

**ЭЛЕКТРОНИКА
И РАДИОТЕХНИКА**

УДК 621.317/619

**ИЗМЕРЕНИЕ НЕЛИНЕЙНЫХ ИСКАЖЕНИЙ ПИКОСЕКУНДНЫХ
СИГНАЛОВ УСТРОЙСТВАМИ ОЦИФРОВКИ**

© 2026 г. М. А. Назаров*, Э. В. Семенов

*Институт сильноточной электроники
Сибирского отделения Российской академии наук
Россия, 634055, Томск, просп. Академический, 2/3*

**e-mail: mnaz90@mail.ru*

Поступила в редакцию 25.11.2025 г.

После доработки 22.12.2025 г.

Принята к публикации 16.01.2026 г.

Рассмотрен разностный метод измерения нелинейных искажений сигналов в устройствах оцифровки, который не требует, чтобы тестовые сигналы были строго одинаковыми по форме. Это позволило измерять нелинейные искажения в пикосекундном диапазоне, где сложно точно контролировать форму тестовых сигналов. Предложено использовать тестовые сигналы разных полярностей из соображений простоты генерации таких пар. Поскольку статическая нелинейность регистрирующих устройств обычно имеет квадратичный вид, нелинейные искажения в откликах на такие сигналы не компенсируют друг друга. Показано, что для заданных тестовых сигналов в выбранных устройствах оцифровки наблюдению доступны нелинейные искажения величиной от 0.1%, а вносимые устройствами оцифровки нелинейные искажения составляют не менее 0.4–0.5%. Изложена методика селекции динамических нелинейных искажений, в которой статическая нелинейность устройства измеряется отдельно и затем исключается из результатов измерений. Показано, что полярность динамических нелинейных искажений может как совпадать с полярностью общих нелинейных искажений, так и иметь противоположную полярность. Оценочно получено, что максимальная величина динамических нелинейных искажений примерно сопоставима с величиной статических искажений.

1. ВВЕДЕНИЕ

В ряде задач радиотехнических измерений ключевое значение имеют нелинейные искажения видеоимпульсных сигналов объектом измерения. К таким задачам относятся, например, задачи характеристики устройств основной полосы частот радиотехнических систем [1], задачи сверхширокополосной (СШП) нелинейной локации [2–6], задачи выявления некачественных электрических контактов [7–9] по признаку нелинейности отклика от них, а также задачи оценивания стойкости электронных устройств к СШП-импульсам [10]. Чувствительность и погрешность измерения в таких задачах ограничиваются собственной

нелинейностью измерительного тракта. Для тестовых сигналов в таких измерениях либо задают простейшую (например, ступенчатую [1]) форму, либо регистрируют фактическую форму тестовых сигналов [11]. Поэтому основное значение приобретает нелинейность устройства оцифровки сигналов.

Для измерения нелинейных искажений видеоимпульсных сигналов регистрирующими устройствами не подходят методы гармоник и комбинационных частот, поскольку нелинейные свойства устройств по-разному проявляются при воздействии сигналов разной формы [12]. Большинство методов измерения нелинейных искажений видеоимпульсных сигналов объектом использует сравнение отклика объекта на сигналы разной формы и/или амплитуды [11]. Наибольший объем информации о нелинейно-инерционных свойствах объекта в видеоимпульсном режиме воздействия можно получить из семейства переходных характеристик (ПХ) объекта, зарегистрированных как результат реакции объекта на семейство ступенчатых сигналов с различными амплитудами [13]. Такой метод измерения, в частности, нами опробован для измерения статической и динамической нелинейностей устройства оцифровки National Instruments PXI-5114 [1] (длительность переходной характеристики 2.4 нс).

Для реализации метода [13] важно, чтобы систематическая погрешность воспроизведения тестовых сигналов не сказывалась существенно на погрешности измерения переходных характеристик объекта. Простейшим способом выполнить это условие является сокращение длительности фронта тестовых сигналов по сравнению с длительностью переходного процесса в объекте измерения (в 5 раз или более) [1]. В приведенном примере с устройством оцифровки National Instruments PXI-5114 длительность фронта ступенчатых сигналов составляла 35 пс при длительности фронта ПХ объекта измерения 2.4 нс.

Однако в ряде задач нелинейных импульсных радиоизмерений требуются регистрирующие устройства с полосой до нескольких ГГц и более. Например, для задач локализации латентных дефектов электрических контактов по признаку нелинейности отклика на видеоимпульсный сигнал требуются устройства регистрации с полосой от 12 ГГц и более. Такой верхней граничной частоте соответствуют длительности фронта объектов измерения порядка 30–100 пс. Соответственно, тестовый генератор должен вырабатывать ступенчатые сигналы с длительностями фронта порядка 6–20 пс с обеспечением регулировки амплитуды такого сигнала. Задача создания такого генератора является крайне сложной.

В работе [14] мы опробовали подход, при котором генератор ступенчатого сигнала всегда вырабатывает ступенчатый импульс с постоянной формой и амплитудой, а для уменьшения амплитуды сигнала используется набор СВЧ-аттенюаторов. Однако каждый

аттенюатор имеет свою матрицу рассеяния, что приводит к зависимости формы ступенчатого сигнала от установленного набора аттенюаторов. В принципе данные искажения можно учесть, предварительно измерив матрицу рассеяния каждого аттенюатора. Однако это очень усложняет метод измерения, тем более что для такого учета нужно знать и конкретные внутренние импедансы генератора сигналов и объекта измерения.

В настоящей статье рассматривается метод измерения нелинейных искажений пикосекундных сигналов в устройствах оцифровки, который не требует, чтобы тестовые сигналы были строго одинаковыми по форме.

2. РАЗНОСТНЫЙ МЕТОД ИЗМЕРЕНИЯ НЕЛИНЕЙНЫХ ИСКАЖЕНИЙ, НЕ ТРЕБУЮЩИЙ ОДИНАКОВЫХ ФОРМ СРАВНИВАЕМЫХ СИГНАЛОВ

В общем случае нелинейные искажения сигнала $u(t)$ определяются как отличие этого сигнала от сигнала без нелинейных искажений $u_0(t)$ [12]. Для определения сигналов $u(t)$ и $u_0(t)$ нужны как минимум два тестовых воздействия $x_{1,2}(t)$ с регистрацией откликов на них $u_{1,2}(t)$. Если сигналы $x_{1,2}(t)$ различаются только амплитудами $X_{1,2}$, то прогноз сигнала $u_0(t)$ можно получить из отклика объекта на сигнал с меньшей амплитудой (например, $u_2(t)$). Тогда сигнал нелинейных искажений $\varepsilon(t)$ определяется по формуле

$$\varepsilon(t) = u_1(t) - u_2(t) X_1/X_2. \quad (1)$$

Если же тестовые сигналы различаются по форме (пусть даже только вследствие погрешности их воспроизведения), то формула (1) не может быть использована для вычисления сигнала нелинейных искажений, поскольку она будет отражать также и разницу форм тестовых воздействий. Чтобы вычислить прогноз неискаженного сигнала для $u_1(t)$ из отклика $u_2(t)$ на сигнал другой формы, потребуется откорректировать не только амплитуду, но и форму отклика $u_2(t)$. Такой метод описан в работе [9]. В этом случае формула (1) приобретает вид

$$\varepsilon(t) = u_1(t) - u_2(t) * F^{-1}[K(\omega)], \quad (2)$$

где $*$ – символ свертки, F^{-1} – обратное преобразование Фурье, $K(\omega)$ – передаточная функция, обеспечивающая получение линейного прогноза отклика на сигнал $x_1(t)$ из отклика на сигнал $x_2(t)$ (корректирующая функция). Правильный выбор $K(\omega)$ должен обеспечить условие $\varepsilon(t) \equiv 0$ при отсутствии нелинейных искажений сигналов объектом и любой форме $x_{1,2}(t)$. Такое условие обеспечивается при $K(\omega) = X_1(\omega)/X_2(\omega)$, где $X_{1,2}(\omega)$ – спектры соответствующих тестовых сигналов [11].

Тестовые сигналы $x_{1,2}(t)$ могут либо задаваться априори с требованием их точного воспроизведения, либо регистрироваться тем же устройством оцифровки, нелинейные искажения которого измеряются [11]. Второй вариант предпочтительнее на практике, поскольку он не накладывает требований на искажения сигналов в устройстве их генерации. Большинство устройств оцифровки является двухканальными, поэтому каждая пара сигналов $x_{1,2}(t)$ и $u_{1,2}(t)$ может быть зарегистрирована отдельным каналом регистрирующего устройства.

Изложенный подход на уровне принципа уже описан в работе [15], однако там предлагается для сигнала $x_2(t)$ уменьшенной амплитуды сохранить такую же энергию, как и у сигнала $x_1(t)$. Это хоть и имеет свою логику (улучшение отношения сигнал/шум при регистрации пары $x_2(t)$, $u_2(t)$), но значительно усложняет генерацию тестовых сигналов. Упростить генерацию тестовых сигналов можно на основе того наблюдения, что статическая нелинейность устройств оцифровки СВЧ-диапазона имеет преимущественно квадратичный характер. На рис. 1 приведены характеристики статической нелинейности двух СВЧ-осциллографов, измеренные по методике, изложенной в работе [1]. Можно видеть, что для приведенных случаев статическая нелинейность имеет одинаковые знаки как для положительных, так и для отрицательных воздействий. В таком случае допустимо выбрать тестовые сигналы с одинаковыми формами и амплитудами (энергиями), но противоположными полярностями. Тогда получим, что $K(\omega) \approx -1$, и члены в правой части формулы (2) будут суммироваться. Поэтому компоненты нелинейных искажений, содержащиеся в сигналах $u_1(t)$ и $u_2(t)$, будут только складываться (никогда не будут компенсировать друг друга).

Рис. 1. Результаты измерения статической нелинейности устройств регистрации

Конечно, на рис. 1 непосредственно представлена только статическая нелинейность осциллографов, динамический компонент нелинейности непосредственно не виден. Однако приведенная структура искажений указывает на то, что входные аналоговые каскады данных осциллографов выполнены как однотактные (или сильно ассиметричные). Поэтому и для динамической нелинейности стоит ожидать преимущество компонента второго порядка.

Выбор одинаковых форм и амплитуд тестовых сигналов позволяет применить еще один полезный прием при обработке результатов измерения. Линейный прогноз отклика объекта $u_0(t)$ можно вычислять не для тестового сигнала $x_1(t)$ (или $x_2(t)$), а для сигнала $x_0(t)$, форма которого определяется как средняя между $x_1(t)$ и $-x_2(t)$ [14]. В результате формула (2) приобретает симметричный вид:

$$\varepsilon(t) = u_1(t) * F^{-1}[X_0(\omega)/X_1(\omega)] - u_2(t) * F^{-1}[X_0(\omega)/X_2(\omega)]. \quad (3)$$

Смысл такой модификации формулы (2) состоит в том, чтобы минимизировать трансформирующее действие корректирующих функций на отклики объекта. Действительно, в формуле (3) корректирующим функциям требуется преобразовать не один отклик в другой, а только лишь в средний между откликами сигнал. Такая минимизация полезна в связи с тем, что данная задача коррекции формы сигнала относится к некорректным обратным задачам. Для таких приемов обработки характерно то, что результат обработки более чувствителен к шумам и систематическим погрешностям измерений, чем исходные сигналы.

Для дополнительной регуляризации определения $\varepsilon(t)$, так же как и в работе [16], осуществляется фильтрация сигнала $\varepsilon(t)$ (или его слагаемых по формуле (3)) при помощи фильтра нижних частот Гаусса, поскольку некорректность обработки сигналов по формуле (3) проявляется, в основном, на верхних частотах (при делении на малые по амплитуде составляющие в спектрах $X_{1,2}(\omega)$).

3. ЭКСПЕРИМЕНТАЛЬНАЯ УСТАНОВКА И ТЕСТОВЫЕ СИГНАЛЫ

На рис. 2 представлена структурная схема экспериментальной установки, реализующей метод измерения, изложенный в предыдущем разделе. Для формирования тестовых сигналов противоположных полярностей используется двухтактный формирователь импульсов $UZ1$, подробно описанный в работе [17]. Для наблюдения динамической нелинейности объекта измерения в полном объеме нужно, чтобы длительность фронта тестового сигнала была, по крайней мере, в 3–5 раз меньше длительности фронта ПХ объекта измерения. Современные СВЧ-осциллографы имеют длительность фронта ПХ 70–100 пс, откуда получаем, что длительность фронта тестового сигнала должна быть около 20 пс или менее. На данный момент таких реализаций двухтактных формирователей импульсов не предложено. Длительность фронта сигнала на выходе используемого формирователя составляет 210–250 пс (для импульсов разных полярностей) по уровням 20–80% от амплитуды. При интерпретации результатов измерений нужно учитывать, что нелинейность динамического переходного процесса не будет достигать предельно возможных для данного объекта измерения величин, поскольку длительности фронтов импульсов превышают длительности переходных процессов, взятых в качестве примеров устройств оцифровки.

Рис. 2. Структурная схема установки для измерения нелинейных искажений СШП-сигналов

Для работы формирователя импульсов на его вход необходимо подавать сигнал в форме меандра от генератора $G1$. Мы использовали генератор сигналов произвольной формы Siglent SDG7102A, имеющий время нарастания выходного напряжения 2.4 нс при амплитуде меандра

12 В. При таких параметрах задающего генератора амплитуда сигнала на выходе формирователя импульсов составляет 13.1 В.

Сигналы на выходе формирователя импульсов имеют форму, близкую к ступенчатой (рис. 3), что обеспечивает раздельное наблюдение статических и динамических нелинейных искажений в объекте измерения. В используемом диапазоне наблюдения 4 нс от начала фронта тестового сигнала неравномерность плоской вершины импульса не превышает 5.5%.

Рис. 3. Формы тестовых сигналов (кривые 1 и 2) и откликов регистрирующего устройства (кривые 3 и 4)

Для формирования пар сигналов разных амплитуд, которые затем подаются на два канала регистрирующего устройства, используется ответвитель $WE1$, в котором к проходящему коаксиальному волноводу присоединен включенный на проход резистор сопротивлением 470 Ом. Таким образом, на основной выход ответвителя сигнал от формирователя импульсов подается практически без ослабления, а на ответвляющий выход – с ослаблением в 10.4 раза. Затем аттенюаторы $WU1$ и $WU2$ окончательно формируют нужные амплитуды сигналов соответственно $x_{1,2}(t)$ и $u_{1,2}(t)$ на входе регистрирующего устройства. Амплитуду импульсов $x_{1,2}(t)$ следует выбирать меньше амплитуды импульсов $u_{1,2}(t)$. Это нужно для того, чтобы нелинейные искажения тестовых сигналов $x_{1,2}(t)$ были меньше, чем искажения откликов $u_{1,2}(t)$. Это позволит ассоциировать результат измерения нелинейных искажений только с сигналами определенной амплитуды. Мы выбрали исследуемый диапазон оцифровки регистрирующего устройства ± 1.2 В (оба канала устройства оцифровки должны проводить измерения в режиме одинаковой вертикальной развертки). Амплитуды сигналов $x_{1,2}(t)$ и $u_{1,2}(t)$ составляют ± 0.18 мВ и ± 1.0 В соответственно. При этом неравномерность плоской вершины импульсов не превышает 7% на интервале 4 нс от их начала.

Установка с обозначением основных составных частей приведена на рис. 4.

Рис. 4. Установка измерения нелинейных искажений СШП-сигналов осциллографом

4. ПРИМЕР АНАЛИЗИРУЕМЫХ УСТРОЙСТВ И ЭКСПЕРИМЕНТАЛЬНЫЕ ИЗМЕРЕНИЯ

Выберем в качестве примера типичные устройства оцифровки СВЧ-диапазона – осциллографы Keysight MXR604A и Siglent SDS7404A. По заявлениям производителя осциллограф Keysight MXR604A имеет верхнюю граничную частоту 6 ГГц, длительность фронта переходной характеристики не более 52 пс по уровням 20–80%, а осциллограф Siglent SDS7404A, имея верхнюю граничную частоту 4 ГГц, обладает длительностью фронта переходной характеристики не более 120 пс.

Результаты измерения полных (статических и динамических) нелинейных искажений ступенчатых сигналов осциллографами Keysight MXR604A и Siglent SDS7404A показаны на рис. 5а и рис. 5б соответственно (кривая 1). При обработке сигналов использовалась постоянная времени фильтра Гаусса, равная 100 пс для осциллографа Keysight MXR604A и 140 пс для Siglent SDS7404A. Такие значения постоянных времени выбраны, исходя из компромиссных соображений. Их увеличение приводит к увеличению искажений формы $\varepsilon(t)$, а уменьшение – к увеличению шумов и помех в сигнале $\varepsilon(t)$. Максимальные нелинейные искажения наблюдаются на плоских вершинах импульсов и составляют для осциллографа Keysight MXR604A 0.39%, а для осциллографа Siglent SDS7404A 0.48% от амплитуды зарегистрированных сигналов для диапазона оцифровки 2.4 В (по размаху).

Рис. 5. Нелинейные искажения сигналов

5. МЕТОДИКА РАЗДЕЛЕНИЯ СТАТИЧЕСКИХ И ДИНАМИЧЕСКИХ НЕЛИНЕЙНЫХ ИСКАЖЕНИЙ В РЕЗУЛЬТАТАХ ИЗМЕРЕНИЯ

Если анализировать сигнал нелинейных искажений только визуально, то может сложиться впечатление, что нелинейные искажения имеют исключительно статический характер. Действительно, внешне кривые отклика объекта и его нелинейных искажений мало различаются по форме. Такой результат измерений имеет малую практическую ценность, поскольку статическая амплитудная характеристика объекта измерения легко измеряется вплоть до величин нелинейности порядка сотых долей процента [13].

Однако внимательный анализ показывает, что, например, для осциллографа Keysight MXR604A крутизна фронта сигнала нелинейных искажений больше, чем крутизна фронта зарегистрированных сигналов. Отсюда следует, что на фронте регистрируемых сигналов добавляется динамическая компонента нелинейных искажений $\varepsilon_d(t)$. Ее можно выделить, если рассчитать статическую компоненту нелинейных искажений $\varepsilon_c(t)$:

$$\varepsilon_d(t) = \varepsilon(t) - \varepsilon_c(t). \quad (4)$$

Как уже говорилось, статическую нелинейность объекта легко измерить, если подавать относительно низкочастотный сигнал (например, ступенчато нарастающий) от низкочастотного генератора с весьма малыми нелинейными искажениями (технически реально менее 0.001%) [18]. Результат таких измерений приведен на рис. 1: кривая 1 для осциллографа Keysight MXR604A и кривая 2 для осциллографа Siglent SDS7404A. Результаты измерения исходно представляют собой таблично определенную функцию, интерполяция которой $E_c[x]$ (где x – напряжение на входе объекта) позволяет рассчитать статическую

компоненту нелинейных искажений для любого значения входного напряжения: $\varepsilon_c(t) = E_c[x(t)]$. Затем по формуле (4) рассчитываем динамические нелинейные искажения.

Результат расчета динамических нелинейных искажений для осциллографов Keysight MXR604A и Siglent SDS7404A приведен на рис. 5а и рис. 5б соответственно (кривая 2). В относительном выражении динамические нелинейные искажения для осциллографа Keysight MXR604A положительны и составляют 0.22%, а для осциллографа Siglent SDS7404A отрицательны и не превышают 0.1%. Напомним, что длительность фронтов тестового сигнала составляет 210–250 пс, что примерно втрое больше, чем длительность фронта ПХ осциллографа Keysight MXR604A, и вдвое больше длительности фронта ПХ осциллографа Siglent SDS7404A. Поскольку физическим фактором, вызывающим динамическую нелинейность, объективно являются нелинейные емкости полупроводниковых приборов, можно полагать, что увеличение скорости нарастания входного сигнала вызовет примерно пропорциональное увеличение динамических нелинейных искажений. Для Keysight MXR604A их можно ожидать до величины около 0.6%, для Siglent SDS7404A – не более 0.2%.

6. ЗАКЛЮЧЕНИЕ

В статье рассмотрен разностный метод измерения нелинейных искажений пикосекундных сигналов в устройствах оцифровки, который не требует, чтобы тестовые сигналы были строго одинаковыми по форме. Тестовые сигналы регистрируются тем же устройством оцифровки, нелинейные искажения которого измеряются. Это позволяет не предъявлять требований к искажениям сигналов в устройстве их генерации.

В нашем исследовании тестовые сигналы выбираются близкими по форме и имеющими разные полярности. Выбор тестовых сигналов разными полярностями упрощает генерацию сигналов в связи с тем, что статическая нелинейность регистрирующего устройства имеет квадратичный вид. Поэтому нелинейные искажения от различных откликов не компенсируют друг друга.

С использованием этого метода проведены сравнительные измерения нелинейных искажений сверхширокополосных сигналов с длительностью фронта около 210–250 пс СВЧ-устройствами оцифровки с длительностью переходной характеристики порядка 100 пс. Показано, что наблюдению доступны нелинейные искажения величиной от 0.1% (она определяется собственными шумами используемого устройства оцифровки и количеством усредняемых наблюдений). Вносимые современными устройствами оцифровки нелинейные искажения пикосекундных сигналов составляют не менее 0.4–0.5%.

Изложена методика, в которой статическая нелинейность устройства измеряется отдельно и затем исключается из результатов измерений. В результате остаются только динамические нелинейные искажения (нелинейная зависимость формы и крутизны переходного процесса от амплитуды сигнала). Из представленных результатов можно видеть, что полярность динамических нелинейных искажений может как совпадать с полярностью общих нелинейных искажений, так и быть противоположной.

По результатам измерений получено, что динамические нелинейные искажения для рассмотренных устройств лежат в диапазоне 0.1–0.2%, однако крутизна фронта использованного импульсного сигнала не позволяет наблюдать динамическую нелинейность объекта измерения максимальной величины. Оценочно мы полагаем, что максимальные величины динамических нелинейных искажений в выбранных объектах измерения могут достигать величин 0.2–0.6%. Таким образом заключаем, что динамическая нелинейность устройств оцифровки СВЧ-диапазона сопоставима со статической, но может быть как меньше, так и больше последней.

Результаты измерения нелинейных искажений сигналов в устройствах их оцифровки могут быть использованы как для оценки пороговой чувствительности нелинейных радиоизмерительных систем, так и для коррекции этих нелинейных искажений. Поскольку коррекция статической нелинейности устройства является тривиальной задачей, особенное значение имеют результаты измерения динамических нелинейных искажений. С помощью таких измерений можно синтезировать модель нелинейно-инерционных искажений сигналов в устройстве и затем компенсировать их посредством обращения этой модели [19].

ФИНАНСИРОВАНИЕ

Работа выполнена в рамках государственного задания Министерства науки и высшего образования Российской Федерации (проект № FWRM-2024-0001).

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. Назаров М.А., Семенов Э.В. Поведенческие модели сверхширокополосных устройств и их характеристика. Томск: Изд. Томского государственного университета систем управления и радиоэлектроники, 2023.
2. Авдеев В.Б., Бердышев А.В., Паньчев С.Н. // Телекоммуникации. 2006. № 8. С. 23. <https://elibrary.ru/item.asp?id=12806047>
3. Лоцилов А.Г. // Доклады ТУСУРа. 2013. №4(30). С. 31. <https://elibrary.ru/item.asp?id=21210615>

4. *Якубов В.П., Шипилов С.Э., Сатаров Р.Н., Юрченко А.В.* // ЖТФ. 2015. Т. 85. № 3. С. 122.
<https://elibrary.ru/item.asp?id=24196001>
5. *Симонов А.В.* РФ Патент 2253878, 2005.
6. *Якубов В.П., Шипилов С.Э., Суханов Д.Я.* РФ Патент 2516436, 2004.
7. *Артищев С.А., Семенов Э.В.* // Изв. вузов. Физика. 2013. Т. 56. № 9. С. 60.
<https://elibrary.ru/item.asp?id=20397729>
8. *Штейнлиейгер В.Б.* // УФН. 1984. Т. 142. № 1. С. 131.
<https://doi.org/10.3367/UFNr.0142.198401e.0131>
9. *Bryant P.H.* US Patent 7230970, 2007.
10. *Усыченко В.Г., Сорокин Л.Н., Усыченко А.С.* // Радиотехника и электроника. 2020. Т. 65. № 12. С. 1234. <https://doi.org/10.31857/S0033849420110170>.
11. *Семенов Э.В., Семенов А.В.* // Радиотехника и электроника. 2007. Т. 52. № 4. С. 480.
<https://elibrary.ru/item.asp?id=9534720>
12. *Семенов Э.В.* // Изв. вузов. Радиоэлектроника. 2022. Т. 25. № 2. С. 29.
<https://doi.org/10.32603/1993-8985-2022-25-2-29-39>
13. *Singleton H.E.* Theory of nonlinear transducers. Res. Lab. Electron., Massachusetts Inst. Technol. Cambridge, MA, USA, 1950. <http://hdl.handle.net/1721.1/4896>
14. *Назаров М.А., Семенов Э.В.* // Материалы XIV Всероссийской научно-практ. конференции “Метрология в радиоэлектронике”. Нижний Новгород, Россия, 2025. С. 271.
15. *Семенов Э.В., Малютин Н.Д., Лоцилов А.Г.* // Материалы II научно-технической конференции “Обмен опытом в области создания сверхширокополосных радиоэлектронных систем”. Омск, Россия, 2008. С. 174.
16. *Семенов Э.В., Назаров М.А., Фатеев А.В., Полторыхин К.М., Березин А.А., Поздняков В.С.* // ПТЭ. 2024. № 4. С. 115. <https://elibrary.ru/item.asp?id=80253644> .
17. *Березин А.А.* // Материалы 32 Международной научно-тех. конференции “СВЧ техника и телекоммуникационные технологии”. Севастополь, Россия, 2022. С. 247.
18. *Назаров М. А., Семенов Э.В.* // Доклады Томского государственного университета систем управления и радиоэлектроники. 2022. Т. 25. № 4. С. 110.
<https://doi.org/10.21293/1818-0442-2022-25-4-110-114> .
19. *Семенов Э.В., Назаров М.А.* // Материалы 35 междун. научно-тех. конференции “СВЧ техника и телекоммуникационные технологии”. Севастополь, Россия, 2025. С. 212.

ПОДПИСИ К РИСУНКАМ

- Рис. 1.** Результаты измерения статической нелинейности устройств регистрации: кривая 1 – осциллограф Keysight MXR 604A, кривая 2 – осциллограф Siglent SDS7404A.
- Рис. 2.** Структурная схема установки для измерения нелинейных искажений СШП-сигналов: $G1$ – генератор запускающих импульсов, $UZ1$ – двухтактный формирователь фронтов импульса, $WE1$ – разветвитель сигнала, $WU1$, $WU2$ – аттенюаторы, $PS1$ – объект измерения – устройство оцифровки, $W1$, $W2$ – коаксиальные волноводы.
- Рис. 3.** Формы тестовых сигналов (кривые 1 и 2) и откликов регистрирующего устройства (кривые 3 и 4): **а** – для осциллографа Keysight MXR 604A, **б** – для Siglent SDS7404A.
- Рис. 4.** Фотография установки измерения нелинейных искажений СШП-сигналов осциллографом: 1 – генератор запускающих импульсов, 2 – коаксиальный волновод от генератора запускающих импульсов, 3 – двухтактный формирователь фронтов импульса, 4 – узел формирования “малого” и “большого” сигналов одинаковой формы (ответвитель), 5 – коаксиальный волновод для регистрации тестовых сигналов, 6 – аттенюаторы, 7 – исследуемое устройство оцифровки.
- Рис. 5.** Нелинейные искажения сигналов: **а** – для осциллографа Keysight MXR 604A, **б** – для Siglent SDS7404A. Кривые 1 – общие, кривые 2 – динамическая составляющая, кривыми 3 представлена форма отклика $u(t)$ исследуемых приборов на положительный тестовый сигнал.

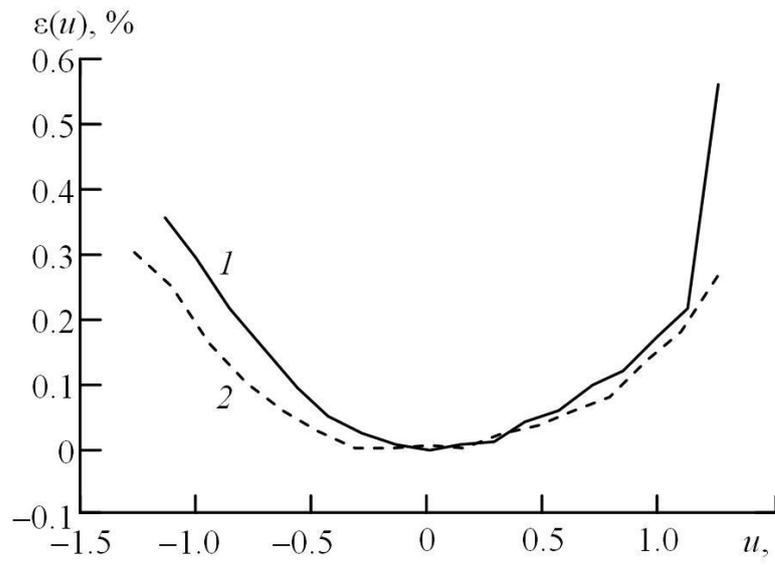


Рис. 1.

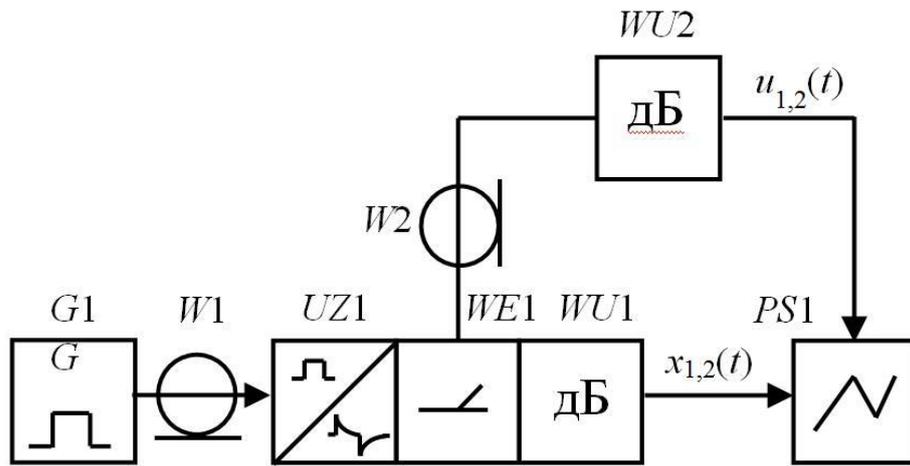


Рис. 2.

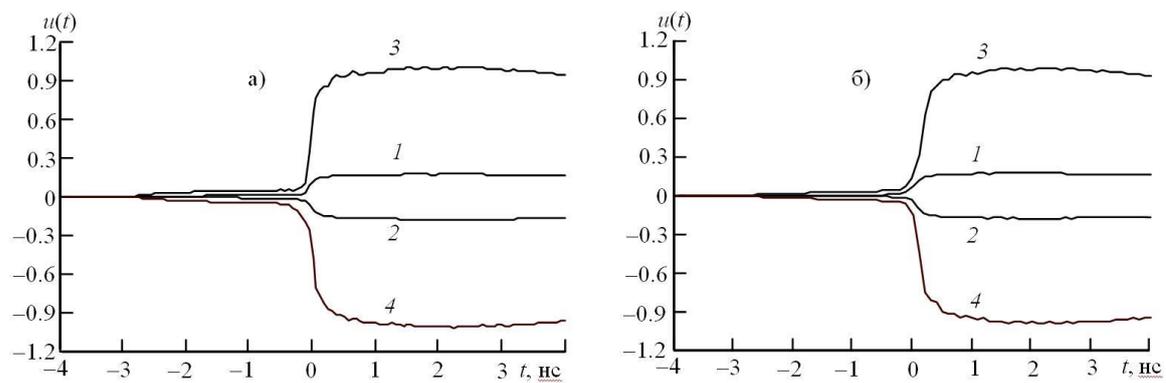


Рис. 3.

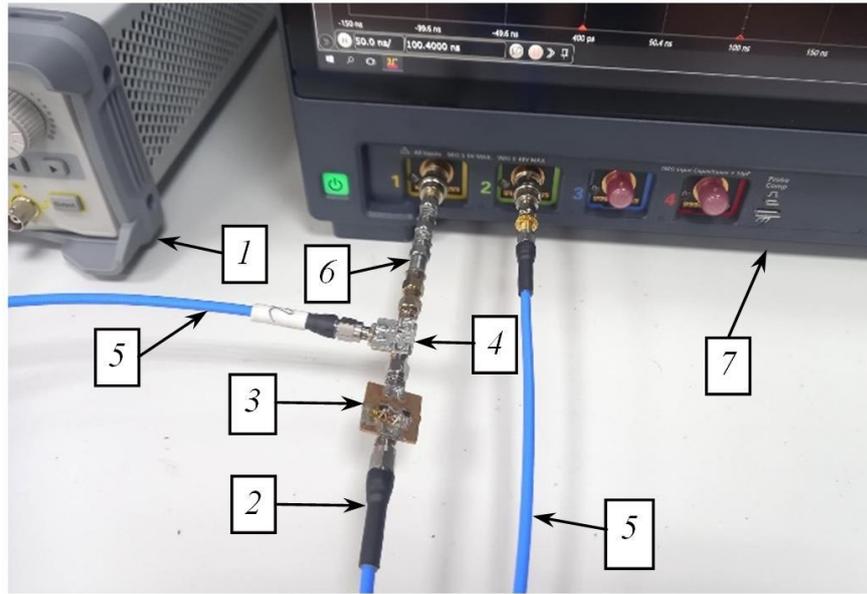


Рис. 4.

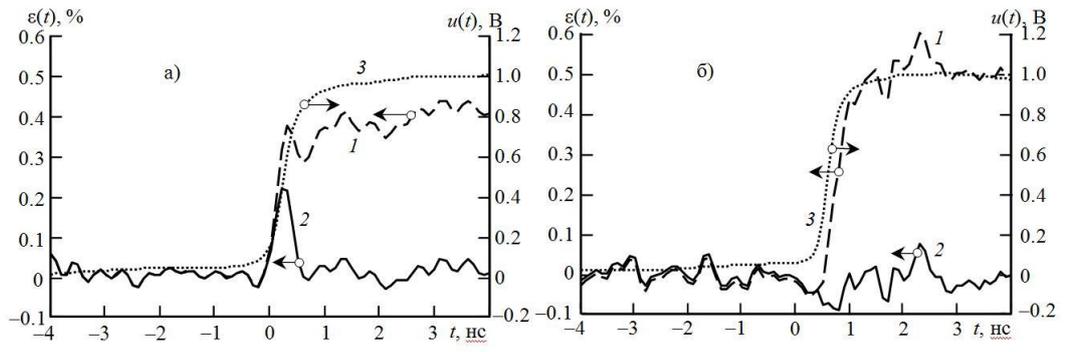


Рис. 5.