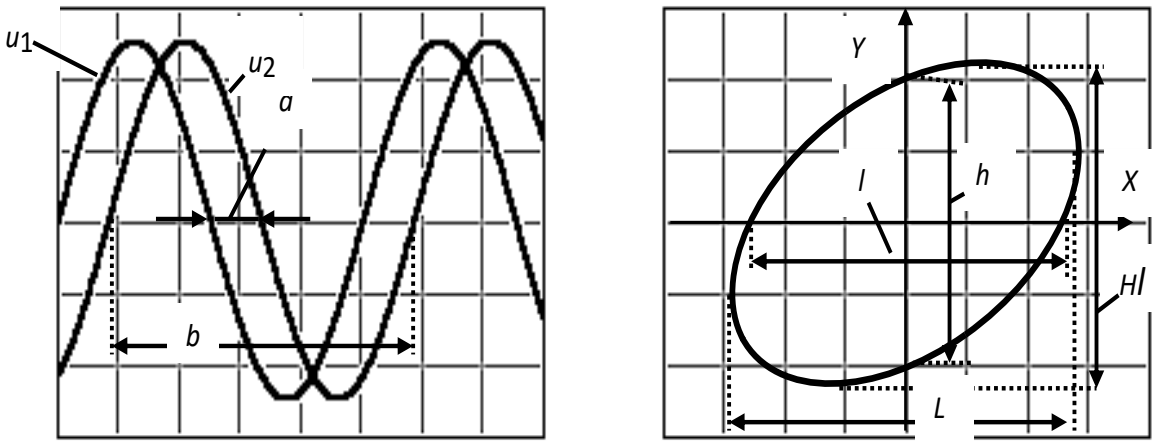
Фазовый сдвиг можно измерить непосредственно *по осциллограммам исследуемых напряжений*, наблюдая их одновременно на экране осциллографа (рис. 4.1а). Очевидно, что $\Delta\varphi = 360° a / b$, где a – расстояние в делениях между пересечениями осциллограммами нулевой линии; b – длительность периода, выраженная в делениях шкалы. Для этих измерений используют осциллограф с двухлучевой электронной трубкой или со встроенным электрон-

ным коммутатором. Погрешность измерения угла φ этим способом определяется погрешностями измерения длин отрезков *a* и *b*.

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. 4.1, б). Фазовый сдвиг определяют по формуле

$$\Delta\varphi = \arcsin(\frac{h}{H}) = \arcsin(\frac{l}{L}), \qquad (4.1)$$

где *l, h* – отрезки, отсекаемые эллипсом по осям *X* и *Y*; *L, H* – максимальные отклонения по осям *X* и *Y*. При проведении измерения предварительно делают центровку изображения – совмещают центр эллипса с центром шкалы осциллографа. Параметры изображения регулируют так, чтобы размеры H и L (см. рис. 4.1, б) были примерно равны.



а б

Рис. 4.1. Измерение фазового сдвига с помощью осциллографа:

Способ эллипса не позволяет определить фазовый сдвиг однозначно. Если большая ось эллипса располагается в первом и третьем квадрантах, то фазовый сдвиг 0º < Δφ < 90º или 270º <Δφ < 360º; если во втором и четвертом, то 90º < Δφ < 180º или 180º < Δφ < 270º. Если сдвиг фаз между двумя напряжениями равен 0, то эллипс примет вид прямой, проходящей под углом 45°. При Δφ =90° и 270° эллипс принимает вид окружности, а при Δφ =180° – вид прямой, проходящей под углом 135°.

Недостатком осциллографического метода является малая точность, обусловленная влиянием на результат измерения погрешности от асимметрии каналов, а также погрешностей, вызванных неточностью измерения линейных размеров, резко возрастающих при углах, близких к 90°. При измерениях этим способом необходимо учитывать фазовый сдвиг, вызываемый неидентичностью фазочастотных характеристик усилителей вертикального и горизонтального отклонений осциллографа, $\Delta\varphi = \Delta\varphi_{изм} - \Delta\varphi_{xy}$, где $\Delta\varphi_{xy}$ – сдвиг фаз между каналами *X* и *Y*.

Измерение фазового сдвига нулевым (компенсационным) способом поясняет рис. 4.2.

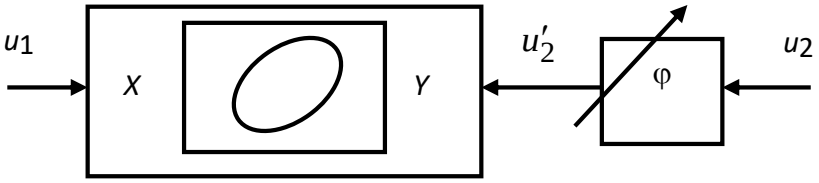


Рис. Рис. 4.2. Компенсационный способ измерения фазового сдвига

С помощью предварительно отградуированного плавного фазовращателя к фазе напряжения u2 добавляют фазовый угол $\varphi_{ФВ}$, такой, чтобы фазовый сдвиг между напряжениями u1 и u2, на входах индикатора равенства фаз (нуль-индикатор) был равен 0 (360°). При этом измеряемый фазовый сдвиг равен фазовому сдвигу, вносимому фазовращателем: $\Delta\varphi_{изм} = \varphi_{ФВ}$. В качестве нуль-индикатора в данной работе используется осциллограф в XY – режиме. Равенству фаз напряжений соответствует момент стягивания эллипса в прямую линию.

Если измеряемый фазовый сдвиг и сдвиг фазовращателя имеют разные знаки, то используют включение образцового фазовращателя в канал измеряемого сигнала. Регулировкой фазовращателя добиваются равенства суммы фазовых сдвигов нулю (или 360°). Тогда

$$\Delta\varphi_{изм} = \begin{cases} 360° - \varphi_{ФВ}\ ,\ 0 < \varphi_{ФВ} \le 360° \\ \left|\varphi_{ФВ}\right|\ ,\ -360° < \varphi_{ФВ} \le 0° \end{cases}.$$

Погрешность измерения угла φ компенсационным способом складывается из погрешности градуировки фазовращателя, систематической погреш-

ности осциллографа $\Delta\varphi_{xy}$, погрешности определения момента равенства фаз. К недостаткам метода следует отнести необходимость градуировки фазовращателя на каждой частоте, так как $\varphi_{ФВ}$ зависит от частоты.

4.3. Цифровой частотомер- фазометр Ч3-85/5

Электронно-счетные частотомеры Ч3-85/4, Ч3-85/5, Ч3-85/6, Ч3-85/7, Ч3-85/8 (Ч3-85/х- серия) построены на сверхбольших интегральных схемах и технологии ПЛИС. Встроенный 16-битный микроконтроллер отвечает за функции управления, измерения, контроля точности и математическую обработку опытных данных.

Частотомеры Ч3-85/х имеют функции измерения частоты, периода, временного интервала, длительности импульса, скважности, количества импульсов, разности фаз, отношения частот. При выполнении частотных измерений по каналу 1 обеспечивается статистическая обработка результата измерения: (среднее, минимум, максимум, относительные значения, СКО). Частотомеры имеют встроенный кварцевый генератор с тактовой частотой 10 МГц (пределы допускаемой нестабильности 2 х 10^{-7} за год), а также вход для подключения внешнего высокостабильного источника опорной частоты 5 МГц или 10 МГц.

Прибор имеет высокую производительность, широкий измерительный диапазон, высокую чувствительность и точность, малый размер, простоту в управлении.

Основные технические характеристики прибора:

Диапазон измерения частоты 1 МГц … 200 МГц, частотный диапазон измерения фазы до 1 МГц;

Диапазон уровней входного сигнала: 50 мВ … 1 В (среднеквадратическое значение) для синусоидального сигнала, 150 мВ … 4,5 В (пиковое значение) для импульсного сигнала;

Входной импеданс: 1 МОм/ 35 пФ или 50 Ом

Диапазон измерения разности фаз двух синхронных синусоидальных сигналов, поступающих на вход 1 и 2 (в диапазоне частот до 1 МГц): от 0° до 360°.

Абсолютная погрешность измерения сдвига фаз на частоте $f_{изм}$:

$\Delta фаз = \pm (3\ нс \cdot f_{изм} \cdot 360 + 0{,}05)\ °$.

Для включения частотомера в режим измерения разности фаз надо нажимать кнопку «*Другие измер*», пока на дисплее кратковременно не появится надпись PHASE 1 TO 2. Одновременно на дисплее отразится “Ch1” и “Ch2”. Частотомер готов измерения фазы сигнала, поданного на вход CH1 относительно сигнала, поданного на CH2 вход. Разность фаз отображается в градусах. Если сигнал CH1 опережает CH2, измеренный результат будет положительный. В противном случае он будет отрицательным

Принцип действия измерителей разности фаз.

Одна из разновидностей фазометров строится по принципу преобразования «фаза–напряжение». В таких приборах измеряемый фазовый сдвиг преобразуется во временной интервал, который характеризуется длительностью прямоугольного импульса Δt. Структурная схема преобразователя представлена на рис. 4.3.

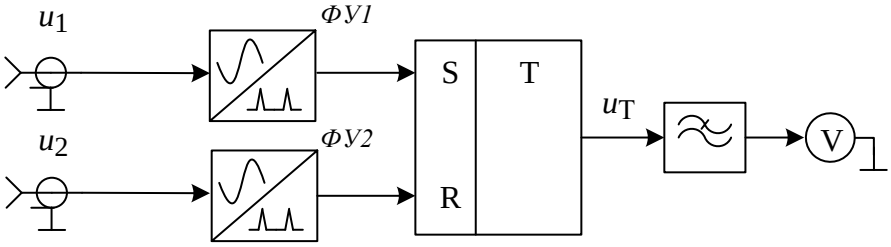


Рис. 4.3. Преобразователь «фаза–напряжение»

С помощью формирующих устройств (ФУ) из исследуемых напряжений u_1 и u_2 в моменты перехода напряжений через нуль (в сторону увеличения) вырабатываются кратковременные импульсы (рис. 4.4).

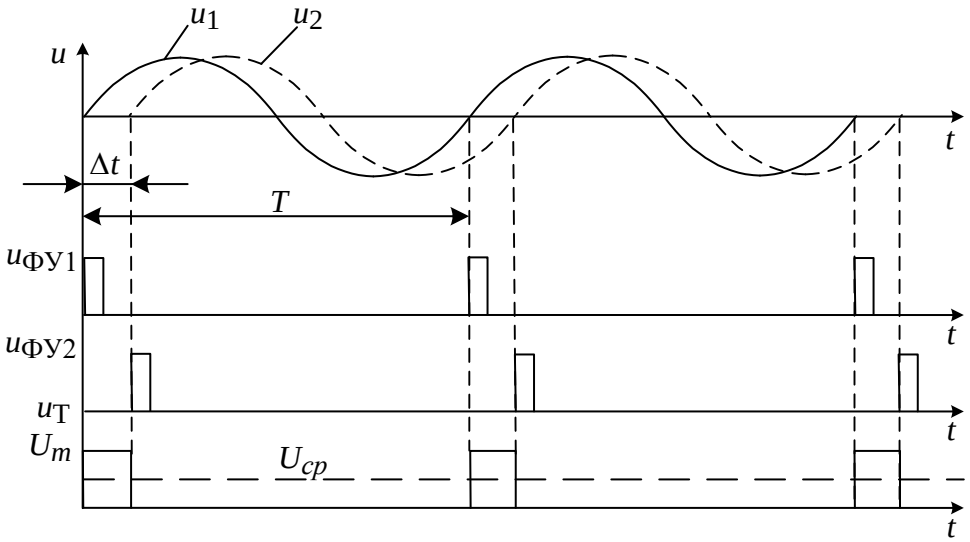


Рис. 4.4. Временные диаграммы напряжений преобразователя фаза–напряжение

Эти импульсы поступают на входы установки *S* и сброса *R* триггера Т. На его выходе формируются прямоугольные импульсы, длительность которых *Δt* пропорциональна измеряемому сдвигу фаз: $\Delta t = \Delta\varphi \cdot T / 360°$.

Прямоугольные импульсы с выхода триггера поступают на фильтр низких частот, в результате чего получается среднее значение напряжения, пропорциональное измеряемому фазовому сдвигу

$$U_{cp} = \frac{1}{T}\int_0^{\Delta t} U_m dt = \Delta\varphi \cdot U_m / 360°.$$

Это напряжение можно измерить аналоговым или цифровым вольтметром постоянного тока. При этом амплитуду импульсов триггера U_m подбирают таким образом, чтобы показания вольтметра численно совпадали с фазовым сдвигом, выраженным в градусах. Такие фазометры имеют невысокую точность, особенно при измерении малых фазовых углов.

Другая разновидность фазометров, строится на основе электронно-счетных частотомеров (ЭСЧ). Именно такой принцип реализован в приборе Ч3-85/5. В этом случае длительность импульса Δt измеряют *методом дискретного счета*. Принцип действия измерителя: импульс u_3 заполняется короткими счетными импульсами u_4 (метки времени $T_м$) с образцовым периодом (рис. 4.5).

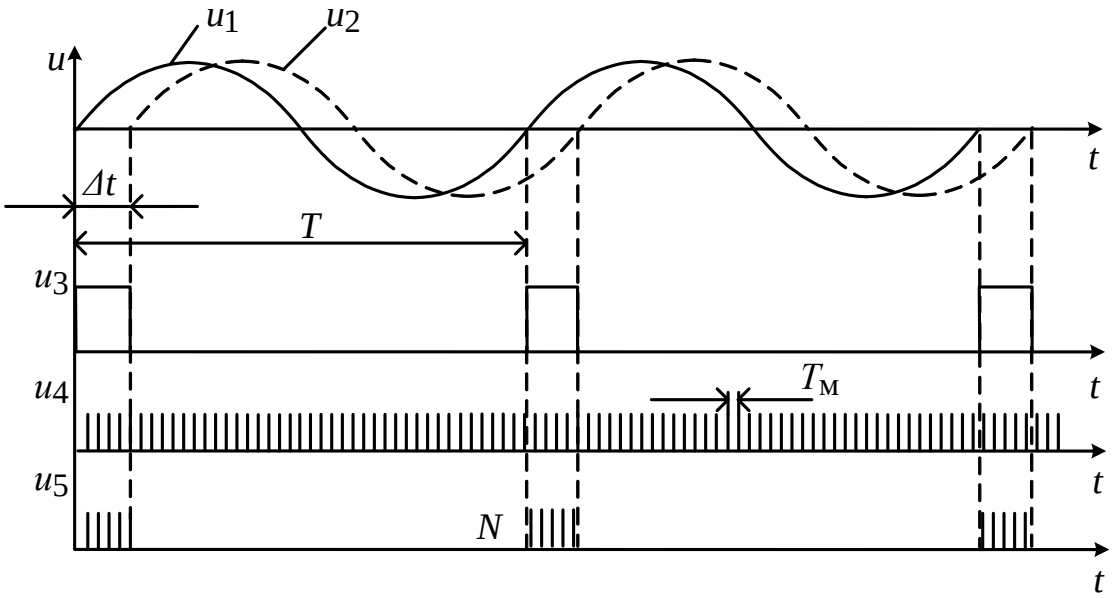


Рис. 4.5. Временные диаграммы для метода дискретного счета

Число импульсов N, попавших в интервал Δt, подсчитывается электронным счетчиком. Их количество дает (с точностью до долей метки времени) искомый интервал времени $\Delta t \approx NT_M$.

Для получения фазового сдвига частотомер дополнительно измеряет период входных сигналов Т аналогичным способом. Для этого формируют второй временной интервал, равный периоду входного сигнала T. Его заполняют метками времени, подают на временной селектор и подсчитывают количество импульсов Nm, укладывающиеся в период $T \approx N_T T_M$. Расчет и вывод на индикатор значения фазового сдвига по формуле

$$\Delta\varphi_x = 360°\Delta t / T \approx 360° N / N_T$$

проводится встроенным микропроцессором прибора.

1. 4.4. Описание лабораторной установки

В лабораторной работе используются генератор звуковых частот Г3-109, электронно-лучевой осциллограф GOS-620 и частотомер (фазометр) Ч3-85/5 (рис. 4.6).

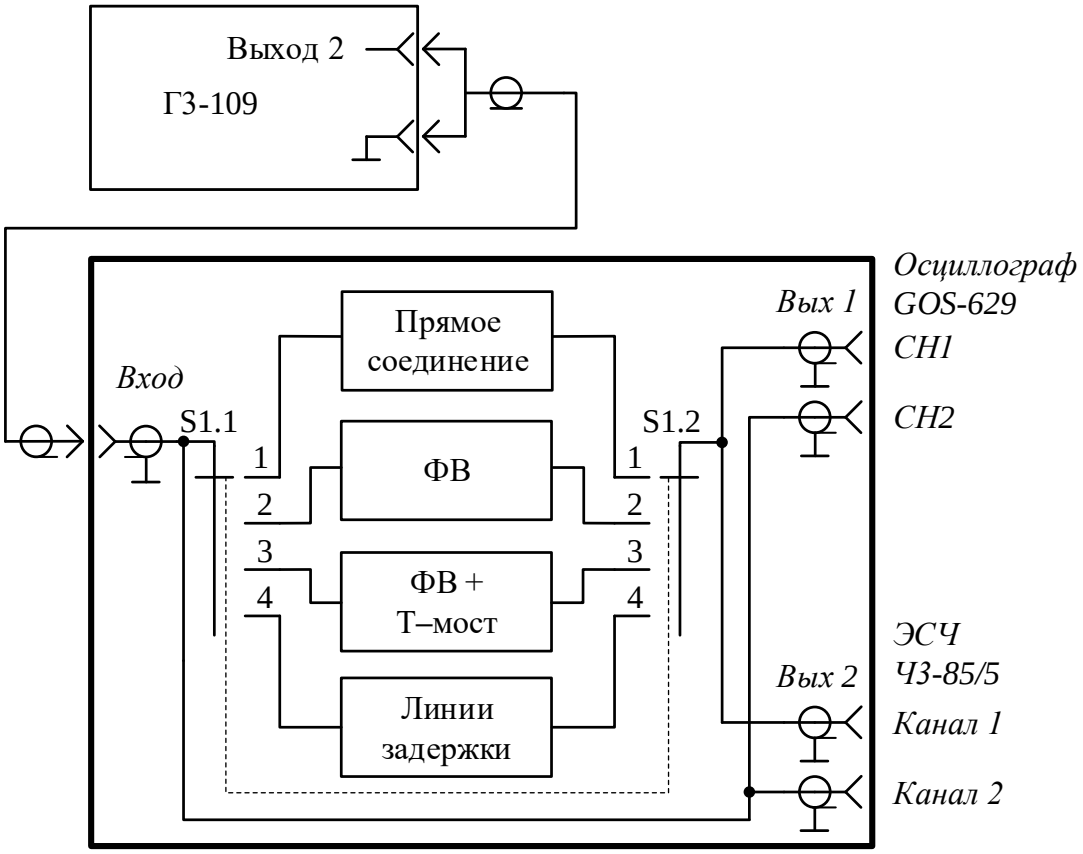
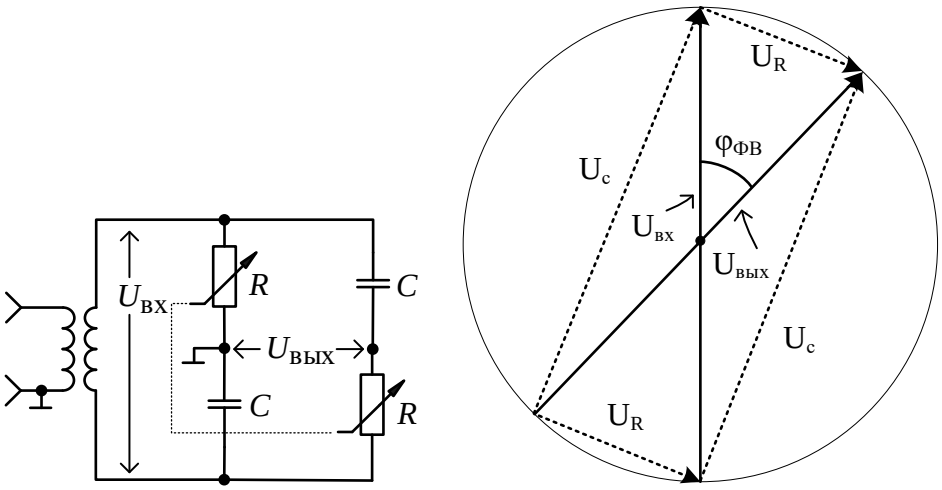


Рис. 4.6. Схема лабораторной установки

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.



а б

Рис. 4.7. RC–фазовращатель:

В одну диагональ моста через разделительный трансформатор подают входное напряжение $U_{вх}$, которое равно векторной сумме U_R и U_C. Выходное напряжение $U_{вых}$ снимают с другой диагонали моста, амплитуда его равна амплитуде входного напряжения при любых значениях R и C. Напряжения U_R и U_C сдвинуты относительно друг друга по фазе на 90°. Изменение фазы на выходе фазовращателя при постоянной емкости конденсаторов осуществляют согласованным изменением сопротивлений сдвоенных резисторов R. При изменении R от 0 до ∞ значения U_R и U_C меняются от нуля до максимума, равного входной амплитуде $U_{вх}$. На векторной диаграмме видно, что при этом угол между входным и выходным напряжением меняется от 0 до 180. Амплитуды сигналов $U_{вх}$ и $U_{вых}$ при этом остаются постоянными. Фазовый сдвиг RC–фазовращателя мостового типа определяется формулой $\varphi_{ФВ} = -2\,\mathrm{arctg}\left(2\pi fRC\right)$, поэтому при равномерном изменении R шкала фазового сдвига получается неравномерная. На практике сопротивления резисторов не могут меняться от нуля до бесконечности. На фазовый сдвиг будет влиять также сопротивление источника сигнала и конечное сопротивление

нагрузки фазовращателя. Поэтому реальный фазовый сдвиг в фазовращателе будет регулироваться в несколько меньших пределах $0^\circ < |\varphi_{ФВ}| < 180^\circ$.

Т–мост. Схема фазосдвигающего Т–моста приведена на рис. 4.8, а. 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

$$\varphi_T = arctg(\frac{1}{2\pi fRC}), \quad 0^\circ < \varphi_T < 90^\circ. \tag{4.2}$$

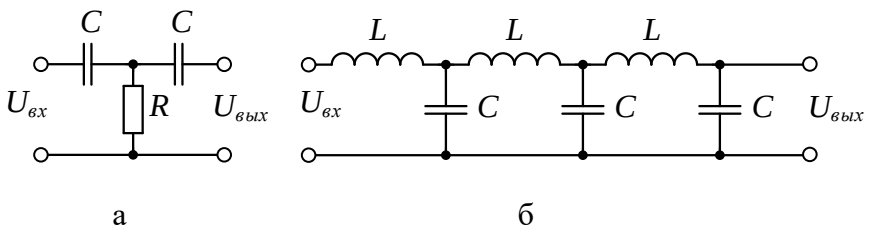


Рис. 4.8. Схемы фазовращателей:

Линии задержки. Простейшая линия задержки представляет собой ряд каскадно включенных LC-звеньев (рис. 4.8, б). Такое звено представляет собой фильтр нижней частоты, который в пределах полосы пропускания имеет линейно-убывающую ФЧХ. Каждое звено дает временную задержку сигнала $t_з = \sqrt{LC}$, которая равна скорости убывания фазы; общее время задержки линии из n звеньев $t_з = n\sqrt{LC}$. Фазовый сдвиг, создаваемый линией задержки на частоте f, может быть вычислен по формуле $\varphi_л = 360^\circ f \cdot t_з$. Волновое сопротивление такой линии $\rho = \sqrt{L/C}$. Для неискаженной передачи сигналов линия задержки должна быть нагружена на сопротивление $R_н = \rho$, а полоса ее пропускания должна быть больше ширины спектра сигнала.

4.5. Задание и указания к выполнению работы

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

В этом пункте измеряется фазовый сдвиг между каналами X и Y осциллографа с относительно узкой полосой пропускания. На частотах выше 50.100 кГц у него наблюдается заметный фазовый сдвиг между каналами φ_{XY}, на более низких частотах он стремится к нулю.

1. Переключатель «*РОД РАБОТЫ*» на макете установите в положение *1 (непосредственное соединение)*. Подайте с клемм «*ВЫХОД 2*» генератора сигнал на вход макета. На генераторе установите начальную частоту 200 кГц (200 по шкале, *МНОЖИТЕЛЬ ЧАСТОТЫ – 10^3*), дискретный переключатель регулировки напряжения 15 В; *НАГРУЗКА – 600 Ω*.

2. Подайте напряжения с разъемов макета «*ВЫХОД 1*» и «*ВЫХОД 2*» на входы *CH1 X* и *CH2 Y* осциллографа. На осциллографе установите следующие положения регулировок: *TIME/DIV = X-Y (включен режим X-Y), VOLTS/DIV = 5 В/дел* – в обоих каналах.

3. Перед измерениями методом эллипса нужно точно совместить центр эллипса с центром экрана осциллографа. Это удобно делать, установив нулевое напряжение на генераторе ручкой «*РЕГУЛИРОВКА ВЫХ*». И регулируя положение точки ручками *POSITION*. Затем установите размер эллипса с помощью ручки плавной «*РЕГУЛИРОВКА ВЫХ*». так, чтобы он занимал большую часть шкалы осциллографа.

4. Измерения проведите методом эллипса (см. п. 4.2) на указанных в табл. 4.1 частотах. По формуле (4.1) рассчитайте фазовый сдвиг. Данные измерений и расчетов занесите в табл. 4.1. Постройте график зависимости $\varphi_{XY}(f)$.

Таблица 4.1

Измеряемая величина	*f*, кГц						
	5	10	15	20	50	100	200
l, дел.							
L, дел.							
φ_{XY}, град							

4.5.2. Градуировка фазовращателя лабораторного макета с помощью цифрового фазометра

Для использования компенсационного (нулевого) метода необходимо откалибровать плавный фазовращатель, установленный в макете на каждой рабочей частоте.

1. Переключатель «*РОД РАБОТЫ*» на макете переведите в положение *2*.

2. Определите зависимость фазового сдвига $\varphi_{ФВ}$ от угла поворота ручки потенциометра фазовращателя α, отсчитываемого по его шкале. Измерения проведите с помощью фазометра Ч3-45/5. Для этого включите режим фазовых измерений, нажимая кнопку «*Другие измер*» до тех пор, пока на дисплее кратковременно не появится надпись PHASE 1 TO 2. После этого фазометр будет показывать результат измерения в градусах, запятые в показаниях служат для выделения групп трех значащих цифр, точка – для разделения целой и дробной частей числа. Учтите, что *показания фазометра надо взять со знаком «минус»,* поскольку фазометр показывает результат в пределах $0\ldots360^0$, а фазовращатель дает отрицательный фазовый сдвиг.

3. Одновременно наблюдайте на экране осциллографа исходное и сдвинутое по фазе напряжения. Для этого на осциллографе установите органы управления в следующие положения: *MODE DUAL, TIME/DIV = 2…10 μs/DIV* в зависимости от установленной частоты измерения. Подберите коэффициент отклонения второго канала так, чтобы амплитуды сигналов были примерно равны.

4. Проведите измерения фазового сдвига для всех делений шкалы потенциометра на частотах 12, 15, 18, 20, 25 и 30 кГц. Результаты занесите в табл. 4.2.

5. Постройте на одном графике градуировочные кривые фазовращателя $\varphi_{ФВ}$ (α) для указанных частот.

Таблица 4.2

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

4.5.3. Измерение фазового сдвига Т-моста нулевым способом

1. Переключатель «*РОД РАБОТЫ*» макета установите в положение 3. В этом положении калиброванный фазовращатель и исследуемый Т–мост включены последовательно.

2. На осциллографе установите режим X-Y: *TIME/DIV* = *X-Y*.

3. Регулировкой фазовращателя добейтесь стягивания изображения эллипса в прямую линию. Запишите значения указателя по шкале фазовращателя α, дел., в табл. 4.3. Пользуясь градуировочными кривыми фазовращателя, полученными в п. 4.2, определите фазовый сдвиг Т–моста $\varphi_{T\,изм} = -\varphi_{ФВ}$ на указанных в табл. 4.3 частотах.

4. Рассчитайте фазочастотную характеристику Т–моста по формуле (4.2). Учтите, что $C = 400$ пФ, $R = 3.3$ кОм. Результаты измерений и расчета занесите в табл. 4.3.

5. Постройте графики экспериментальной и расчетной ФЧХ Т-моста и сравните их.

Таблица 4.3

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

4.5.4. Измерение фазочастотных характеристик трех линий задержки с помощью фазометра Ч3-85/5

1. Переключатель *РОД РАБОТЫ* макета переведите в положение 4.

2. Измерения ФЧХ проведите для трех линий задержки (выбираются ручкой *ЛИНИИ ЗАДЕРЖКИ*) в диапазоне частот от 20 до 200 кГц (10 частотных точек). Напомним, что показания фазометра надо взять со знаком «минус», так как ФЧХ имеют отрицательный наклон в области отрицательных значений фазы. Результаты измерений занесите в табл. 4.4.

3. Постройте графики зависимостей $\varphi_Л(f)$ и аппроксимируйте их прямыми линиями. Определите по углу наклона этих линий среднее время за-

держки для каждой линии по формуле $t_{зад} = \frac{|\Delta\varphi|}{\Delta f \cdot 360^0}$, где Δφ – приращение фазы при изменении частоты на Δ*f*.

Таблица 4.4

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

Содержание отчета

Отчет должен содержать:

- упрощенную схему измерения фазового сдвига методом преобразования во временной интервал;
- таблицы с результатами измерений и расчетов;
- графики по всем пунктам работы.

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 определятся 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. Нарисуйте схему и векторную диаграмму симметричного *RC* – фазовращателя, поясните его работу.

8. Сохраняется ли градуировка симметричного *RC* – фазовращателя при переходе на другую частоту?

9. Как определить по ФЧХ среднее время задержки?

10. От чего зависит фазовый сдвиг в линии задержки?