

ИССЛЕДОВАНИЕ ВОЛЬТМЕТРОВ ПЕРЕМЕННОГО НАПРЯЖЕНИЯ

Цель работы

1. Изучить принцип действия, устройство и основные метрологические характеристики электронных вольтметров с преобразователями амплитудного (пикового), среднеквадратического и средневыпрямленного значений напряжения.
2. Изучить особенности измерения напряжения сигналов различной формы.
3. Получить практические навыки работы с измерительными приборами.

Исследуемые приборы

Вольтметр переменного напряжения типа В7-15 (или ВУ-15) с амплитудным (пиковым) детектором.

Вольтметр переменного напряжения типа В7-27/А/1 (или В7-16) с преобразователем средневыпрямленного значения.

Вольтметр среднеквадратического значения (измеритель нелинейных искажений типа С6-11 в режиме измерения напряжения).

Вспомогательные приборы и принадлежности

Генератор измерительных сигналов (синусоидальной формы) низкочастотный ГЗ-109.

Генератор измерительных сигналов (синусоидальной формы) высокочастотный Г4-158.

Генератор прямоугольных импульсов с изменяемым коэффициентом заполнения (вспомогательный генератор).

Электронно-лучевой осциллограф С1-67.

Эталонный резистор с номиналом $(1,00 \pm 0,05)$ МОм.

Лабораторное задание

1. Исследовать влияние формы сигнала на показания электронных вольтметров с различными типами преобразователей.

2. Оценить входное сопротивление вольтметра В7-27/А/1 (или В7-16) и его влияние на погрешность измерения напряжения.

3. Исследовать влияние параметров входной цепи вольтметра и соединительных проводов на частотный диапазон измерения напряжения с использованием одного из исследуемых вольтметров – самого широкополосного В7-15 (или ВУ-15).

Указание. Количественные характеристики (параметры) переменного периодического напряжения $u(t)$ описываются следующими функционалами:

1. Среднее значение (постоянная составляющая) напряжения

$$U_{\text{ср}} = \frac{1}{T} \int_0^T u(t) dt, \quad (3.1)$$

где T - интервал интегрирования. Численное значение T в вольтметрах имеет порядок $(0,2, \dots, 1)$ с. При расчетах среднего значения и других характеристик периодического сигнала в качестве интервала T удобно взять период сигнала.

2. Максимальное и минимальное значения напряжения

$$U_{\text{макс}} = \max\{u(t)\}, \quad U_{\text{мин}} = \min\{u(t)\}$$

Размах $U_{\text{р}} = U_{\text{макс}} - U_{\text{мин}}$.

(3.2)

Пиковое отклонение «вверх» напряжения

$$U_{\text{вв}} = U_{\text{макс}} - U_{\text{ср}}. \quad (3.3)$$

Пиковое отклонение «вниз» напряжения

$$U_{\text{вн}} = |U_{\text{ср}} - U_{\text{мин}}|. \quad (3.4)$$

3. Среднеквадратическое (действующее) значение напряжения

$$U_{\text{ск}} = \sqrt{\frac{1}{T} \int_0^T u^2(t) dt}. \quad (3.5)$$

4. Средневыпрямленное значение напряжения

$$U_{\text{св}} = \frac{1}{T} \int_0^T |u(t)| dt. \quad (3.6)$$

В электронных вольтметрах переменного напряжения используют три типа преобразователей:

- преобразователь амплитудного (пикового) значения, выходное напряжение которого пропорционально максимальному значению напряжения измеряемого сигнала U_m (пиковому отклонению напряжения «вверх», если анод диода подключен к входу преобразователя или пиковому отклонению напряжения «вниз» - при обратном подключении диода);

- преобразователь среднеквадратического значения (на основе термоэлектрических, диодных, транзисторных или оптронных преобразователей), выходное напряжение которого пропорционально среднеквадратическому (действующему) значению измеренного напряжения $U_{ск}$;

- преобразователь средневыпрямленного значения, выходное напряжение которого пропорционально среднему значению выпрямленного напряжения $U_{св}$ (среднему значению модуля напряжения).

Если у вольтметра закрытый вход, т.е. постоянная составляющая $U_{ср}$ измеряемого напряжения не проходит на преобразователь, то его показания определяются только переменной составляющей сигнала.

Шкалы электронных вольтметров переменного тока (кроме импульсных) градуируют в среднеквадратических значениях напряжения сигнала синусоидальной формы. Импульсные вольтметры градуируют в амплитудных значениях синусоидального сигнала.

С учетом указанных особенностей показания вольтметров $U_{шк}$ определяются формулами, приведенными в табл. 3.1.

Среднеквадратическое $U_{ск}$, (пиковое отклонение «вверх») U_m и средневыпрямленное значения $U_{св}$ связаны между собой так называемыми коэффициентами амплитуды K_A и формы K_F следующим образом:

$$U_m = K_A \cdot U_{ск}; \quad U_{ск} = K_F \cdot U_{св}; \quad U_m = K_A \cdot K_F \cdot U_{св}.$$

Зная результат измерений, то есть значение функционала (табл. 3.1) для используемого типа преобразователя вольтметра, можно найти неизвестные

параметры измеряемого напряжения. Но для этого надо правильно - в соответствии с видом функции $u(t)$, описывающей измеряемый сигнал, выбрать значения коэффициентов K_A и K_F . Численные значения этих коэффициентов можно вывести с использованием формул (3.2), (3.5) и (3.6).

Таблица 3.1

Тип вольтметра	Показания вольтметра	
	открытый вход	закрытый вход
Вольтметр постоянного напряжения	$U_{\text{шк}} = U_{\text{ср}} = \int_0^T u(t) dt$	-----
Вольтметр с преобразователем среднеквадратического значения	$U_{\text{шк}} = \sqrt{\frac{1}{T} \int_0^T u^2(t) dt}$	$U_{\text{шк}} = \sqrt{\frac{1}{T} \int_0^T (u(t) - U_{\text{ср}})^2 dt}$
Вольтметр с преобразователем среднев्यпрямленного значения	$U_{\text{шк}} = \frac{1,11}{T} \int_0^T u(t) dt$	$U_{\text{шк}} = \frac{1,11}{T} \int_0^T u(t) - U_{\text{ср}} dt$
Вольтметр с пиковым (амплитудным) детектором	$U_{\text{шк}} = \max\{u(t)\}$ импульсный вольтметр - исключение из общего правила градуировки	$U_{\text{шк}} = 0,707 \max\{u(t) - U_{\text{ср}}\}$ такой вольтметр иногда некорректно называют амплитудным вольтметром

Порядок выполнения работы и методические указания

1. Ознакомление с характеристиками исследуемых вольтметров и принципами их работы (домашняя подготовка к работе)

1.1. Изучить по литературе [1,2] и конспекту лекций теоретический материал, относящийся к данной работе. Изучить описание данной работы и заготовить в рабочей тетради формы табл. 3.1-3.6 с их заголовками.

1.2. Ознакомиться по [3, 4] с метрологическими характеристиками исследуемых вольтметров. Заполнить табл. 3.2.

1.3. Сопоставить эти характеристики. **Сделать выводы об области применения исследуемых вольтметров** с точки зрения:

- формы измеряемого сигнала,
- диапазона измеряемых значений напряжений,
- диапазона рабочих частот,
- нормируемой погрешности,
- входного сопротивления и входной емкости.

Таблица 3.2

Основные метрологические характеристики вольтметров

Характеристика	Вольтметр универсальный аналоговый Тип В7-15 (ВУ-15)	Вольтметр универсальный цифровой Тип В7-27/А	Измеритель нелинейных искажений Тип С6-11
Тип преобразователя			
Пределы измерения, В			
Диапазон частот, Гц			
Основная нормируемая погрешность, %			
Входное сопротивление, Ом			
Входная емкость, пФ			

1.4. Для самопроверки готовности к выполнению работы сформулировать ответы на следующие вопросы, которые могут быть заданы при допуске и в процессе защиты работы:

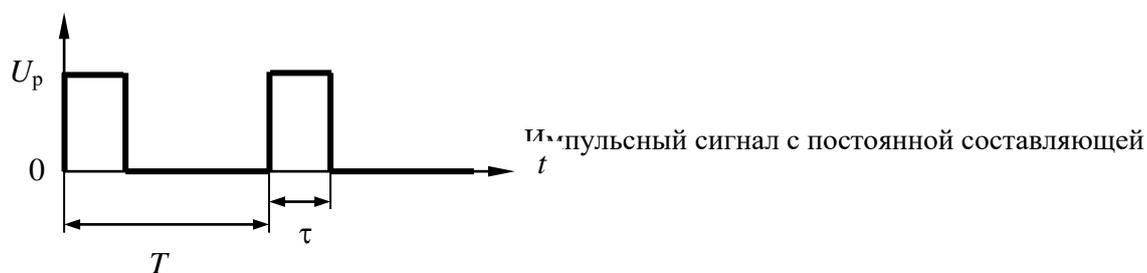
1. Количественные характеристики переменного напряжения.
2. Типовые структурные схемы электронных вольтметров.
3. Какая из этих схем обеспечивает высокую чувствительность вольтметра, а какая – широкий частотный диапазон?
4. Основные типы преобразователей переменного напряжения, применяемые в электронных вольтметрах; их схемы, формулы, описывающие их принцип действия.
5. Правила и процедура градуировки электронных вольтметров переменного напряжения.
6. Зачем нужны вольтметры с различными типами входов - открытым и закрытым?
7. Каким образом обеспечивают «закрытый» вход вольтметра?

8. Формулы, определяющие показания электронных вольтметров.

9. Схема и временные диаграммы сигналов, поясняющие работу пикового преобразователя с закрытым и открытым входами.

10. Источники погрешностей электронных вольтметров.

1.5. По аналогии с приведенным ниже графиком нарисовать в одинаковом масштабе временные диаграммы импульсных сигналов прямоугольной формы без постоянной составляющей при значениях коэффициента заполнения $K_3 = 0,25, 0,5$ и $0,75$. Обратите внимание, что размах импульсного сигнала не изменяется при исключении постоянной составляющей.



1.6. Записать в табл. 3.3 расчетные значения показаний вольтметров с закрытым входом при измерении:

- синусоидального сигнала,
- импульсных сигналов прямоугольной формы без постоянной составляющей с различным коэффициентом заполнения K_3 .

Необходимые для расчета формулы приведены в табл. 3.1. Размах сигналов принять равным $U_p = 4$ В.

Таблица 3.3

Результаты расчета значений параметров сигналов различной формы и показаний вольтметров

Расчет показаний $U_{\text{шк}}$ вольтметров при измерении напряжения				
Тип преобразователя	импульсного сигнала прямоугольной формы без постоянной составляющей с размахом $U_p = 4$ В при $K_3 =$			синусоидального сигнала с размахом $U_p = 4$ В
	0,25	0,5	0,75	
Амплитудн.				
Ср.выпрямл.				
Ср.квadrat.				

1.7. Показать преподавателю результаты выполнения домашнего задания - заполненные табл. 3.1 и 3.2 и получить допуск к работе.

2. Исследование влияния формы измеряемого напряжения на показания электронных вольтметров

2.1. Включить питание исследуемых вольтметров и вспомогательных приборов, ознакомиться с краткими техническими описаниями и органами управления исследуемых вольтметров. После 15-минутного прогрева проверить установку «0» и калибровку исследуемых вольтметров.

Подключить осциллограф к выходу генератора сигналов синусоидальной формы (рис. 3.1.).

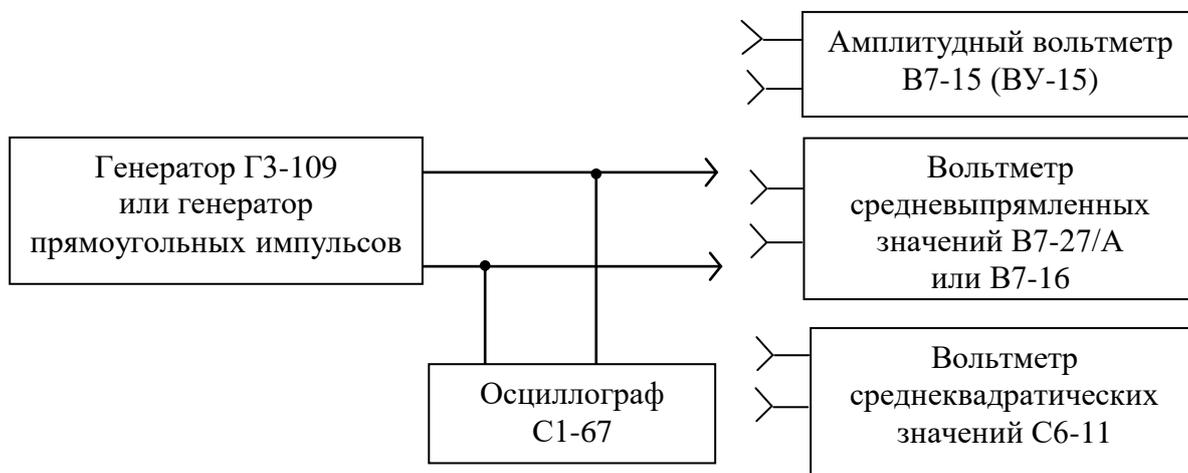


Рис. 3.1. Схема измерения напряжения сигналов различной формы

2.2. Установить частоту сигнала генератора 1 кГц. Переключить регулятор входного делителя осциллографа **Вольт/дел** в положение **1В/дел**, установить ручку **Усиление** в крайнее правое положение, получить на экране осциллографа изображение измеряемого сигнала в пределах 2 - 4 его

периодов и с помощью соответствующей регулировки генератора установить размах синусоидального сигнала, равным 4 В. **В дальнейшем при выполнении п. 2 положение регуляторов не изменять.**

2.3. Поочередно подключая исследуемые вольтметры к выходу генератора, записать их показания в соответствующий столбец табл. 3.4.

2.4. Сравнить эти показания. Должны ли эти показания различаться для вольтметров с различными типами преобразователей или они должны быть приблизительно одинаковыми (в пределах погрешностей вольтметров)?

Сделать соответствующий вывод на основе правила градуировки вольтметров переменных напряжений.

2.5 Подать на вход осциллографа с выхода вспомогательного генератора импульсный сигнал прямоугольной формы положительной полярности с переключаемым коэффициентом заполнения (частота следования этих импульсов порядка 1 кГц). Убедиться, что коэффициенты заполнения этого сигнала соответствуют значениям, указанным на переключателе вспомогательного генератора. С помощью соответствующей регулировки генератора установить размах импульсного сигнала, равным 4 В.

2.6. Используя переключатель осциллографа **Открытый вход/закрытый вход**, разобраться, что происходит с импульсными сигналами положительной полярности с различными значениями коэффициента заполнения после их прохождения через RC-цепочку, обеспечивающую закрытый вход. Сопоставить эти осциллограммы с временными диаграммами, нарисованными по п. 1.5.

2.7. Измерить тремя исследуемыми вольтметрами (имеющими закрытый вход) напряжение импульсного сигнала при коэффициентах заполнения $K_3=0,25;0,5;0,75$ и записать показания в соответствующие столбцы табл.3.4.

Таблица 3.4

Результаты измерений напряжения сигналов различной формы

Вольтметр (тип преобразователя)	Показания вольтметров при измерении напряжения сигнала			Расчет размаха импульсов по результатам измерений			Расчет размаха синусоида льного сигнала	
	синус.	импульсного при $K_3 =$			при $K_3 =$			
		0,25	0,5	0,75	0,25	0,5		0,75
В7-15 (ВУ-15) с амплитудным преобразователем								
В7-27/А (В7-16) с преобразователем средневыпрямленного значения								
С6-11 с преобразователем среднеквадратического значения								

2.8. Построить по данным табл. 3.4 графики зависимости показаний исследуемых вольтметров от значений коэффициента заполнения при измерении напряжений импульсных сигналов прямоугольной формы. Продолжить (пунктиром) эти зависимости в область малых и больших значений коэффициента заполнения. Объяснить, используя осциллограммы, полученные при выполнении п. 2.6, различия в характере этих зависимостей для вольтметров с различными типами преобразователей.

2.9. По показаниям вольтметров рассчитать значения размаха измеряемых сигналов и записать полученные результаты в табл. 3.4. (должны ли эти значения различаться?).

3. Определение методической погрешности, обусловленной влиянием входного сопротивления вольтметра

Указание. Относительная методическая погрешность измерения напряжения на достаточно низких частотах (на которых можно не учитывать влияния входной емкости)

$$\delta_{\text{мет}} = -\frac{R_{\text{ВЫХ}}}{R_{\text{ВХ}} + R_{\text{ВЫХ}}}. \quad (3.7)$$

При $R_{\text{ВХ}} \gg R_{\text{ВЫХ}}$, $\delta_{\text{мет}} \approx -R_{\text{ВЫХ}}/R_{\text{ВХ}}$, где $R_{\text{ВЫХ}}$ - выходное сопротивление источника измеряемого напряжения; $R_{\text{ВХ}}$ - входное сопротивление вольтметра.

$R_{\text{ВХ}}$ можно найти путем косвенных измерений (рис. 3.2) с помощью вспомогательного эталонного резистора с сопротивлением R_0 :

$$R_{\text{ВХ}} = \frac{U_2}{U_1 - U_2} R_0 - R_{\text{ВЫХ}}. \quad (3.8)$$

3.1. Используя генератор ГЗ-109, цифровой вольтметр В7-27 и вспомогательный резистор R_0 , собрать схему измерения (рис. 3.2).

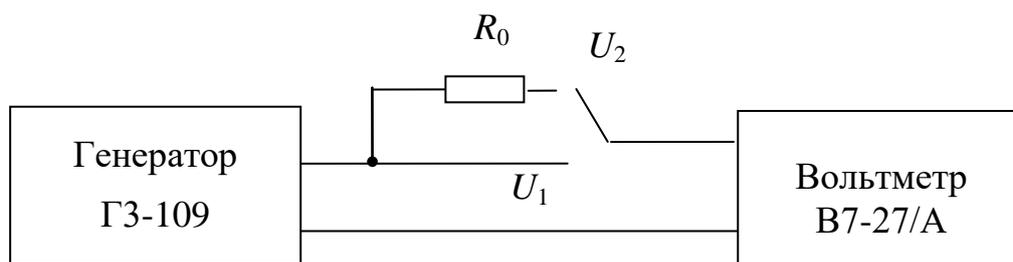


Рис. 3.2. Схема измерения входного сопротивления вольтметра

3.2. Установить переключатель выходного сопротивления генератора ГЗ-109 в положение $R_{\text{ВЫХ}} = 600 \text{ Ом}$. Установить частоту генератора в пределах 50-100 Гц. Установить по вольтметру В7-27/А напряжение генератора U_1 в пределах 5-10 В, измерить этим же вольтметром В7-27/А напряжение U_2 , записать показания в табл. 3.5.

3.3. Вычислить входное сопротивление вольтметра и соответствующую методическую погрешность $\delta_{\text{мет}}$ измерения напряжения по (3.8) и (3.7). Сравнить полученные оценки с нормируемыми значениями входного сопротивления и основной погрешности цифрового вольтметра В7-27.

Таблица 3.5

Оценка входного сопротивления вольтметра
и соответствующей методической погрешности измерения напряжения

$R_0, \text{МОм}$	$R_{\text{ВЫХ}}, \text{Ом}$	$U_1, \text{В}$	$U_2, \text{В}$	$R_{\text{ВХ}}, \text{МОм}$	$\delta_{\text{мет}}, \%$
	600				

4. Исследование влияния параметров соединительных проводов и входной цепи вольтметра на его показания в области высоких частот

Указание. Важнейшей характеристикой вольтметра является частотный диапазон. Однако на результат измерения напряжения будут влиять и характеристики цепи, используемой для подключения вольтметра к источнику сигнала. Эквивалентная схема цепи (рис. 3.3 а), образованной проводами, соединяющими электронный вольтметр с источником измеряемого напряжения, в области низких частот (когда влиянием индуктивности соединительных проводов можно пренебречь). Схема представляет собой интегрирующую цепочку, образованную выходным сопротивлением источника сигнала

$R_{\text{ВВХ}}$, входной емкостью прибора $C_{\text{ВХ}}$ и емкостью соединительных проводов $C_{\text{П}}$. Систематическая погрешность измерения напряжения, вносимая такой цепью, будет иметь отрицательный знак и будет тем больше по абсолютной величине, чем выше частота сигнала и больше постоянная времени $R_{\text{ВВХ}}(C_{\text{ВХ}}+C_{\text{П}})$ такой цепи.

Если учесть распределенную индуктивность соединительных проводов $L_{\text{П}}$, то схема превращается в электрический контур (рис. 3.3 б), резонансная частота которого приближенно может быть оценена по известной формуле:

$$f_{\text{рез}} = \frac{1}{2\pi\sqrt{L_{\text{П}}(C_{\text{П}} + C_{\text{ВХ}})}}.$$

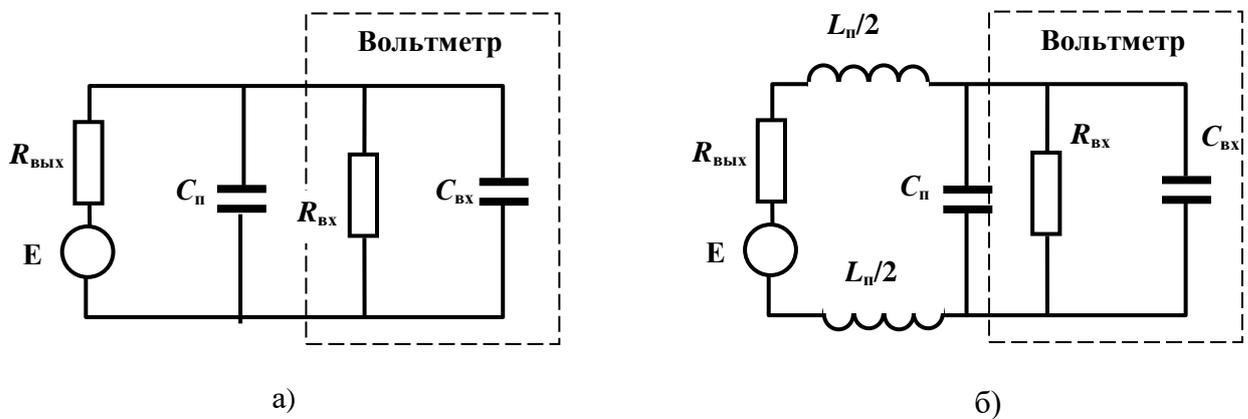


Рис. 3.3

Таким образом, на высоких частотах, когда частота измеряемого напряжения приближается к резонансной частоте входной цепи, напряжение на входных зажимах вольтметра повышается и становится больше измеряемого напряжения. Соответствующая методическая погрешность измерения может стать положительной и по абсолютной величине достигнуть значений порядка 150 - 300 % !!! Значение относительной погрешности, возникающей вследствие явления резонанса во входной цепи

$$\delta(f) = \frac{U(f) - U(0,1)}{U(0,1)} \cdot 100\% ,$$

где $U(f)$ - показания вольтметра при измерении напряжения сигнала с частотой f ; $U(0,1)$ - показания вольтметра при измерении напряжения сигнала с частотой 0,1 МГц, на которой можно не учитывать влияние параметров соединительных проводов на результаты измерений.

Для повышения верхней границы частотного диапазона измеряемого напряжения соединительные провода должны быть как можно короче. Высокочастотные вольтметры,

предназначенные для работы в диапазоне 1 - 1000МГц, строятся по структурной схеме, начинающейся с преобразователя (обычно пикового детектора), который выполняется в виде выносного узла (пробника). С помощью пробника вольтметр можно присоединить к измеряемой цепи непосредственно, практически без соединительных проводов. Длина соединительных проводов будет определяться при этом длиной общего провода (земли), которую можно выбрать достаточно малой.

Примечание. Обратите внимание, что при использовании соединительных проводов измеряемый сигнал все равно попадает на пробник, так как в исходном положении (пробник находится в гнезде), его входной штырек соединен с входным зажимом на лицевой панели вольтметра.

4.1. Соединить вход вольтметра В7-15 (с амплитудным детектором) с выходом генератора Г4-158 проводами или соединительным кабелем.

4.2. Определить резонансную частоту цепи, образованной соединительными проводами, для чего перестраивать генератор по частоте (нажата кнопка ГРУБО), начиная с частоты 0,1 МГц.

4.3. Путем перестройки частоты генератора во всем диапазоне его рабочих частот и регистрации показаний вольтметра в табл. 3.6, измерить амплитудно-частотную характеристику цепи, образованной соединительными проводами.

Примечание. При подходе к резонансной частоте целесообразно уменьшать частотные интервалы между точками наблюдений.

4.4. Вынуть пробник из гнезда и подключить контактный штырек пробника непосредственно к выходу генератора; корпуса вольтметра и генератора соединить между собой коротким отрезком провода. Повторить измерения по п.3.3, результаты записать в табл. 3.6.

Таблица 3.6

Результаты измерения и вычисления погрешностей, возникающих вследствие явления резонанса во входной цепи вольтметра

Частота, МГц	Подключение проводами		Подключение пробником	
	$U_1, В$	δ_1	$U_2, В$	δ_2
0,1				

4.5. Вычислить погрешности измерения δ_1 и δ_2 относительно значения напряжения на частоте 0,1 МГц:

$$\delta_1 = \frac{U_1 - U_{0,1}}{U_{0,1}}, \quad \delta_2 = \frac{U_2 - U_{0,1}}{U_{0,1}},$$

где U_1 и U_2 - соответственно показания вольтметра при использовании соединительных проводов и непосредственно пробника.

4.6. Построить графики зависимостей погрешностей δ_1 и δ_2 от частоты и **определить частоту измеряемого напряжения, выше которой недопустимо подключать вольтметр к измеряемой цепи соединительными проводами.**

Указание. Частота измеряемого напряжения, выше которой недопустимо подключать вольтметр соединительными проводами, определяется как частота, выше которой $\delta_1 > \delta_2$.

Отчет должен содержать:

- 1) номер и наименование лабораторной работы;
- 2) заполненные табл. 3.1-3.6 с их заголовками;
- 3) временные диаграммы импульсного сигнала по п. 1.5.
- 4) графики по пп. 2.8, 4.6;
- 5) выводы по пп. 2,4, 2.9, 3.3, 4.6.