

МИНОБРНАУКИ РОССИИ

Федеральное государственное бюджетное образовательное
учреждение высшего образования
«Юго-Западный государственный университет»
(ЮЗГУ)

Кафедра космического приборостроения и систем связи

УТВЕРЖДАЮ



Директор по учебной работе
О.Г. Локтионова

О.Г. Локтионова 2016 г.

ИЗМЕРЕНИЕ ФАЗОВОГО СДВИГА

Методические указания к выполнению лабораторной работы
по дисциплине "Проектирование электронных измерительных
приборов и систем" для бакалавров направления подготовки
11.03.03 «Конструирование и технология электронных средств»

Курск 2016

УДК. 681.2

Составитель О.Г. Бондарь

Рецензент

Кандидат технических наук, профессор кафедры
информационные системы и технологии В.А. Шлыков.

Измерение фазового сдвига : методические указания по выполнению лабораторной работы по дисциплине «Проектирование электронных измерительных приборов и систем» / Юго-Зап. гос. ун-т; сост.: О.Г. Бондарь. Курск, 2016. 17 с.: Ил. 5. Табл. 4. Библиогр.: с.16.

Излагаются краткие сведения о измерении фазового сдвига, устройстве и принципе действия цифровых фазометров, характеристиках фазометров. Приведены задания и описан порядок выполнения лабораторной работы.

Методические указания соответствуют требованиям программы, утвержденной учебно-методическим объединением по специальностям автоматике и электроники (УМО АЭ).

Предназначены для бакалавров направления подготовки 11.03.03 «Конструирование и технология электронных средств».

Текст печатается в авторской редакции

Подписано в печать . Формат 60×84 1/16.
Усл. печ. л. 0,99. Уч.- изд. л. 0,89. Тираж экз. Заказ . Бесплатно.

Юго-Западный государственный университет.
305040, г. Курск, ул. 50 лет Октября, 94

Оглавление

1. Цель работы.....	4
2. Подготовка к работе	4
3. Лабораторный стенд.....	10
1. Электронный цифровой фазометр.....	11
2. Калибратор фазовых сдвигов	12
4. Порядок выполнения лабораторной работы.....	13
Задание 1. Измерение угла фазового сдвига на фиксированной частоте	14
Задание 2. Измерение угла фазового сдвига на различных частотах	14
5. Содержание отчета	15
6. Контрольные вопросы.....	15
Литература.....	16
ПРИЛОЖЕНИЕ.....	17

1. Цель работы

Получение навыков измерения угла фазового сдвига, знакомство с устройством и характеристиками цифрового фазометра.

2. Подготовка к работе

Перед выполнением работы повторите вопросы обработки и представления результата прямых и косвенных измерений и ознакомьтесь со следующими вопросами:

- Переменное электрическое напряжение и параметры, которые его характеризуют.
- Измерение угла фазового сдвига методами непосредственной оценки и сравнения с мерой.
- Причины возникновения и способы учета погрешностей при измерении угла фазового сдвига.
- Устройство, принцип действия и основные характеристики электронных (аналоговых и цифровых) фазометров.
- Содержание и способы реализации методов измерения, используемых при выполнении работы.
- Устройство и характеристики средств измерений, используемых при выполнении работы.

Фазой гармонического напряжения $U(t) = U_m \sin(\omega t + \varphi_0)$ называется аргумент функции $U(t)$, описывающей колебательный процесс. Фаза гармонического напряжения является линейной функцией времени. Угол сдвига фаз представляет собой модуль разности фаз двух гармонических сигналов $U_1(t)$ и $U_2(t)$ одинаковой частоты. Таким образом, если

$$U_1(t) = U_{1m} \sin(\omega t + \varphi_1),$$

$$U_2(t) = U_{2m} \sin(\omega t + \varphi_2),$$

то согласно определению угол сдвига фаз равен:

$$\Delta\varphi = |\varphi_1 - \varphi_2|.$$

Если φ_1 и φ_2 постоянны во времени, то $\Delta\varphi$ от времени не зависит. При $\Delta\varphi = 0$ гармонические напряжения называются синфазными, при $\Delta\varphi = \pm\pi$ - противофазными. Выбор метода измерения угла сдвига фаз зависит от диапазона частот, амплитуды сигнала и,

главным образом, от требуемой точности измерения. Измерение угла сдвига фаз может выполняться как методом непосредственной оценки, так и методом сравнения. Результат измерения выражается либо в градусах, либо в радианах. Измерительные приборы, специально предназначенные для измерения угла сдвига фаз, называются фазометрами. Угол сдвига фаз может быть измерен также с помощью осциллографа.

Измерение угла сдвига фаз методом непосредственной оценки может быть выполнено с помощью фазометров различных типов.

При измерении на низких частотах в промышленных цепях удобно использовать электромеханические фазометры на основе электродинамических и ферродинамических логометров. Однако они имеют сравнительно низкий класс точности от 0,5 до 2,5, и их показания заметно зависят от частоты.

Электронные аналоговые фазометры используют принцип преобразования фазового сдвига во временной интервал. Этот временной интервал формируется в приборе так, что его длительность оказывается пропорциональна значению измеряемого угла сдвига фаз. В течение этого временного интервала через магнитоэлектрический измерительный механизм (ИМ) прибора протекает постоянный ток фиксированного значения, в результате показания ИМ оказываются пропорциональными значению измеряемой величины. Электронные аналоговые фазометры позволяют измерять угол сдвига фаз в диапазоне частот от десятков герц до единиц мегагерц. Относительная погрешность таких фазометров составляет 1-2%, разрешающая способность - примерно 1° .

В лабораторных условиях в маломощных цепях для измерения угла сдвига фаз методом непосредственной оценки удобно использовать осциллограф. Такие измерения могут выполняться методом линейной развертки или методом эллипса (фигур Лиссажу). В первом случае на экране получают изображение двух кривых $U_1(t)$ и $U_2(t)$, взаимное расположение которых несет искомую информацию (рисунок 1), во втором случае на экране осциллографа наблюдается эллипс, форма которого определяется значением измеряемого угла сдвига фаз. Измерение угла сдвига фаз

с помощью осциллографа можно выполнять в широком диапазоне частот, но их точность невелика.

Осциллограф можно также использовать для выполнения измерений угла сдвига фаз методом компенсации. При равенстве фаз между исследуемыми напряжениями на экране осциллографа вместо эллипса будет наблюдаться отрезок прямой. Этот метод измерений заметно точнее, чем предыдущий. Диапазон рабочих частот в этом случае определяется главным образом частотными характеристиками фазовращателя.

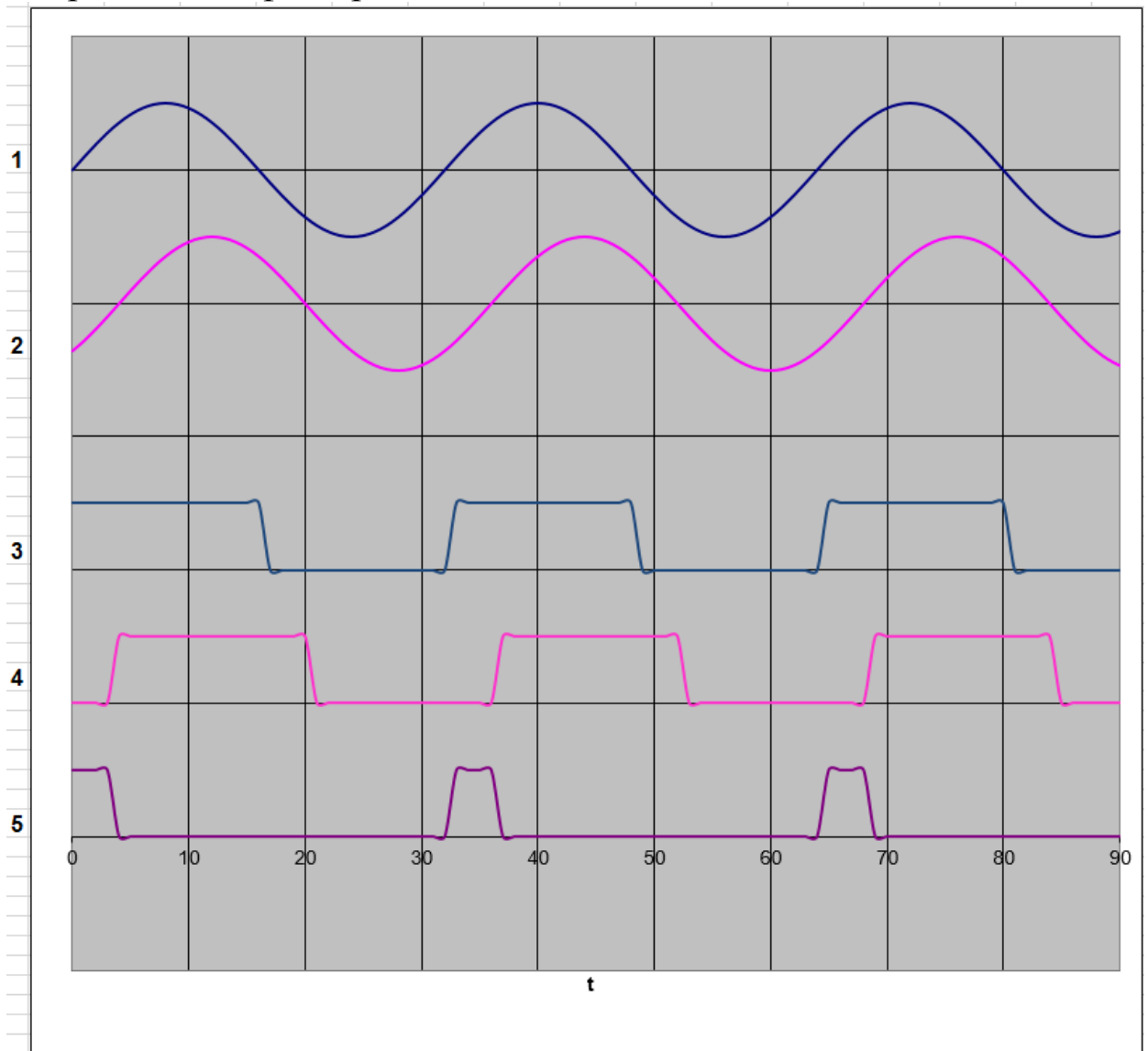


Рисунок 1 – Формирование временного интервала, пропорционального фазовому сдвигу в цифровом фазометре: 1, 2 – входные напряжения; 3,4 – сформированные прямоугольные импульсы; 5 – импульс с длительностью пропорциональной фазовому сдвигу.

В диапазоне частот от долей герца до десятков мегагерц наилучшие результаты по точности дает цифровой фазометр. Такие фазометры также рекомендуется применять в маломощных цепях, а также при искаженной форме напряжения.

В настоящей работе для измерения угла сдвига фаз используется именно цифровой фазометр, рассмотрим принцип его действия.

В основе работы цифровых фазометров всех систем лежит принцип преобразования измеряемого угла сдвига фаз во временной интервал, длительность которого пропорциональна значению измеряемой величины (рисунок 1). Длительность временного интервала определяется при этом методом дискретного счета непосредственно или с промежуточным преобразованием длительности временного интервала в пропорциональное ему значение величины напряжения постоянного тока.

Фазометры с непосредственным преобразованием значения длительности временного интервала в код, в свою очередь, подразделяются на две группы: с измерением за один период входных напряжений и с измерением за несколько периодов входных напряжений. Фазометры первой группы называются фазометрами мгновенного значения, а второй группы - фазометрами среднего значения. Фазометры среднего значения, называемые также фазометрами с постоянным временем измерения, благодаря хорошим характеристикам получили наибольшее распространение (рисунок 2).



Рисунок 2 – Структурная схема цифрового фазометра среднего значения

Входные синусоидальные напряжения U_1 и U_2 с помощью формирующих устройств преобразуются в периодические последовательности прямоугольных импульсов (рисунок 3). Эти импульсы, попадая на два входа устройства управления, формируют на его выходе последовательность прямоугольных импульсов длительностью $\Delta T = \Delta\varphi/2\pi \times T$ и с периодом следования T . Полученные прямоугольные импульсы подаются на вход 2 (управляющий) временного селектора I, а на его вход 1 (сигнальный) подается последовательность коротких импульсов с выхода генератора счетных импульсов, период следования которых равен $T_{сч}$. В результате на выходе временного селектора I формируется последовательность пачек счетных импульсов. При условии, что $\Delta T > T_{сч}$, число импульсов и в каждой пачке, без учета погрешностей, может быть подсчитано по формуле:

$$n = \Delta T / T_{сч} = (\Delta\varphi / 2\pi) \times (T / T_{сч}).$$

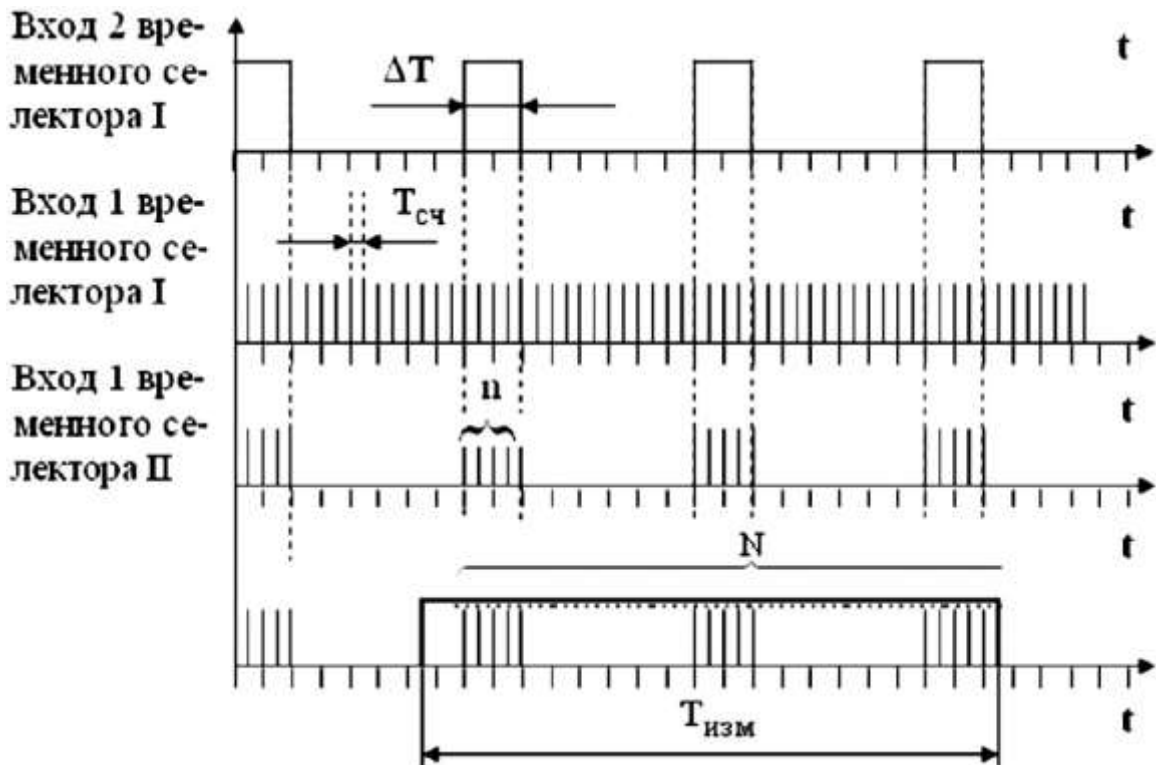


Рисунок 3 – Измерение среднего значения фазового сдвига

Эти пачки счетных импульсов подаются, в свою очередь, на вход 1 временного селектора II. На его вход 2 с выхода формирователя, в качестве которого работает делитель частоты, подается прямоугольный импульс длительностью. В результате, на выходе временного селектора II образуется конечная последовательность пачек счетных импульсов. Длительность одного цикла измерений $T_{\text{изм}}$ выбирается так, чтобы

$$T_{\text{изм}} \gg T_{\text{нижн}},$$

где $T_{\text{нижн}}$ - период самого низкочастотного напряжения, исследуемого фазометром. При выполнении этого условия общее количество счетных импульсов N , попавших на вход счетчика, можно определить по формуле:

$$N = n \times (T_{\text{изм}}/T) = (\Delta\varphi/2\pi) \times (T_{\text{изм}}/T_{\text{сч}}).$$

Погрешность в определении N по данному выражению тем меньше, чем больше число импульсов n в каждой пачке и чем сильнее неравенство $T_{\text{изм}} \gg T_{\text{нижн}}$.

Код числа N с выхода счетчика поступает на цифровой индикатор.

Если длительность одного цикла измерений выбрать в соответствии с выражением

$$T_{\text{изм}} = K T_{\text{сч}}/2,$$

где K - коэффициент деления частоты, то:

$$N = (\Delta\varphi/2\pi) \times (T_{\text{изм}}/T_{\text{сч}}) = (\Delta\varphi/2\pi) \times (K/2) = (K \times \Delta\varphi)/720^\circ.$$

Значение величины K выбирают, как правило, из условия $K = 720 \times 10^m$, где $m = 0, 1, 2$ и т. д.

В этом случае для значения угла сдвига фаз получаем:

$$\Delta\varphi = 10^{-m} N = q N,$$

где q - значение единицы младшего разряда цифрового отсчетного устройства фазометра.

При $m = 0$ имеем $q = 1^\circ$, при $m = 1$ - соответственно $q = 0,1^\circ$, при $m = 2$ - соответственно $q = 0,01^\circ$ и т. д.

Видно, что такой цифровой фазометр является прямопоказывающим, это одно из его достоинств. Важная особенность цифрового фазометра с усреднением состоит в том, что его погрешность дискретности имеет две составляющие: одна связана с ограниченным числом импульсов в каждой пачке, а другая - с ограниченным числом пачек, попадающих в интервал $T_{\text{изм}}$. С изменением частоты входных напряжений влияние этих двух составляющих погрешности дискретности изменяется в противоположных направлениях. С увеличением частоты количество импульсов в каждой пачке уменьшается, но количество подсчитанных пачек возрастает, с уменьшением частоты происходит противоположный процесс. Возрастание одной составляющей погрешности дискретности при уменьшении n лимитирует верхнюю границу частотного диапазона фазометра, а возрастание другой составляющей при уменьшении числа пачек - нижнюю границу. Можно показать, что для рассмотренных фазометров значение абсолютной погрешности измерений в диапазоне частот от 20 Гц до 1 МГц обычно составляет от $0,1^\circ$ до $0,5^\circ$ и быстро растет по мере уменьшения или роста частоты за указанные пределы.

3. Лабораторный стенд

Лабораторный стенд представляет собой LabVIEW компьютерную модель, располагающуюся на рабочем столе персонального компьютера. На стенде (рисунок 4) находятся модели цифрового фазометра (1) и калибратора фазового сдвига (2).

Схема включения приборов при выполнении измерений приведена на рисунке 5.



Рисунок 4 - Модель лабораторного стенда

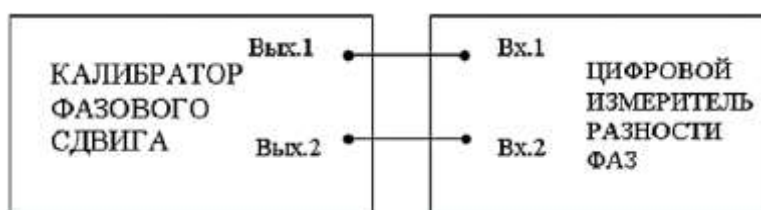


Рисунок 5 – Схема соединения калибратора и цифрового фазометра

1. Электронный цифровой фазометр

Модель цифрового фазометра используется при моделировании процесса измерения угла фазового сдвига между двумя синхронными гармоническими напряжениями с цифровым отображением информации.

Ниже приведены некоторые характеристики модели:

- диапазон измерения углов фазового сдвига составляет от 0° до 360° ;
- разрешающая способность индикатора $0,01^\circ$;
- основная погрешность измерения углов фазового сдвига при равных значениях входных напряжений непосредственно на

входах 1 и 2 фазометра не превышает приведенных ниже значений, указанных в таблице 2;

- диапазон рабочих частот от 0,5 Гц до 5 МГц;
- входные напряжения непосредственно на входах фазометра не должны превышать 2 В и быть не ниже 20 мВ.

Таблица 1. Значения погрешности цифрового фазометра

Частота F, Гц	$0,5 < F < 1$	$1 < F < 20$	$20 < F < 5 \times 10^6$
Погрешность, град.	$\pm 0,25/F$	$\pm(0,08 + 0,1/F)$	$\pm(0,1 + 10^{-7} \times F)$

На лицевой панели модели фазометра расположены:

- кнопка «СЕТЬ» включения прибора;
- индикатор цифрового отсчетного устройства с ценой деления младшего разряда 0,01 градуса;
- кнопка «Калибр.» включения режима калибровки фазометра;
- две коаксиальные розетки Вх.1 и Вх.2 - входы первого (опорного) и второго каналов фазометра.

2. Калибратор фазовых сдвигов

Модель калибратора используется для моделирования работы многозначной меры, воспроизводящей углы фазового сдвига между двумя синхронными гармоническими электрическими сигналами.

Характеристики модели:

- диапазон воспроизводимых углов фазового сдвига от 0° до $\pm 360^\circ$ с дискретностью 10° ;
- основная погрешность воспроизведения углов фазового сдвига не превышает значений, указанных в таблице 1;
- диапазон рабочих частот выходных напряжений от 5 Гц до 5 МГц с шагом 1-2-5 на декаду;
- относительная погрешность установки номинальных значений частоты не более 5×10^{-2} ;
- среднеквадратическое значение выходных напряжений на нагрузке не менее 500 Ом составляет $1 \pm 0,05$ В;

- ослабление выходных напряжений устанавливается отдельно по каждому каналу в пределах от 0 дБ до 60 дБ с дискретностью 10 дБ.

Таблица 2. Значения погрешности калибратора фазового сдвига

Частота F, Гц	$5 < F < 20$	$20 < F < 10^4$	$10^4 < F < 10^6$	$10^5 < F < 5 \times 10^6$
Осн. погреш., град.	± 0.1	$\pm 0,03$	$\pm 0,05$	± 0.1

На лицевой панели модели калибратора фазовых сдвигов расположены:

тумблер «Сеть» для включения прибора;

три кнопки «F» для установки частоты выходного сигнала;

три кнопки «φ» для установки угла фазового сдвига (из них (слева направо): первая - для установки знака фазового сдвига, вторая - для установки разряда сотен значения угла фазового сдвига, третья - для установки разряда десятков угла фазового сдвига);

два регулятора для установки выходного напряжения соответствующего канала Вых.1 и Вых.2;

две коаксиальные розетки Вых.1 и Вых.2 - выходы гармонического сигнала первого (опорного) и второго каналов калибратора;

трехразрядный цифровой индикатор частоты выходного сигнала;

трехразрядный цифровой индикатор угла фазового сдвига с ценой деления младшего разряда 1 градус.

4. Порядок выполнения лабораторной работы

1. Запустить программу лабораторной работы. На рабочем столе компьютера появится модель лабораторного стенда с моделями средств измерений и вспомогательных устройств.

2. Ознакомиться с расположением моделей устройств и их органов управления. Включить питание моделей устройств. Определить возможности изменения частоты амплитуды и фазового сдвига между сигналами калибратора.

3. Установить регуляторы выходных напряжений калибратора в среднее положение.

4. Установить значение угла фазового сдвига между сигналами калибратора равным 0° .

5. Откалибровать фазометр, удерживая кнопку «Калибр.» до появления нулевых показаний. После её отпускания фазометр автоматически переходит в режим измерений.

Задание 1. Измерение угла фазового сдвига на фиксированной частоте

Установить значение угла фазового сдвига на выходе калибратора равным 0° , а частоту выходных сигналов – 10 кГц.

1. Откалибровать фазометр повторно.
2. Снять показания фазометра и записать в отчёт. Записать сведения о классе точности фазометра.
3. Оставляя неизменным амплитуду и частоту сигнала на выходе калибратора, повторите измерения для фазовых сдвигов на выходе калибратора 10, 30, 60, 90, 120, 150 и 180° .
4. Повторить измерения в соответствии с п.3 на для частоты 0,5 Гц и 5 МГц.

Задание 2. Измерение угла фазового сдвига на различных частотах

1. Установить значение угла фазового сдвига на выходе калибратора равным 10° , а значение частоты выходных сигналов 0,5 Гц.
2. Откалибровать фазометр.
3. Снять и записать в отчёт показания фазометра.
4. Оставляя неизменными амплитуду и фазовый сдвиг, повторить измерения на частотах 50 Гц, 500 Гц, 5 кГц, 50 кГц, 0,5 МГц, 5 МГц.
5. Повторить измерения для разности фаз 60° или 90° .
6. Сохранить результаты измерений.
7. Закрыть приложение LabView.

5. Содержание отчета

Отчет должен содержать:

- Титульный лист.
- Оглавление.
- Сведения о цели и порядке выполнения работы.
- Сведения об использованных методах измерений.
- Сведения о характеристиках использованных средств измерений.
- Необходимые электрические схемы.
- Экспериментальные данные, включая рекомендации по числу значащих цифр, фиксируемых в протоколе и рекомендации о пределах измерений и показаниях отсчетного устройства, при которых необходимо установить (проконтролировать) погрешность цифрового вольтметра.
- Полностью заполненные таблицы отчета (см. приложение), а также примеры расчетов, выполнявшихся при заполнении таблиц.
- Графики зависимости абсолютной и относительной погрешностей фазометра, с выделенными на них полосами допустимых погрешностей.

6. Контрольные вопросы

1. Требуется измерить угол фазового сдвига между двумя гармоническими электрическими сигналами, ориентировочно равный 1 (10, 30, 90, 175) градусам, с погрешностью, не превышающей 2°. Как это лучше сделать, если частота сигналов равна 1 Гц (100 Гц, 100 кГц, 10 МГц, 1 ГГц)?
2. В каком случае гармонические напряжения называют противофазными?
3. Какие преобразования претерпевает измеряемая величина в аналоговых электронных фазометрах?
4. В каком диапазоне частот работают аналоговые электронные фазометры?

5. Какие фазометры обеспечивают наивысшую точность в диапазоне частот от нескольких герц до десятков мегагерц?
6. За счет чего при использовании цифровых фазометров удается обеспечить высокую точность измерений как в области высоких, так и в области низких частот?
7. Чем отличаются друг от друга цифровой фазометр с усреднением и без усреднения? Когда они используются?

Литература

1. Ратхор Т. С. Цифровые измерения. Методы и схемотехника [Текст] : / Т.С. Ратхор. - М.: Техносфера, 2004. - 376 с.
2. Метрология и электрические измерения [Электронный ресурс] : учебное пособие / Е.Д. Шабалдин, Г.К. Смолин, В.И. Уткин, А.П. Зарубин; под ред. Е.Д. Шабалдина. - Екатеринбург: Изд-во ГОУ ВПО "Рос. гос. проф.-пед. ун-т", 2006. - 282 с.
3. Клаассен К. Основы измерений. Датчики и электронные приборы [Текст] : Учебное пособие / К. Клаассен – 3-е изд. – Долгопрудный: Издательский Дом «Интеллект», 2008. -352 с.

ПРИЛОЖЕНИЕ

Таблица 1. Результаты измерений угла фазового сдвига с помощью цифрового фазометра (частота сигналов 10 кГц)

Фазовый сдвиг на выходе калибратора, град.	Показания фазометра, град.	Абсолютная погрешность фазометра, град.		Относительная погрешность фазометра, %		Результат измерений, град.
		расчет	эксперимент	расчет	эксперимент	

Таблица 2. Результаты измерений угла фазового сдвига градусов на различных частотах с помощью цифрового фазометра

Частота сигнала на выходе калибратора, град.	Показания фазометра, град.	Абсолютная погрешность фазометра, град.		Относительная погрешность фазометра, %		Результат измерений
		расчет	эксперимент	расчет	эксперимент	