

DOI: <https://doi.org/10.30898/1684-1719.2026.8.1>

УДК: 621.396.622; 621.372.011.7

НЕЛИНЕЙНОСТЬ ШИРОКОПОЛОСНЫХ РАДИОТЕХНИЧЕСКИХ ПРЕОБРАЗОВАТЕЛЕЙ ЧАСТОТЫ

А.В. Никонов, В.А. Никонов

Омский государственный технический университет,
644050, г. Омск, пр. Мира, 11

Статья поступила в редакцию 1 мая 2026 г.

Аннотация. Приведены результаты исследования нелинейности передаточной характеристики широкополосных преобразователей частоты, применяемых для переноса информации в область сигналов низких частот. Целью работы является снижение затрат и погрешности при определении значения нелинейности путем применения предложенного статистического способа. Представленный подход позволяет отобразить нелинейность как изменение статистических показателей выходного сигнала устройства в некоторое число раз при изменении привносимой погрешности на выбранный квант входного сигнала. Полученные оценки нелинейности не противоречат данным, найденным известными способами. Область применения статистического способа оценки нелинейности — радиотехнические высоко- и сверхвысокочастотные системы, а также иные устройства обработки информации.

Ключевые слова: меры центральной тенденции, передаточная характеристика, радиотехнический преобразователь частоты, нелинейность, относительное процентное смещение, амплитудная погрешность.

Финансирование: работа выполнена в рамках федерального проекта «Экономика данных и цифровая трансформация государства»: «Кадры для цифровой трансформации», грант на обеспечение обучения студентов по образовательным программам высшего образования для топ-специалистов в сфере информационных технологий на базе АНО «Аналитический центр при Правительстве Российской Федерации». ИГК по договору ИТ: 000000Ц830325Р2М0002.

Автор для переписки: Никонов Александр Васильевич, nalva@mail.ru

Введение

В радио и информационно-измерительной технике широко применяются преобразователи частоты (ПрЧ) для переноса амплитудно-фазовой информации из области электрических сигналов с частотой более 0,01–3 ГГц, в том числе и из области СВЧ, на сигналы достаточно низких частот. Дальнейшая обработка информации производится с помощью апробированных методов и типовой надежной элементной базы. Для большого класса задач важна точность переноса параметров сигналов УВЧ и СВЧ диапазонов на сигналы низкой промежуточной частоты (ПЧ). Погрешность ПрЧ во многом обуславливается нелинейным характером его передаточной (амплитудной) характеристики. С ростом частот входного сигнала нелинейность амплитудной характеристики (АХ) увеличивается, ее поведение становится непредсказуемым, а погрешность переноса информации носит случайный характер. Поэтому учет нелинейной зависимости параметров выходного сигнала ПрЧ от значения сигнала на входе является важным. Сведения о нелинейности АХ позволяют обеспечить достоверность дальнейшей обработки данных и возможность компенсации погрешности в системах и устройствах, использующих ПрЧ.

Поскольку точная оценка нелинейности АХ сложна и затратна, можно использовать принцип линеаризации для замены нелинейной характеристики ПрЧ отдельными участками, на которых существует линейная связь «выход-вход». При этом значение нелинейности определяют с помощью

прецизионных средств измерений. Разработка и исследование моделей ПрЧ также требуют подтверждение измерительным экспериментом.

Определив значение нелинейности АХ ПрЧ, такое устройство можно использовать в качестве линейного в допустимых пределах при условии, что максимальные мгновенные значения входного сигнала не выходят за пределы линейного участка. Выходное значение сигнала ПЧ будет линейно связано с входным сигналом.

1. Постановка задачи

В работе [1] описан метод определения линейности АХ. Ему присущи определенные недостатки: метод характерен большой погрешностью при малых входных напряжениях из-за недостаточной точности измерения на сигнале ПЧ. А использование схемного решения измерительного преобразователя переменного напряжения в постоянное по уровню среднеквадратичного значения имеет погрешность порядка 6 % для синусоидальных сигналов уже при частоте 150 МГц в динамическом диапазоне (ДД) 0,3–1 В.

Сложные схемные решения представлены в [2], когда линеаризация и стабилизация передаточной характеристики обеспечивается специальной вспомогательной схемой аддитивной коррекции на базе диодов Шотки и логарифмических усилителей. Это позволяет снизить нелинейность передаточной характеристики в диапазоне напряжений 1–100 В в несколько раз.

Повышение точности оценки нелинейности АХ за счет применения прецизионных измерительных средств [2] является финансово затратным и сопряжено с периодическими поверками в лицензированных метрологических организациях, имеющих эталоны с не менее чем трехкратным превышением по точности для подтверждения уровня метрологических характеристик измерительных средств. Такая процедура сложна в связи с экспериментальным определением поправочных коэффициентов и ведет к выводу поверяемых устройств из среды их использования.

В ряде работ [3–5] отражена аналитическая оценка нелинейности АХ ПрЧ, работающих в широкой полосе частот. Для представления свойств передаточной характеристики используются различные виды вольт-амперных характеристик (ВАХ) нелинейных элементов (НЭ), являющихся основой методологических подходов и схемных решений для радио- и измерительных ПрЧ. Такое решение сопряжено или с большой погрешностью оценок нелинейности АХ при использовании простой аппроксимации ВАХ НЭ, или с необходимостью разработки сложных экспериментально-вычислительных процедур для получения значений параметров каждого отдельного НЭ. И далее следуют громоздкие вычислительные процедуры, связанные с применением специального математического аппарата.

Таким образом, целесообразно разработать способ оценки нелинейности АХ широкополосных ПрЧ, позволяющий минимизировать использование дорогостоящих прецизионных средств измерения и процедур метрологической поверки.

2. Теория

2.1. Использование средств измерений

При этом подходе определение параметров ПрЧ базируется на специализированных вольтметрах переменного напряжения, выступающих как прецизионные вольтметры-эталоны первого разряда (ВЭ1Р). Первой необходимостью для измерительного эксперимента является наличие ВЭ1Р, поверенного от Государственного первичного эталона высокочастотного переменного напряжения ГЭТ 27-2009. При передаче размера высокочастотного переменного напряжения от эталона ВЭ1Р практически исключены систематические погрешности из-за рассогласования тракта передачи сигнала [2].

Широкополосными ВЭ1Р могут служить приборы ВЗ-49 и ВЗ-63, прошедшие дополнительную поверку и калибровку на государственном эталоне ГЭТ-27-2009. В этом случае вольтметрам, прошедшим индивидуальную поверку

и калибровку, назначаются индивидуальные поправочные коэффициенты для конкретного экземпляра прибора.

Значимость индивидуальной поверки отражается на повышенных частотах: частотная погрешность проявляется уже при 30–50 МГц и достигает минус 5–10 % при сигналах с частотой 400–600 МГц [2]. Из-за проявления резонанса у диодного пробника вольтметра на частоте примерно 2,5 ГГц, погрешность становится положительной и лежит в интервале 10–20 % для сигналов частотой 1–1,5 ГГц. Это указывает на обязательное экспериментальное определение поправочных коэффициентов.

Более позднее поколение вольтметров (представитель В7-83) имеют улучшенные точностные параметры, но также нуждаются в индивидуальной поверке при использовании в качестве образцового средства измерений первого разряда (ОСИ1Р). Применение этих вольтметров без метрологической поверки характерно тем, что у их амплитудных детекторов на диодах Шоттки частотная погрешность возникает при частотах от 100–400 МГц и слабо зависит от уровня сигнала [2], достигая значения ± 12 % на частоте 1,5 ГГц.

Поэтому данные средства измерений используются как ОСИ1Р только после индивидуальной поверки и калибровки на эталоне ГЭТ 27-2009. Поправочные множители, полученные при калибровке, вносятся в память контроллера вольтметра. При использовании вольтметра как ОСИ1Р, по команде оператора и информации о частоте сигнала, поправки автоматически вносятся в показания В7-83. Такой способ применения измерителя позволяет уменьшить нормированные значения погрешности в высокочастотной области – на частоте 1 ГГц до ± 1 –1,7 %.

Но даже при наличии поверенного широкополосного измерителя напряжения, возникает задача его подключения в измерительную схему для оценки нелинейности АХ ПрЧ. Минимизировать погрешность стыковки возможно лишь в условиях индивидуальной поверки на эталоне ГЭТ 27-2009, когда применяется специальный выносной высокочастотный пробник: такая реализация подключения не использует дополнительные кабели, тройники

и переходы. Пробник и измеритель эталона включены в одно и то же сечение коаксиального тракта.

Поэтому при определении нелинейности АХ ПрЧ среднеквадратичное значение погрешности оценки напряжения на входе тракта $\sigma_{U_{ВХ}}$ будет определяться погрешностью рабочего средства измерения (РСИ) $\sigma_{U_{РСИ}}$ (например, вольтметра В7-83), погрешностью из-за коэффициента стоячей волны напряжения (КСВН) согласованного тройника $\sigma_{U_{КСВН}}$ и погрешностью по выходу тракта σ_K .

Входы вольтметра и ПрЧ связаны с тройником линиями, выходное напряжение $U_{ВЫХ}$ которых в коэффициент передачи K меньше напряжения на входе. Значение K меньше единицы из-за согласованного тройника. Напряжения на входе ПрЧ и на входе вольтметра уменьшаются в K раз по отношению к напряжению на входе тройника $U_{ВХ}$ (при условии идентичности линий связи). Погрешность $\sigma_{U_{ВЫХ}}$ определения напряжения на входе вольтметра и ПрЧ, учитывая, что знаки составляющих погрешности $\sigma_{U_{ВЫХ}}$ неизвестны, находится геометрическим суммированием согласно формулы (1):

$$\sigma_{U_{ВЫХ}} = \sqrt{\sigma_{U_{КСВН}}^2 + \sigma_K^2 + \sigma_{U_{РСИ}}^2} . \quad (1)$$

Оценку погрешности $\sigma_{КСВН}$, по данным [4, 6], можно принять 1 % как наилучшее значение, а погрешность за счет коэффициента передачи тракта составит не менее 2–5 %. Погрешность $\sigma_{U_{ВЫХ}}$ оценки напряжения на входе тракта с помощью вольтметра В7-83 в верхней части частотного диапазона, без учета погрешности за счет подключения этого вольтметра, достигает ± 12 % на частоте 1,5 ГГц . Получим значение $\sigma_{U_{ВЫХ}} \approx \pm 13$ %.

Приведенный анализ говорит о высокой сложности и затратности применения современных ОСИ1Р и РСИ для достоверного определения параметров АХ ПрЧ в широком частотном диапазоне, связанной с генерацией и измерением переменных напряжений.

2.2 Использование моделей

ПрЧ строятся с применением нелинейных элементов, за счет которых реализуется принцип трансформации спектра в гетеродинных, ключевых и стробоскопических реализациях. Модель ПрЧ а основе НЭ позволяет сделать суждение как о нелинейности передаточной характеристики, так и составить математическое выражение, описывающее связь «выход-вход» устройства. Использование модели дает возможность провести параметрическую оптимизацию ПрЧ.

В информационных источниках существуют различные варианты описания ВАХ НЭ – от простых до очень сложных, что определяет возможность и степень их использования для практической оценки нелинейности устройства. Для аппроксимации ВАХ НЭ существует много способов, каждый из которых имеет собственный оригинальный подход для представления выходного сигнала устройства при (обычно) имеющемся табличном представлении данных «выход-вход» [7]. Часто используют представление полиномиальным рядом при конечном числе его членов. Такие подходы не отражают явным способом связь сигналов на входе и выходе с учетом физических свойств и параметров компонентов электрических цепей, поскольку рассматривают ПрЧ с НЭ как безынерционный нелинейный преобразователь.

В [5] показано широко используемое математическое описание тока через НЭ в зависимости от приложенного напряжения, построенное на уравнении Шотки с явным учетом падения напряжения на сопротивлении базы НЭ, выражение (2):

$$i_{\text{НЭ}} = I_0 \left[e^{\lambda(u_{\text{НЭ}} - r_{\text{Б}} i_{\text{НЭ}})} - 1 \right], \quad (2)$$

где I_0 – обратный ток (тепловой) через полупроводниковый переход НЭ при напряжении на нем, равном нулю; $r_{\text{Б}}$ – сопротивление базы полупроводникового элемента. Величину λ образует произведение коэффициента идеальности (конструктивная характеристика диода, колеблется от 1 до 2 в зависимости от резкости p - n -перехода, уровня легирования, и т.п.)

и теплового потенциала $\varphi_T = 25$ мВ. Значение λ находится в пределах примерно 20–40 В⁻¹.

Простой вид уравнения (2) позволяет использовать его для задач, допускающих большие погрешности при параметрическом исследовании ПрЧ, так как учитывается лишь один параметр и никак не отражается инерционность НЭ, что важно для диапазонов ОВЧ–УВЧ–СВЧ. Такое представление теоретической ВАХ p - n -перехода не отражает ни генерации, ни рекомбинации зарядов. К тому же, достоверное значение коэффициента идеальности, которое индивидуально для каждого отдельного элемента, получить сложно – нужно проводить дополнительные исследования.

Коэффициент идеальности p - n -перехода находится при представлении тока НЭ в работе [4]. Здесь эквивалентная ВАХ НЭ учитывает влияние внутренних сопротивлений источников сигналов на работу ПрЧ путем решения трансцендентных уравнений. Но сами уравнения предполагают знание коэффициента крутизны λ для ВАХ, которое должно быть определено индивидуально измерительным экспериментом. И эта модель также представляет НЭ безынерционным компонентом.

Сложные модели нелинейных устройств СВЧ рассмотрены в [8] с целью определения влияния нелинейности на их характеристики. Общий принцип у этих моделей – представление устройства нелинейной и линейной частями. Сигналы в узлах стыковки линейной и нелинейной частей определяются с использованием законов Кирхгофа. Но представление нелинейной части модели на СВЧ сопряжено с большим количеством неизвестных факторов влияния на сигнал в различных точках схем, особенно при больших уровнях сигналов.

В этой работе в ходе исследования нелинейности СВЧ устройств рассмотрены механизм и результаты воздействия гармоник с большими амплитудами попеременно на входные и выходные точки нелинейной части.

По данным измерений получена характеристика взаимосвязи между гармониками различных частот, отражающая нелинейность устройства. Затем

по амплитуде и фазе сигналов на основной частоте и частотах гармоник строится матрица преобразования, описывающая нелинейную характеристику.

В результате проведенного исследования, в [8] автор работы указал, что матрица преобразования характеризует нелинейные СВЧ-устройства лишь при работе на малом уровне входного сигнала и не работоспособна в полном ДД. Причиной являются неизвестные факторы схем, влияющие на параметры модели – значения членов матрицы, характеризующие вторую гармонику сигнала и комбинационные составляющие, **носят случайный характер**. Следует с большой осторожностью линеаризовать СВЧ устройство, так как наблюдается нелинейное поведение матрицы преобразования даже в небольшой области.

Нелинейность АХ может быть определена двухсигнальным методом [9], но при нелинейности менее 3–4 % начинает расти погрешность оценки из-за увеличивающегося влияния составляющих высоких порядков полиномиальной аппроксимации ВАХ НЭ степенным рядом Тейлора.

Увеличение точности оценки нелинейности достигается применением функций Бесселя мнимого аргумента при определении токов и гармоник для экспоненциальной аппроксимации характеристики НЭ. В [4] показано решение задачи получения аналитических выражений на основе полиномиальной и экспоненциальной аппроксимаций для определения нелинейности АХ гетеродинных преобразователей частоты (ГПЧ). Так для кольцевого диодного смесителя, с учетом суммы r сопротивлений базы диода и внутренних сопротивлений источника сигнала гетеродина и источника входного сигнала при амплитуде гетеродина $U_{mГ}$ и входного сигнала U_{mC} , нелинейность АХ $\gamma_{КДС}$ определяется выражением (3):

$$\gamma_{КДС} = \frac{U_{mC}^2 \lambda^2 \left[1 - 8\lambda r I_0 + 6(\lambda r I_0)^2 \right] \cdot 100 \%}{8(1 + \lambda r I_0)^5 + U_{mГ}^2 \lambda^2 \left[1 - 8\lambda r I_0 + 6(\lambda r I_0)^2 \right]}. \quad (3)$$

Для высоких частот, когда сложно выполнить условие электрической симметрии смесителя в ПрЧ, в [4] определена нелинейность АХ балансного преобразователя на встречно-параллельных диодах (ВПД) $\gamma_{ВПД}$, для которого

в уравнении ВАХ отсутствуют члены с четными степенями. В формуле (4) для нелинейности $\gamma_{\text{ВПД}}$, присутствует величина λ_1 – крутизна эквивалентной ВАХ диода, учитывающая внутренние сопротивления источников гетеродина и сигнала, а сама формула получена путем разложения токов ячеек диодов по модифицированным функциям Бесселя $B_n(D)$:

$$\gamma_{\text{ВПД}} = \left\{ \left[2B_1(\lambda_1 U_{mc}) / \lambda_1 U_{mc} \right] - 1 \right\} 100 \%. \quad (4)$$

Для определения значения λ_1 использована экспоненциальная ВАХ диодов и уравнения (5):

$$I_0 \cong I_1; \lambda_1 = \lambda - \frac{\lambda I_0 r}{u_{\Gamma \text{ MAX}}} \exp \lambda_1 U_{m\Gamma} - \frac{\lambda I_0 r}{u_{\Gamma \text{ MAX}}}. \quad (5)$$

Также, для двухтактного смесителя на биполярных транзисторах, с применением экспоненциальной аппроксимации ВАХ эмиттерного перехода и разложением в ряд Маклорена нормированного приращения тока транзистора относительно тока эмиттера в рабочей точке $I_{\text{ЭР}}$, в [4] получено выражение (6) для нелинейности АХ $\gamma_{\text{ДГ}}$:

$$\gamma_{\text{ДГ}} = \frac{(1/\varphi_T)^2 (1 + 6\rho^2 - 8\rho) U_{mc}^2}{8(1 + \rho^4) + (1/\varphi_T)^2 (1 + 6\rho^2 - 8\rho) U_{m\Gamma}^2} 100 \%, \quad (6)$$

где $\rho = (1/\varphi_T) R I_{\text{ЭР}}$ – линеаризующий параметр; R – сумма линеаризующих сопротивлений в цепи эмиттерного перехода.

Из выводов в [8] и выражений (4–6) видно, что высокая достигаемая точность определения нелинейности АХ широкополосных ПрЧ требует достоверного знания значений коэффициентов идеальности для каждого в отдельности НЭ, амплитуд входного сигнала и сигнала гетеродина, что сопряжено с проведением дополнительных экспериментальных исследований и наличием прецизионных средств измерения. Но это совершенно не приемлемо в эксплуатационной среде, так как потребует вывода устройств из технологических процессов и проведения дорогостоящих измерительных, в том числе и поверочных работ.

Таким образом, с повышением частоты сигналов на входах ПрЧ, для линейаризации его амплитудной характеристики необходимо использовать апробированные модели с параметрами, имеющими достоверную функциональную связь с аспектами, учитываемыми в модели. К моделям НЭ, учитывающим свойства современной дискретной элементной базы и работающим в области частот до 3–5 ГГц, можно отнести показанные в [3, 10]. Эти модели фактически отражают параметры НЭ как дискретного компонента (рис. 1), обладающего паразитными индуктивностью L и межвыводной емкостью C_1 , барьерной емкостью C_B и сопротивлением базы r_D НЭ.

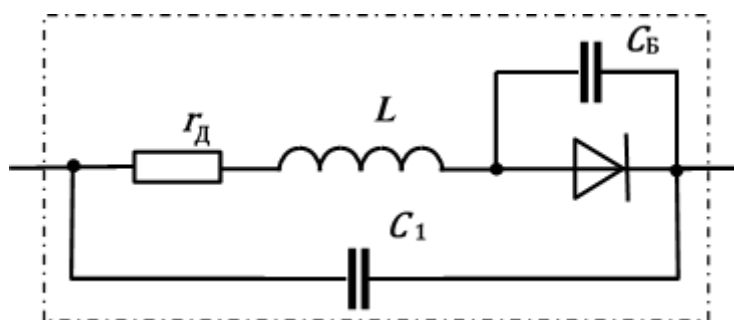


Рис. 1. Эквивалентная схема НЭ.

Для этой модели, также, как и в [5], нужны достоверные знания о параметрах элементов, входящих в ее схему. Исследование поведения НЭ с использованием данной модели и с применением к ней параметров современных дискретных полупроводниковых УВЧ компонентов с барьером Шотки показало [4, 6, 10], что она работоспособна до частот 3–5 ГГц, когда начинают проявляться собственные резонансные свойства модели.

2.3 Статистический подход

В [2] указано, что в процессе эксплуатации средств измерений систематическая частотная погрешность, которую нужно учитывать, может изменяться, и эти изменения во многом случайны – изменения пропорциональны значению исходной погрешности, которая различна для экземпляров ПрЧ. Значения систематической частотной погрешности влияют на вероятность поддержания параметров ПрЧ в ходе эксплуатации.

В [8] отмечается, что передаточная характеристика НЭ в области УВЧ–СВЧ носит случайный характер. Поэтому целесообразно рассмотреть статистический подход к оценке нелинейности передаточной характеристики широкополосного ПрЧ. Суть способа применения мер центральной тенденции статистики многократных наблюдений для оценки параметров устройств показана в [11].

Собственно нелинейность обычно определяют как дифференциальную крутизну [12] в виде первой производной от передаточной характеристики, т.е. как дифференциальную крутизну характеристики в рабочей точке. Теоретическая оценка и практическое применение этого определения в области СВЧ через высокоточное задание приращений сигнала на входе ПрЧ с последующим измерением их же на выходе, как реакции с фактором воздействия в виде нелинейности АХ, на структурном уровне изложено в [13, 14].

Но чтобы избавиться от перманентного применения прецизионных средств измерения, нужно значения статистических показателей, зафиксированных при настройке ПрЧ, сравнить со значениями показателей, рассчитанными по данным мониторинга за эксплуатационный период, интересующий пользователя. Такой мониторинг содержит информацию о параметрах устройства, т.к. имеется функциональная связь между значениями статистических показателей и параметрами показателей статистики, полученными в ходе отладки при изготовлении ПрЧ. Устройство не выводится из рабочего процесса для метрологической поверки.

Рассматривая вариацию расхождений значений статистических показателей на входе и выходе ПрЧ, рис. 2 и рис. 3, можно говорить о появлении погрешности, что проявляется в изменении нелинейности передаточной характеристики и отражает ее поведение.

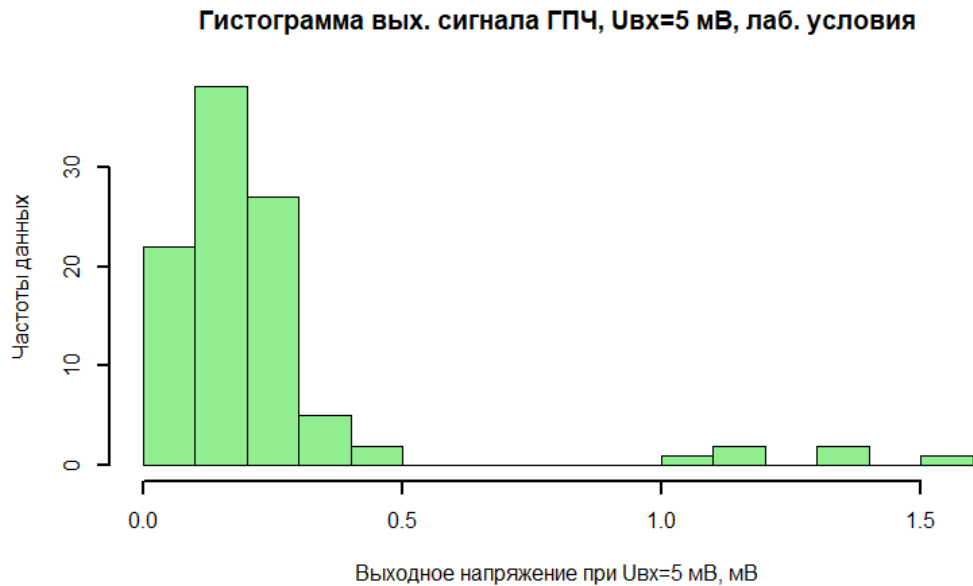


Рис. 2. Выходной сигнал ГПЧ: разброс значений выходного сигнала при лабораторных испытаниях $u_{вх} = 5$ мВ и $f_c = 500$ МГц.

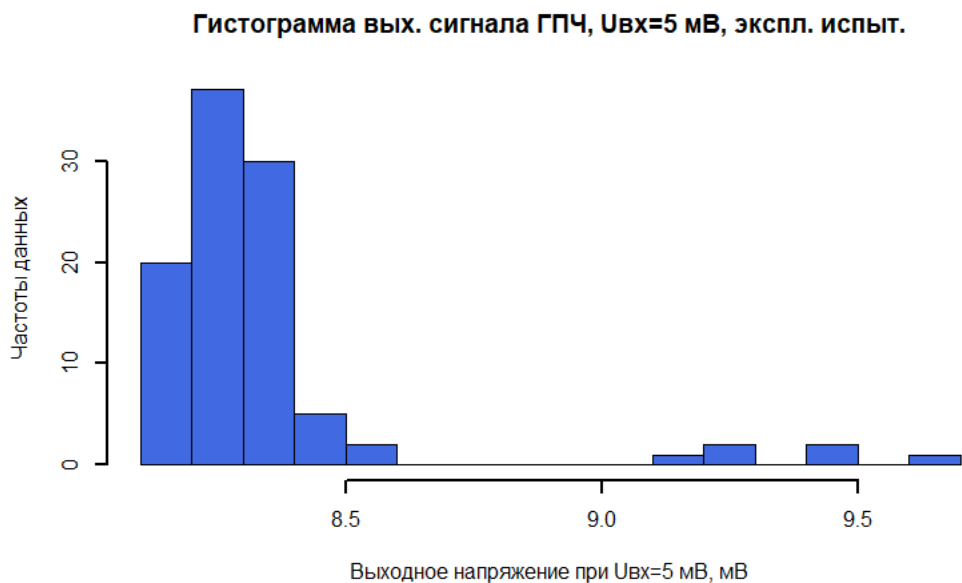


Рис. 3. Выходной сигнал ГПЧ: разброс значений выходного сигнала при эксплуатационных испытаниях $u_{вх} = 5$ мВ и $f_c = 500$ МГц.

Оценивая результаты мониторинга входных и выходных данных преобразователей частоты, можно указать на наличие фактора, оказывающего максимальное воздействие на коэффициент передачи ПРЧ, то есть определяющего дифференциальную крутизну передаточной характеристики. Этот фактор в наивысшей степени связан с максимумом плотности вероятности частоты данных в статистической выборке.

В ходе исследования для выборочных совокупностей данных были определены значения максимумов плотности вероятности частоты Мч данных, взятые как при настройке ПрЧ (Мч_{ЛАБ}), так и полученные в ходе мониторинга (Мч_{ЭКС}). Полученные данные обрабатывались в среде R для статистической обработки. Максимум плотности вероятности частоты Мч данных в статистической выборке определялся использованием функции среды R:

density(name)\$x[which.max(name)\$y)].

Исследование смещений мер центральной тенденции относительно значений Мч_{ЭКС} и Мч_{ЛАБ}, взятых в процентном выражении, показало их резкое отличие (в условиях настройки и в условиях дальнейшего применения) из-за погрешности, вносимой ПрЧ. Это подтверждается метрологической оценкой смещений. Например, при сигнале на входе ПрЧ 5 мВ на частоте 500 МГц получены значения Мч_{5ЭКС} = 8,28439 мВ и Мч_{5ЛАБ} = 0,1743896 мВ, а также значения среднего М_{ЭКС} = 8,3519 мВ и М_{ЛАБ} = 0,2419 мВ. При этом, смещение среднего при настройке С_{М5Л} = – 0,0675104 мВ (в процентах смещение равно минус 38,7124 %), смещение среднего в ходе эксплуатации С_{М5Э} = – 0,06751 мВ (в процентах отличие составляет минус 0,8083191 %).

Большое количество значащих цифр в дробной части чисел взято в связи с высокоточными измерениями с использованием аттестованных прецизионных измерительных средств.

Значение «показателя нелинейности АХ» определено расчетом относительного процентного смещения (ОПСм) конкретной статистической меры центральной тенденции (в данном случае – среднего значения) относительно максимумов плотности вероятности частоты при выпуске устройства, и затем в ходе его применения. Для описываемого образца ПрЧ значение ОПСм равно:

$$\begin{aligned} \{(100/\text{Мч}_{5\text{ЛАБ}}) \cdot \text{С}_{\text{М5Л}} [\%] &= (100/0,1743896) \cdot (-0,0675104) = -38,7124 \%\} : \\ : \{(100/\text{Мч}_{5\text{ЭКС}}) \cdot \text{С}_{\text{М5Э}} [\%] &= (100/8.28439) \cdot (-0,06751) = -0,8149061 \%\} = \\ &= -38,7124/(-0,8149061) = 47,50535 \text{ раза.} \end{aligned} \quad (7)$$

Полученное значение отнесем к разности значений средних при настройке и при использовании, получив таким образом «показатель нелинейности АХ» He_{AX} :

$$He_{AX} = 47.50535 / \{M_{ЭКС} - M_{ЛАБ} = 8,3519 - 0,2419 = 8,11 \text{ мВ}\} = 5,857626 [\text{раз/мВ}] = 5,857626 \text{ мВ}^{-1}. \quad (8)$$

3. Результаты экспериментов

Структура измерительного комплекса для проверки АХ ПрЧ приведена на рис. 4. Основные теоретические положения проверены экспериментально на макетах и отдельных образцах опытных изделий. Приборы, определяющие точность измерений – широкополосный аттенюатор 2 и широкополосный вольтметр номинального уровня напряжения 7 – прошли испытания и аттестованы в органах Госстандарта Сибирском научно-исследовательском институте метрологии (СНИИМ) и Всероссийском научно-исследовательском институте метрологии им. Д.И. Менделеева (ВНИИМ) в ходе проведения НИР [6] для диапазона частот 1 МГц – 1 ГГц и диапазона амплитуд 1 мВ – 3 В. Экспериментально были проверены линейность АХ преобразователей частоты, ее зависимость от параметров смесителя и управляющего сигнала, частотные свойства.

Относительное процентное смещение мер центральной тенденции (здесь значений среднего) относительно величин $M_{ЧЭКС}$ и $M_{ЧЛАБ}$ приведено в табл. 1. Для исследованного образца ПрЧ кратность процентных смещений достигла 47 (в таблице величина ОПС_М). Оценка погрешности номинального коэффициента передачи ПрЧ $\Delta K_{ПрЧ}$ в ходе эксплуатации также показана в табл. 1 и отражена на рис. 5.

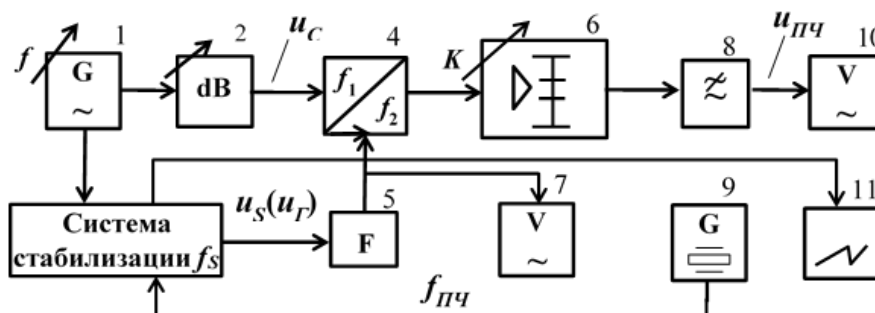


Рис. 4. Структура измерительного комплекса для проверки АХ ПрЧ.

Данные в табл. 1 приведены для образца ПрЧ, исследованного в ДД 40 дБ на частоте 0,5 ГГц. Минимальное значение входного гармонического сигнала 5 мВ. Проявление механизма возникновения процентных отличий, связанного с показателем нелинейности передаточной характеристики ПрЧ, с позиции изменения выходного сигнала в некоторое число раз при изменении входного сигнала на один милливольт, показано как величина He_{AX} .

Таблица 1. Показатели нелинейности ГПЧ на частоте 0,5 ГГц

Напряжение на входе, мВ	Мч _{ЭКС} , мВ	С _{ММЭ} , мВ (%)	Мч _{ЛАБ} , мВ	С _{ММЭЛ} , мВ (%)	ОПСм, раз	He _{AX} , мВ ⁻¹	ΔK _{ПрЧ} , мВ
5	8,28439	минус 0,06751 (минус 0,8149061)	0,1743896	Минус 0,0675104 (минус 38,7124)	47,50535	5,857626	8,11
100	13,96715	минус 2,092851 (минус 14,98409)	5,987154	минус 2,092846 (минус 34,95561)	2,332848	0,2923368	7,98
300	52,5865	1,4505 (2,758312)	44,7065	1,4505 (3,244495)	1,176261	0,1492717	7,88
500	62,76608	4,19808 (6,688453)	54,53608	4,19808 (7,697803)	1,150909	0,1398431	8,23

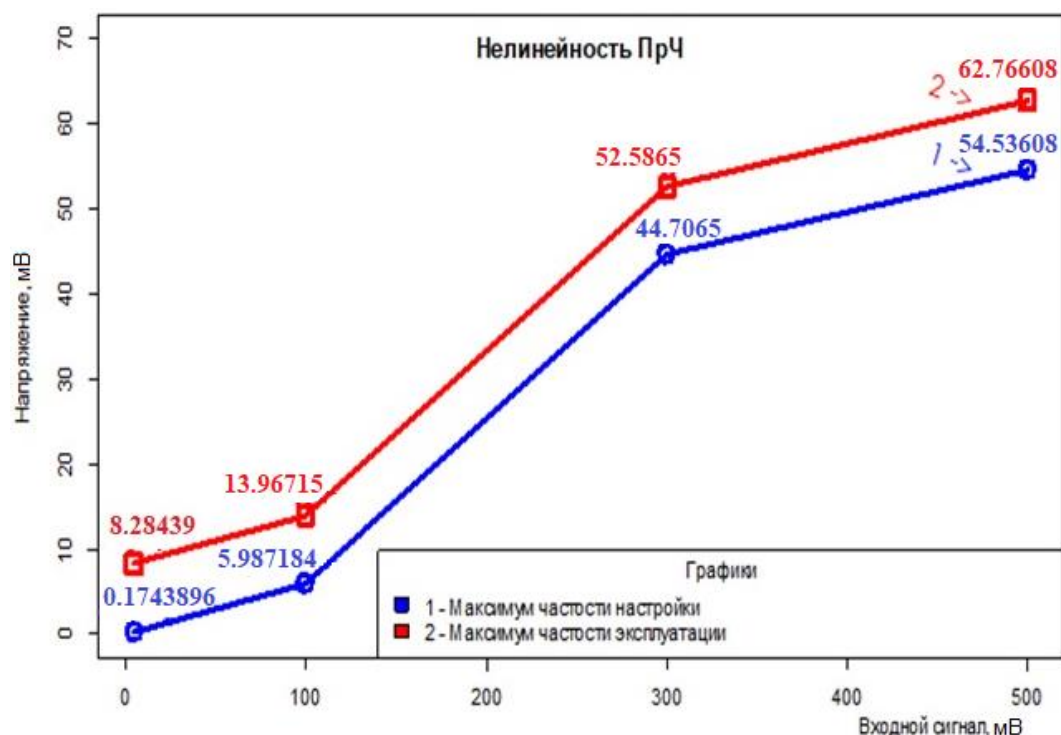


Рис. 5. Передаточная характеристика диодного ГПЧ.

Поведение среднего, определяющего значение показателя нелинейности He_{AX} передаточной характеристики ПрЧ, представлено на рис. 6. Рассмотрение проведено относительно некоторого условного идеального ПрЧ, для которого график передаточной характеристики представляет прямую линию, проходящую под углом 45° к оси абсцисс. То есть, идеальный ПрЧ имеет коэффициент

передачи, равный единице, на любой частоте и при любом уровне входного сигнала в ДД.

У данного образца различный коэффициент передачи по ДД, и в ходе настройки (при оценке по значению $M_{\text{ЧЛАБ}}$) составил: 0,03487792 при входном сигнале 5 мВ; 0,05987154 при входном сигнале 100 мВ; 0,1490217 при входном сигнале 300 мВ и 0,1817869 когда на входе 500 мВ.

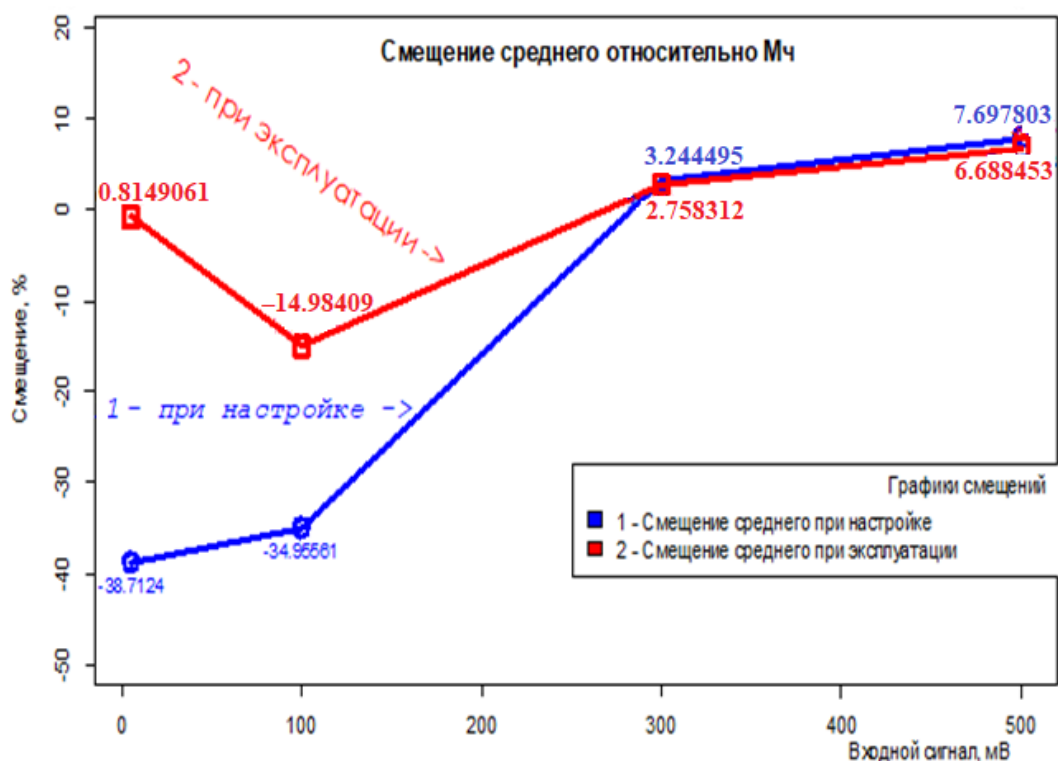


Рис. 6. Смещение среднего в ДД относительно максимума частоты.

4. Обсуждение экспериментов

У описываемого образца ГПЧ кратность процентных смещений достигла 47 (табл. 1), что связано с появлением погрешности номинального коэффициента передачи $\Delta K_{\text{ГПЧ}}$ в ходе эксплуатации. Данная погрешность незначительно изменялась в различных точках ДД, рис. 5. Причем, уменьшение процентного смещения значений мер с ростом входного сигнала в ходе эксплуатации указывает на аддитивную погрешность.

Значительное отличие процентных смещений при настройке и при мониторинге (минус 38,7124 % и минус 0,8149061 %) – в 47,50535 раза при входном сигнале 5 мВ – обусловлено дестабилизирующим фактором,

вызвавшим изменение сигнала на выходе ПрЧ в сторону увеличения. С ростом входного сигнала растет значение $M_{\text{ЧЭКС}}$ и, соответственно, величина процентного смещения уменьшается, в то время как абсолютные значения смещений отличаются незначительно.

Механизм, связывающий нелинейность АХ и процентные отличия смещений, заключается в том, что процентное смещение визуально отличается очень сильно за счет обратно пропорциональной зависимости при вычислении процентов.

Нелинейность АХ явно наблюдается, когда на вход устройства последовательно подаются малые элементарные приращения входного напряжения $\Delta u_{\text{ВХ}i}$, и каждое из них будет воспроизводиться на выходе как $\Delta u_{\text{ВЫХ}i}$ с учетом аддитивной погрешности из-за коэффициента передачи в i -й точке ДД. Из-за факта нелинейности соседние значения $\Delta u_{\text{ВЫХ}i}$ и $\Delta u_{\text{ВЫХ}i+1}$ отличаются друг от друга, поскольку коэффициент передачи устройства имеет некоторые отличия по ДД. Наиболее ярко данный фактор проявляется в процентном отличии смещений, рис. 6.

Возникновение процентных отличий говорит о том, что показатель нелинейности $He_{\text{АХ}}$ передаточной характеристики ПрЧ в конкретной точке ДД – это отражение факта изменения выходного сигнала в число раз, равное $He_{\text{АХ}}$, при изменении сигнала на один милливольт.

Рассматривая непостоянство коэффициента передачи по ДД, можно отметить, что полученные значения $K_{\text{ПрЧ}}$ присущи диодным ГПЧ. У них коэффициент передачи много меньше единицы при малых значениях входного сигнала, и растет с увеличением напряжения на входе. В исследованном образце были применены диоды ДЗ11.

Величина $He_{\text{АХ}}$ диодных ГПЧ характерна тем, что велика в нижней части ДД, минимальна при сигнале примерно 50–300 мВ, и далее слабо изменяется в связи со снижением чувствительности НЭ к нарастанию входного сигнала из-за большого снижения крутизны ВАХ диодов.

Заключение

Полученные результаты позволяют сравнивать различные подходы к оценке нелинейности передаточной характеристики широкополосных преобразователей частоты. Не отвергая такие известные способы, как измерительный эксперимент или моделирование, предложенный статистический подход позволяет по-новому представить нелинейность как изменение выходного сигнала устройства в некоторое число раз при изменении входного сигнала на выбранный квант напряжения (например, параметр $HeAX$, при изменении сигнала на один милливольт).

Статистический подход имеет положительное свойство – получать данные об изменениях передаточной характеристики устройства в ходе перманентного мониторинга, что осуществляется встроенными контрольно-диагностическими узлами в современных системах, не выводя объект наблюдения из эксплуатации для метрологической поверки.

Результаты, полученные с помощью статистического подхода, не противоречат оценкам нелинейности, полученным иными способами, и подтверждают физическую природу функционирования НЭ в преобразователях частоты радиотехнических и измерительных устройств.

Оценка изменения нелинейности амплитудной характеристики ПрЧ также позволяет учесть влияние температуры и паразитных воздействий на точность переноса амплитудно-фазовой информации, что особо важно при преобразовании частоты в диапазонах ОВЧ–УВЧ–СВЧ.

Финансирование: работа выполнена в рамках федерального проекта «Экономика данных и цифровая трансформация государства»: «Кадры для цифровой трансформации», грант на обеспечение обучения студентов по образовательным программам высшего образования для топ-специалистов в сфере информационных технологий на базе АНО «Аналитический центр при Правительстве Российской Федерации». ИГК по договору ИТ: 000000Ц830325Р2М0002.

Литература

1. Дворников О., Чеховский В., Шульгевич Ю. Измерительный преобразователь для широкополосных вольтметров переменного тока // Новости науки и технологий. – 2007. – Т. 2. – №. 6. – С. 13-17.
2. Гуревич М.Л., Крестовский В.В. Широкополосные вольтметры высшей точности для поверки средств измерений ВЧ-напряжений // Электроника НТБ. – 2010. – № 5. – С. 110–114.
3. Марьев А.А. Математическая модель квадратурного стробоскопического преобразователя частоты // Известия ЮФУ. Технические науки. – 2024. – № 3. – С. 197-207. <https://doi.org/10.18522/2311-3103-2024-3-197-207>
4. Никонов А.В. Прецизионная установка амплитуды ВЧ-СВЧ сигналов. Анализ и методы решения. – 2015.
5. Микушин А.В. Дiodный смеситель. URL: <https://digteh.ru/WLL/DiodSmes.php>. – Дата публикации 29 апр. 2010 (дата обращения: 01.03.24).
6. Разработка образцового генератора-калибратора амплитуды высокочастотных сигналов: Отчет о НИР (заключит.) / Томск, институт АСУ и радиоэлектроники (ТИАСУР): Руководитель Н.С. Жилин. – 16-81: № ГР 01818006768: Инв. № 02830060529. – Томск, 1983. – 104 с.
7. Ширман Я.Д. и др. Радиоэлектронные системы: основы построения и теория. Справочник // Радиотехника. – 2007. – Т. 512.
8. Aimdilokwong A. Nonlinear device characterization using harmonic load pull measurement. – Iowa State University, 2002.
9. ГОСТ 12252-86. Радиостанции с угловой модуляцией сухопутной подвижной службы. – М.: Изд-во стандартов, 1986. – 61 с. (действующий)
10. Verspecht J. The return of the sampling frequency convertor // Conference, 2003. Fall 2003. 62nd ARFTG Microwave Measurements. – IEEE, 2003. – С. 155-164. <https://doi.org/10.1109/MIM.2005.1438751>
11. Navidi W.C. Statistics for engineers and scientists. – New York : McGraw-Hill Higher Education, 2008. – Т. 20.

12. Кудряков С.А. Радиотехнические цепи и сигналы. – С. Пб.: Изд-во «Свое Издательство», 2015. – 340 с
13. Verspecht J. et al. Linearization of large-signal scattering functions // IEEE Transactions on microwave theory and techniques. – 2005. – Т. 53. – №. 4. – С. 1369-1376. <https://doi.org/10.1109/TMTT.2005.1420768>
14. Verspecht J. Large-Signal Network Analysis «Going beyond S-parameters». – URL: <https://janverspecht.com/pdf/arftgshortcourse.pdf> (дата обращения: 27.12.2025).

Для цитирования:

Никонов А.В., Никонов В.А. Нелинейность широкополосных радиотехнических преобразователей частоты // Журнал радиоэлектроники. – 2026. – № 8 <https://doi.org/10.30898/1684-1719.2026.8.1>