

III. Электрические и радиоизмерения

УДК 621.317.326

**ИССЛЕДОВАНИЕ ХАРАКТЕРИСТИК
МИКРОСЕКУНДНОГО ИЗМЕРИТЕЛЯ
МГНОВЕННЫХ ЗНАЧЕНИЙ
ИМПУЛЬСНОГО ЭЛЕКТРИЧЕСКОГО НАПРЯЖЕНИЯ****М.А. Зенченко, В.В. Макаров, А.В. Клеопин, Л.Н. Селин***ФГУП «ВНИИФТРИ», Менделеево, Московская обл., Россия,
zenchenko@vniiftri.ru*

Аннотация. Разработан макет микросекундного измерителя, реализующий компенсационный метод измерений мгновенных значений импульсного электрического напряжения. Приведены результаты измерений, проведённых с помощью макета микросекундного измерителя. Проведена оценка точности измерений разработанного макета с помощью вышестоящих эталонов.

Ключевые слова: импульсное электрическое напряжение, компенсационный метод, межканальная погрешность.

**INVESTIGATION OF CHARACTERISTICS
OF A MICROSECOND METER OF INSTANT VALUES
OF PULSED ELECTRIC VOLTAGE****M.A. Zenchenko, V.V. Makarov, A.V. Kleopin, L.N. Selin***FSUE «VNIIFTRI», Mendeleevo, Moscow region, Russia,
zenchenko@vniiftri.ru*

Abstract. The prototype of an installation for measuring microsecond pulsed electrical signals' instantaneous values, which implements the balancing method, is developed. The results of measurements by the installation prototype are presented. The accuracy of the prototype is estimated by higher-level standards.

Keywords: pulsed electrical signals, balancing method, inter-channel bias error.

Введение

В состав Государственного первичного эталона единицы импульсного электрического напряжения ГЭТ 182-2010 входит установка измерительная РК2-01А, которая применяется для измерений мгновенных значений импульсного электрического напряжения в микросекундном диапазоне. Существует необходимость в её замене для возможности проведения автоматизированных измерений, одномоментного получения нескольких значений. В качестве замены планируется использовать микросекундный измеритель — измерительную систему, состоящую из цифрового осциллографа и калибратора

напряжения постоянного тока. Для оценки достижимых метрологических характеристик разработан и исследован макет микросекундного измерителя, принцип работы и состав которого описаны ниже. Представлены результаты измерений, полученные при исследовании характеристик макета с помощью вышестоящих эталонов.

Принцип работы

Пределы погрешности измерений мгновенных значений напряжения импульсных сигналов при использовании установки измерительной РК2-01А составляют $\pm(3 \cdot 10^{-4}U + 1 \text{ мВ})$, где U — измеренное значение напряжения, В (при скорости изменения измеряемого напряжения, не превышающей 10 В/мкс). Принцип действия РК2-01А основан на компенсационном методе. На одну отклоняющую пластину электронно-лучевой трубки (далее — ЭЛТ) подаётся исследуемое напряжение, а на другую — напряжение, вырабатываемое внутренним прецизионным источником, которое изменяется до равенства измеряемому напряжению, что определяется по положению луча на экране ЭЛТ.

Предложен способ измерений мгновенных значений импульсного напряжения с помощью цифрового осциллографа, основанный на компенсационном методе [1]. Данный способ предполагает использование калибратора осциллографов Fluke 9500В в качестве прецизионного источника напряжения, пределы погрешности воспроизведения напряжения которого составляют $\pm(2,5 \cdot 10^{-4}U + 25 \text{ мкВ})$, где U — установленное значение напряжения, В. Исследуемый сигнал подаётся на вход 1-го канала осциллографа, а постоянное напряжение, воспроизводимое калибратором, — на вход 2-го канала осциллографа. Так как современные цифровые осциллографы позволяют измерять множество параметров исследуемого сигнала, имеется возможность измерений разности амплитуд и мгновенных значений напряжения сигналов, поданных на входы разных каналов. Полученное значение разности и измеренный уровень постоянного напряжения на выходе калибратора используются впоследствии для определения мгновенных значений напряжения.

Алгоритм измерений

Алгоритм измерений мгновенных значений напряжения с помощью макета микросекундного измерителя:

- 1) на вход 1-го канала осциллографа подаётся исследуемый сигнал; измеряются мгновенные значения напряжения исследуемого сигнала $u(t)$ в моменты времени, разделённые равными интервалами: t_0 , $t_0 + \Delta t$, $t_0 + 2\Delta t$ и т.д.;

2) ко входу 2-го канала осциллографа подключается формирователь калибратора 9500В, устанавливается режим воспроизведения постоянного напряжения $U_{9500В}$, уровень которого задаётся равным среднему значению измеренных мгновенных значений напряжения исследуемого сигнала. Измеряются мгновенные значения напряжения $u_{9500В}(t)$ в моменты времени $t_0, t_0 + \Delta t$ и т.д.;

3) рассчитываются поправки $\Delta u(t)$ по формуле:

$$\Delta u(t) = U_{9500В} - u_{9500В}(t); \quad (1)$$

4) производится учёт поправок:

$$u'(t) = u(t) + \Delta u(t), \quad (2)$$

где $u'(t)$ — действительные значения мгновенных значений напряжения исследуемого сигнала;

5) вносится поправка Δu_k , устраняющая погрешность, вызванную неидентичностью 1-го и 2-го каналов осциллографа из состава макета:

$$\Delta u_k = u_2 - u_1, \quad (3)$$

где u_1 и u_2 — средние значения напряжения постоянного тока, измеренные 1-м и 2-м каналами осциллографа соответственно при предварительной калибровке.

Тогда с учётом всех поправок:

$$u'(t) = u(t) + \Delta u(t) + \Delta u_k. \quad (4)$$

При вычислениях могут использоваться средние значения напряжения вместо мгновенных значений $u(t)$ и $u_{9500В}(t)$, а также усреднённые на интервале Δt значения.

В соответствии с уравнением (4) определяется предельное абсолютное значение относительной погрешности измерений $\delta(u'(t))$:

$$\begin{aligned} \delta(u'(t)) = & [\Delta u_k / u'(t)] \cdot \delta(\Delta u_k) + [u(t) / u'(t)] \cdot \delta[u(t)] + \\ & + [u_{9500В}(t) / u'(t)] \cdot \delta[u_{9500В}(t)], \end{aligned} \quad (5)$$

где $\delta(\Delta u_k)$ — предельное абсолютное значение относительной погрешности, обусловленной неидентичностью трактов вертикального отклонения каналов осциллографа; $\delta[u(t)]$, $\delta[u_{9500В}(t)]$ — предельные абсолютные значения относительных погрешностей, обусловленных неидеальным совмещением индицируемых на экране осциллографа исследуемого сигнала и воспроизводимого калибратором постоянного напряжения.

Описание макета

Основными частями макета являются осциллограф цифровой Keysight EXR054A и калибратор Fluke 9500B. Внешний вид макета представлен на рис. 1.

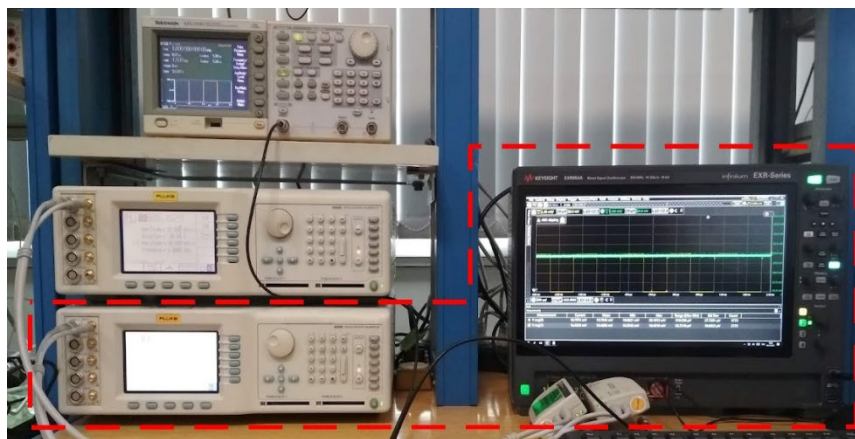


Рис. 1. Внешний вид макета (в состав макета входят только приборы, обведённые красным пунктиром)

Исследуемый импульсный сигнал (или постоянное напряжение) подаётся на вход 1-го канала осциллографа, формирователь калибратора подключается ко 2-му каналу (рис. 2). Импедансы обоих каналов, как и выходное сопротивление формирователя, устанавливаются равными сопротивлению выхода источника исследуемого сигнала. Измерение мгновенных значений импульсного напряжения осуществляется следующим образом: сначала автоматически устанавливаются коэффициенты отклонения и развёртки, необходимые для корректного отображения сигнала (функция осциллографа «Auto Set»), затем определяются длительность импульса и его период; после этого с учётом измеренных длительностей на экран последовательно выводятся вершина импульса и его основание, при этом устанавливаются соответствующие значения вертикального смещения и минимально возможный коэффициент отклонения.

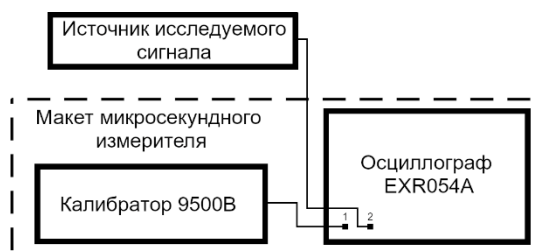


Рис. 2. Схема разработанного макета

- Предусмотрены три способа измерений мгновенных значений напряжения:
- 1) задействование функции V_{avg} , которая вычисляет среднее значение всех отображаемых на экране мгновенных значений напряжения для одного канала;
 - 2) измерение мгновенных значений напряжения в моменты времени, разделённые равными интервалами;
 - 3) измерение среднего значения мгновенных значений напряжения, приходящихся на равные интервалы времени.

Дополнительно можно задействовать усреднение заданного количества осциллограмм и установить разрешение по вертикали равным 16 бит (с ограничением полосы пропускания до 20,6 МГц и частотой дискретизации, равной 50 МГц). Также для определения погрешности измерений, проведённых с помощью макета, была добавлена возможность выполнять измерения постоянного напряжения. При измерениях мгновенных значений импульсного напряжения имеется возможность «обрезать» фронты и срезы исследуемых импульсов для исключения влияния переходных процессов исследуемого импульса и переходной характеристики осциллографа на результат измерений. Все вышеописанные функции реализованы в специально разработанном программном обеспечении (ПО), интерфейс пользователя которого представлен на рис. 3. Измеренные значения записываются в ячейки электронной таблицы. Пример результата работы программы при измерениях мгновенных значений импульсного напряжения амплитудой 0,5 В с исключением участков длительностью 1 мкс после фронта и перед срезом представлен на рис. 4.

The screenshot shows a software window titled "Измерения амплитуды" (Amplitude Measurements). It includes the following elements:

- Осциллограф** (Oscilloscope): A dropdown menu showing "TCPIP0::LCRY0830N68046::inst0::INSTR" and an "Обновить" (Refresh) button.
- Калибратор** (Calibrator): A dropdown menu showing "TCPIP0::192.168.137.1::inst0::INSTR" and a "Подключить" (Connect) button.
- Длительность исключаемого участка за/перед фронтами** (Duration of excluded section before/after wavefronts): A text input field with "0" and a unit "нс" (ns).
- Усреднение** (Averaging): Three radio button options:
 - ☒ Усреднение всего отображаемого сигнала (Average the entire displayed signal)
 - ☐ Усреднение по участкам длительностью (Averaging by duration)
 - ☐ Измерение мгновенных значений (без усреднения) (Instantaneous value measurement (without averaging))
- Тип сигнала** (Signal type): Two radio button options:
 - ☒ Импульс (Pulse)
 - ☐ Пост. (DC)
- Усреднение при сборе данных** (Averaging during data collection): A checkbox that is currently unchecked.
- Кол-во усреднений** (Number of averages): A text input field.
- Разрешение** (Resolution): Three radio button options:
 - ☒ 10 бит
 - ☐ 16 бит, 200 МГц
 - ☐ 16 бит, 50 МГц
- Импеданс** (Impedance): Three radio button options:
 - ☒ 1 МОм
 - ☐ 50 Ом
- Учесть межканальную погрешность** (Take into account inter-channel error): A checkbox that is currently unchecked.
- Провести измерение** (Perform measurement): A large button.
- Results section:** Three text input fields for:
 - Усредненное значение напряжения вершины, В (Average voltage peak, V)
 - Усредненное значение напряжения основания, В (Average voltage base, V)
 - Амплитуда импульса, В (Pulse amplitude, V)
- Buttons at the bottom:** "Определить межканальную поправку" (Determine inter-channel correction) and "Провести поверку K2C-62" (Perform K2C-62 calibration).

Рис. 3. Интерфейс разработанного ПО

№	A	B	C	D	E	F	G	H	I
1	№	Время (верш)	Уист_верш	Уэт_верш	Уд_верш	Время (осн)	Уист_осн	Уэт_осн	Уд_осн
2	1	999.943 нс	0.49728	0.50116	0.49608	-49000.083 нс	0.01321	0.00172	0.01309
3	2	1999.943 нс	0.49643	0.50104	0.49535	-48000.083 нс	0.00287	0.00183	0.00263
4	3	2999.943 нс	0.49761	0.50105	0.49652	-47000.083 нс	0.00029	0.00180	0.00008
5	4	3999.943 нс	0.49812	0.50096	0.49712	-46000.083 нс	-0.00016	0.00181	-0.00037
6	5	4999.943 нс	0.49767	0.50112	0.49651	-45000.083 нс	0.00073	0.00178	0.00055
7	6	5999.943 нс	0.49728	0.50132	0.49593	-44000.083 нс	0.00118	0.00186	0.00092
8	7	6999.943 нс	0.49770	0.50118	0.49649	-43000.083 нс	0.00020	0.00172	0.00008
9	8	7999.943 нс	0.49783	0.50089	0.49690	-42000.083 нс	0.00011	0.00180	-0.00010
10	9	8999.943 нс	0.49722	0.50109	0.49609	-41000.083 нс	0.00077	0.00185	0.00052
11	10	9999.943 нс	0.49730	0.50115	0.49611	-40000.083 нс	0.00133	0.00184	0.00108
12	11	10999.943 нс	0.49744	0.50110	0.49631	-39000.083 нс	0.00031	0.00187	0.00004
13	12	11999.943 нс	0.49822	0.50104	0.49714	-38000.083 нс	0.00023	0.00163	0.00019

Рис. 4. Результаты измерений мгновенных значений импульсного напряжения

Влияние межканальной погрешности на результаты измерений

Для определения влияния погрешности, вызванной неидентичностью 1-го и 2-го каналов (далее — межканальной погрешности), было проведено несколько серий измерений для разных коэффициентов отклонения подобно тому, как это было сделано в [2]. Одна серия представляет собой 8 пар измерений (в течение одного часа, с равными паузами между измерениями) среднего значения постоянного напряжения, поданного сначала на 1-й канал осциллографа в составе макета, а затем — на 2-й канал. Устанавливаемые на калибраторе значения напряжения и соответствующие средние значения (m) и СКО (σ) межканальной погрешности приведены в таблице.

Таблица

Результаты измерений межканальной погрешности

Установленное напряжение	Коэффициент отклонения	1-я серия измерений	2-я серия измерений	3-я серия измерений
10 мВ	3,5 мВ/дел	$m = 1,4 \cdot 10^{-5}$ В; $\sigma = 1,3 \cdot 10^{-5}$ В	$m = 2,9 \cdot 10^{-5}$ В; $\sigma = 7,0 \cdot 10^{-6}$ В	$m = 9,9 \cdot 10^{-6}$ В; $\sigma = 1,0 \cdot 10^{-5}$ В
20 мВ	6 мВ/дел	$m = -5,3 \cdot 10^{-5}$ В; $\sigma = 6,5 \cdot 10^{-6}$ В	$m = -4,0 \cdot 10^{-5}$ В; $\sigma = 1,0 \cdot 10^{-5}$ В	$m = -6,0 \cdot 10^{-5}$ В; $\sigma = 7,2 \cdot 10^{-6}$ В
50 мВ	13,5 мВ/дел	$m = 6,4 \cdot 10^{-5}$ В; $\sigma = 1,5 \cdot 10^{-5}$ В	$m = 7,5 \cdot 10^{-5}$ В; $\sigma = 1,1 \cdot 10^{-5}$ В	$m = 6,5 \cdot 10^{-5}$ В; $\sigma = 1,6 \cdot 10^{-5}$ В
100 мВ	26 мВ/дел	$m = 3,9 \cdot 10^{-4}$ В; $\sigma = 5,0 \cdot 10^{-5}$ В	$m = 4,0 \cdot 10^{-4}$ В; $\sigma = 3,4 \cdot 10^{-5}$ В	$m = 3,6 \cdot 10^{-4}$ В; $\sigma = 2,5 \cdot 10^{-5}$ В
200 мВ	51 мВ/дел	$m = 2,9 \cdot 10^{-4}$ В; $\sigma = 6,9 \cdot 10^{-5}$ В	$m = 2,8 \cdot 10^{-4}$ В; $\sigma = 4,1 \cdot 10^{-5}$ В	$m = 2,4 \cdot 10^{-4}$ В; $\sigma = 8,4 \cdot 10^{-5}$ В
500 мВ	126 мВ/дел	$m = 4,4 \cdot 10^{-4}$ В; $\sigma = 1,2 \cdot 10^{-4}$ В	$m = 3,5 \cdot 10^{-4}$ В; $\sigma = 1,7 \cdot 10^{-4}$ В	$m = 3,7 \cdot 10^{-4}$ В; $\sigma = 1,7 \cdot 10^{-4}$ В
1 В	251 мВ/дел	$m = 2,05 \cdot 10^{-3}$ В; $\sigma = 2,5 \cdot 10^{-4}$ В	$m = 2,01 \cdot 10^{-3}$ В; $\sigma = 3,4 \cdot 10^{-4}$ В	$m = 2,13 \cdot 10^{-3}$ В; $\sigma = 2,6 \cdot 10^{-4}$ В
2 В	501 мВ/дел	$m = 1,2 \cdot 10^{-3}$ В; $\sigma = 6,2 \cdot 10^{-4}$ В	$m = 0,8 \cdot 10^{-3}$ В; $\sigma = 5,3 \cdot 10^{-4}$ В	$m = 1,4 \cdot 10^{-3}$ В; $\sigma = 6,0 \cdot 10^{-4}$ В

Значения, приведённые в таблице, позволяют сделать вывод о том, что межканальная погрешность для конкретного коэффициента отклонения от измерения к измерению изменяется незначительно, и, следовательно, может быть программно учтена некоторой константой.

Результаты исследования характеристик макета микросекундного измерителя

Для определения метрологических характеристик разработанного макета были проведены несколько серий измерений, при этом измерялось среднее значение всех отображаемых на экране осциллографа мгновенных значений. На рис. 5 представлены графики, отражающие изменение относительной погрешности измерений среднего значения напряжения. В качестве эталонного источника напряжения использовался отдельный, не включённый в состав макета, калибратор осциллографов 9500В, напряжение на выходе которого контролировалось мультиметром 3458А. Измерения проводились при установленном импедансе каналов осциллографа и выхода источника 1 МОм.

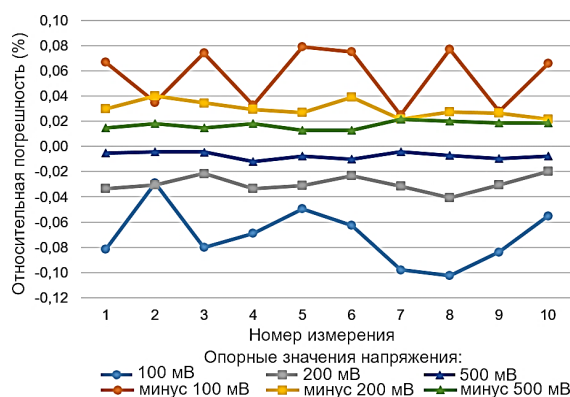


Рис. 5а. Значения относительных погрешностей измерений напряжения с опорными значениями 100; –100; 200; –200; 500; –500 мВ

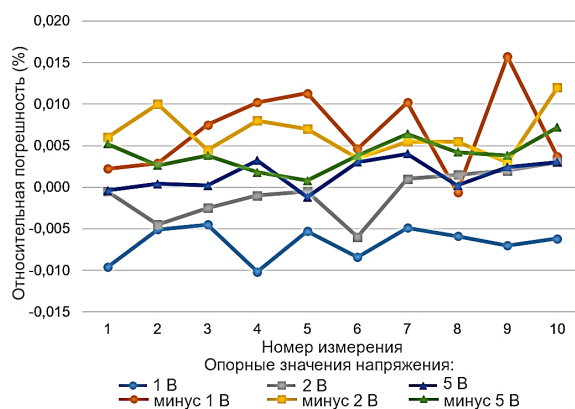


Рис. 5б. Значения относительных погрешностей измерений напряжения с опорными значениями 1; –1; 2; –2; 5; –5 В

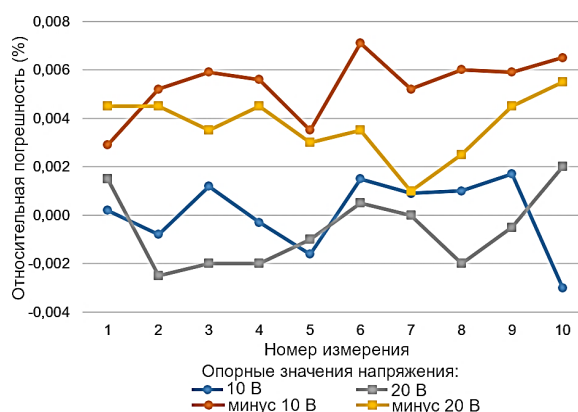


Рис. 5в. Значения относительных погрешностей измерений напряжения с опорными значениями 10; -10; 20; -20 В

Относительная погрешность измерений среднего значения напряжения $\delta u'$ рассчитывалась по формуле:

$$\delta u' = \frac{u' - U_{9500B}}{U_{9500B}} \cdot 100 \% , \quad (6)$$

где u' — измеренное среднее значение напряжения.

Наибольшее значение относительной погрешности измерений наблюдается при малых значениях напряжения источника. При установленном напряжении -100 мВ максимальное абсолютное значение относительной погрешности составляет 0,1 %. Кроме того, наблюдается закономерность, выраженная в том, что знак относительной погрешности противоположен знаку установленного напряжения, что может свидетельствовать о неучтённом фоновом аддитивном шуме.

Для уменьшения погрешности измерений малых значений напряжения были установлены режимы ограничения полосы пропускания осциллографа, установления повышенной разрядности АЦП осциллографа и включения режима усреднения нескольких осциллограмм [3]. Результаты измерений средних значений напряжения при установленном напряжении источника 100 мВ в разных режимах в виде графиков представлены на рис. 6.

При всех измерениях была установлена разрядность АЦП 16 бит. Среднее значение результатов измерений при установленной верхней граничной частоте полосы пропускания 200 МГц и 64 усредняемых осциллограммах равно 0,09995 В. При установленной верхней граничной частоте полосы пропускания 20,6 МГц и 64 усредняемых осциллограммах среднее значение результатов измерений составило 0,09996 В. Относительная погрешность измерений для данных режимов не превышает 0,1 %. СКО результатов измерений составляет не более 0,05 %.

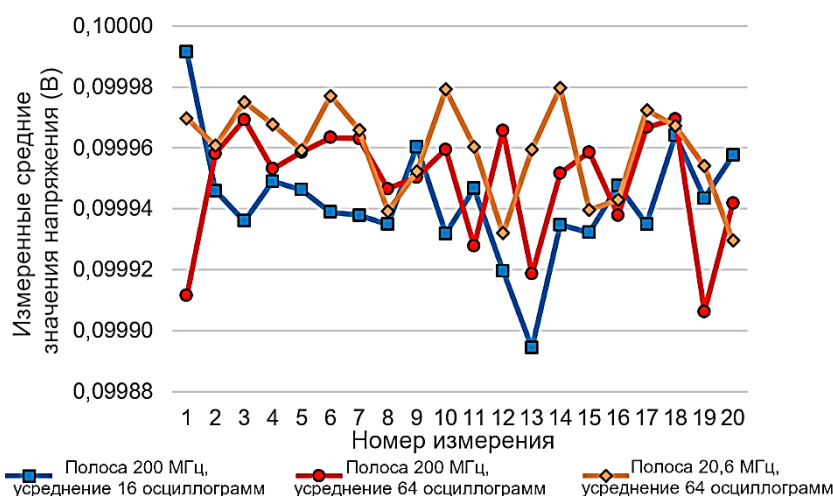


Рис. 6. Результаты измерений средних значений напряжения при установленном напряжении источника 100 мВ в разных режимах

Выводы

Был разработан алгоритм измерений и макет микросекундного измерителя, заменяющего установку измерительную РК2-01А. Основные преимущества макета микросекундного измерителя по сравнению с установкой измерительной РК2-01А: быстрый процесс измерений, возможность измерений ряда мгновенных значений напряжения одномоментно, простота и функциональность дистанционного управления, возможность гибко изменять длительность временных интервалов между дискретными отсчётами значений напряжения. Получены оценки значений межканальной погрешности, которые позволяют учитывать влияние этой составляющей суммарной погрешности. Значения относительной погрешности измерений мгновенных значений напряжения не превышают 0,1 %, при этом с увеличением амплитуды измеряемого сигнала относительная погрешность измерений уменьшается. Для дополнительного снижения погрешности измерений показали свою эффективность увеличение разрядности АЦП осциллографа, ограничение полосы пропускания входных каналов, а также применение усреднения осциллограмм.

Список литературы

1. Клеопин А.В., Макаров В.В., Селин Л.Н., Зенченко М.А. Исследование компенсационного метода измерений импульсного напряжения с помощью цифрового осциллографа // Метрология в радиоэлектронике. Материалы XII Всероссийской научно-технической конференции. — Менделеево: ФГУП «ВНИИФТРИ», 2021. — С. 313–314.

2. Конобеев Б.А., Клеопин А.В., Обухов И.В., Окунев-Раракин В.В. Оценка степени идентичности входных каналов цифровых осциллографов // Альманах современной метрологии. — 2019. — № 2 (18). — С. 225–228.
3. Окунев-Раракин В.В. Применение компенсационного метода для уменьшения погрешности измерений импульсного напряжения осциллограмм // Вестник метролога. — 2012. — № 3 — С. 25–27.

Статья поступила в редакцию: 23.06.2022 г.

Статья прошла рецензирование: 30.06.2022 г.

Статья принята в работу: 25.07.2022 г.