Измерение углов отсечки с использованием осциллографов Rigol серии DS70000 при наличии выраженных шумов и нелинейности

Часть 2

Николай ЛЕМЕШКО,
д.т.н., гл. науч. сотр.,
АО «Корпорация «Комета»,
nlem83@mail.ru
Андрей САВКИН,
инженер по применению,
andrey.savkin@rigol.com

В статье (см. начало в ЭК6) рассматриваются подходы к измерению углов отсечки (УО) при наличии аддитивного шума (АШ) и нелинейности. Проанализированы достоинства и недостатки подхода к измерению УО, основанного на использовании функций Берга. Впервые введена классификация, и выполнено обобщение методов измерения УО во временной и частотной областях при наличии и в отсутствие нелинейности. Предложены новые, непосредственно применимые для решения практических задач, подходы к измерению УО – методы опорных функций, возведения в степень, интегрирования сигналов. С использованием средств измерений Rigol реализованы измерения УО, показавшие действенность и практическую применимость некоторых из предложенных методов.

В этой части статьи рассматриваются способы измерения и оценки УО при наличии нелинейности и АШ, практические результаты измерений для каждого из случаев, а также интерпретируются результаты.

Способы определения УО при наличии нелинейности и АШ

Наличие выраженной нелинейности кардинально меняет ситуацию с определением УО, резко ограничивая круг применимых подходов. Это определяется следующими фактами.

1. Как отмечалось выше, синусоидальный сигнал с отсечкой можно рассматривать как импульсную функцию. Известно [6], что для такового состав частотного спектра определяется значениями длительности импульсов и его периода и в известной степени мало зависит от формы импульса. Наличие заметной нелинейности, например, представленной на рис. 2 в, оказывает существенное влияние на фактическую длительность импульсов при использовании одних и тех же критериев ее оценки, что ведет к такому перераспределению энергии в спектре, которое не позволяет применять спектральный анализ для определения УО.
2. Для большинства реальных узлов, требующих оценки УО, характер нелинейности неизвестен вовсе либо информация о ней недостаточная, и в некоторых случаях она не может быть получена экспериментально. Это не позволяет применять метод опорных функций.

Исходя из этого, в случае наличия как нелинейности, так и АШ для определения УО применимы методы, перечисленные в схеме на рис. 3. Усреднение осциллограмм осуществляется точно так же, как и в предыдущем случае, при условии, что компоненты АШ не препятствуют синхронизации для совмещения осциллограмм. Фильтрация также применима, но с учетом необходимости оценки полосы сигнала по заданному критерию, поскольку зависимости на рис. 5 для рассматриваемого случая могут оказаться неприменимыми.

Метод суммирования отсчетов на периоде (МСО) предполагает элементарную математическую обротку, предполагающую построение дискретной функции вида:

$$DF(i) = \sum_{j=0}^{i} SNM_i,$$

где SNM_i – последовательно взятые отсчеты ИС s(t) + n(t). Для реализации МСО на периоде необходимо, чтобы их отношение часто-

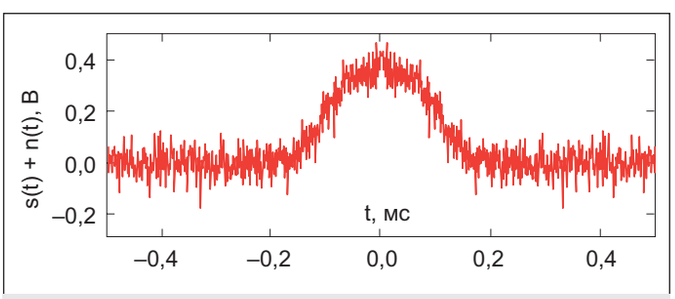

Рис. 12. График исследуемого сигнала при наличии АШ и нелинейности

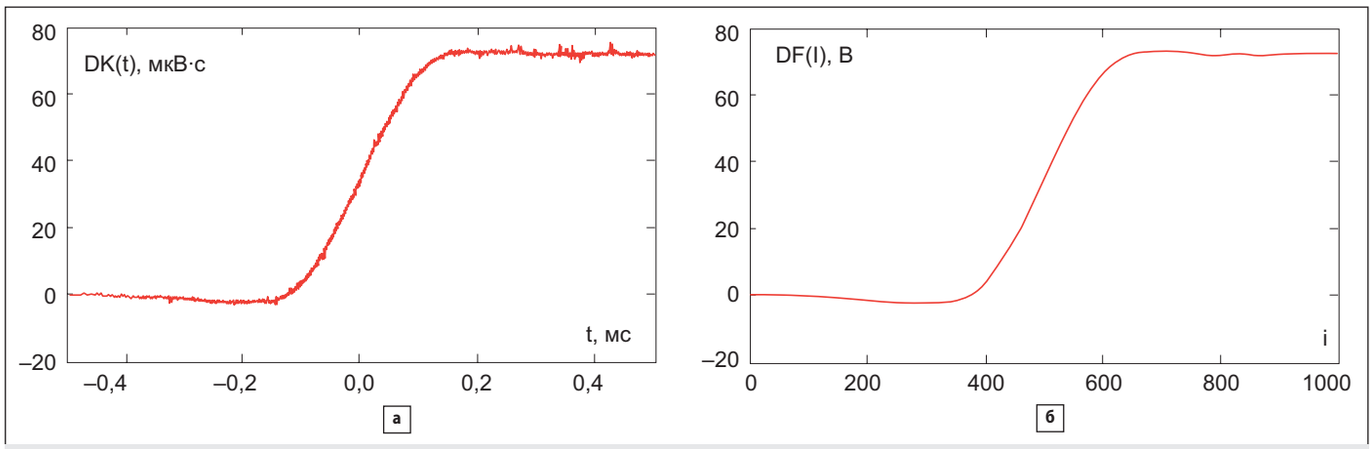

Рис. 13. Графики функций: а) DK(t); б) DF(i)

ты их взятия f_S к частоте f_1 составляло не менее нескольких сотен. Принцип МСО основан на том, что при суммировании значительного количества отсчетов их случайная составляющая, определяемая АШ, претерпевает статистическую компенсацию с уменьшением σ пропорционально корню из i. За счет этого до момента начала импульса, соответствующего s(t) и обусловленного отсечкой, значения DF(i) близки к среднему значению функции s(t) на интервале суммирования. В начале импульса прирост функции DF(i) становится настолько резким, что по нему можно определить номер «стартового» отсчета i_1. При этом статистическая компенсация АШ продолжает действовать. По завершению прироста DF(i) можно определить значение отсчета i_2, соответствующее окончанию импульса. В таком случае:

$$\tau = (i_2 - i_1)/f_S.$$

Как видно из представленного описания, МСО не предъявляет каких-либо ограничений к форме нелинейности и принципиально применим для АШ с любым симметричным распределением и нулевым математическим ожиданием.

Одним из ключевых вопросов применения МСО является оценка целесообразности использования континуальной ступенчатой функции K(t), которую можно построить на основе отсчетов SNM_i. Действительно, если отсчеты ИС взяты на интервале [–T/2; T/2], то K(t) можно определить так:

$$K(t) = SNM_{trunc((-0{,}5T + t)f_S)},$$

где оператор trunc(*) реализует функцию отбрасывания дробной части. Тогда функцию DF(i) можно заменить интегралом:

$$DK(t) = \int_{-T/2}^{t} K(t)dt.$$

Сопоставим функции DF(i) и DK(t). Пусть при θ = 60°:

$$s(t) = \begin{cases} (U_m \cos(\omega_1 t) - U_0)^{1,4}, & |\omega_1 t| \le \theta; \\ 0, & |\omega_1 t| > \theta. \end{cases} \quad (9)$$

Пусть АШ нормально распределен и имеет σ = 0,05 В, что соответствует SN = 9,4 дБ. График ИС показан на рис. 12, а на рис. 13 – графики функций DF(i) и DK(t), построенной с параметром сходимости интегрирования 10^{-5}. Как следует из их сопоставления, суммирование отсчетов приводит к получению более гладкой кривой, чем интегрирование восстановленной ступенчатой функции. Уменьшение параметра сходимости до 10^{-9} позволяет практически полностью устранить выбросы на кривой, но приводит к резкому увеличению вычислительных затрат.

Исходя из этого, переход к использованию континуальной функции K(t) не дает дополнительных преимуществ и лишь затрудняет определение τ. Следовательно, при реализации МСО интегрирование в его строгом понимании не требуется. На рис. 14 представлены графики функций s(t) + n(t), построенные при σ = 0,1 В и 0,148 В, что соответствует значениям SN = 3,4 и 0 дБ, а на рис. 15 – графики зависимостей DF(i). Согласно последним, при SN = 3,4 дБ i_1 = 362, i_2 = 663, откуда при f_S = 1 МГц τ = 0,301 мс, θ* = 54,5°. Если же SN = 0 дБ, то i_1 = 363, i_2 = 668, откуда τ = 0,306 мс, θ* = 55,1°. Как свидетельствуют результаты численных экспериментов, МОС обеспечивает погрешность измерения УО при погрешности не выше 7° при снижении SN до значений порядка –3 дБ, то есть является при всей своей простоте одним из самых эффективных.

Известно, что развитие аппаратно-программных средств осциллографов коснулось не только улучшения их выходных характеристик – полосы частот, чувствительности и точности измерений, но и возможностей математической обработки. Многие приборы высшего

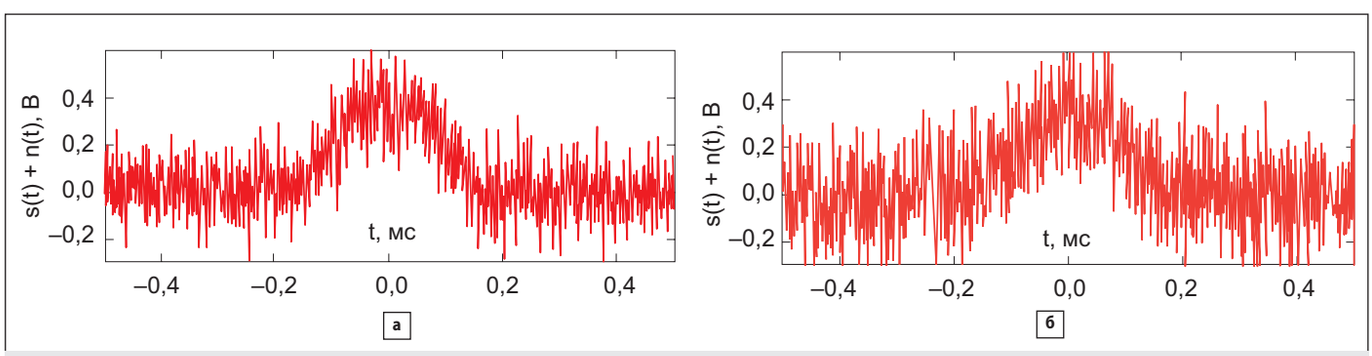

Рис. 14. Графики функции s(t) + n(t) при наличии нелинейности и АШ при: а) SN = 3,4 дБ; б) SN = 0 дБ

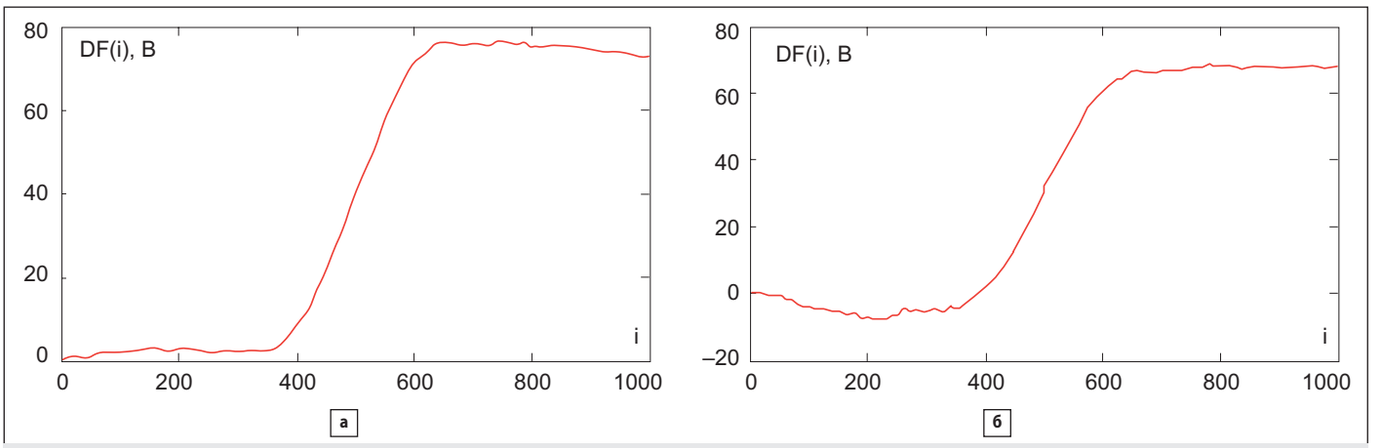

Рис. 15. Графики функции DF(i) при: а) SN = 3,4 дБ; б) SN = 0 дБ

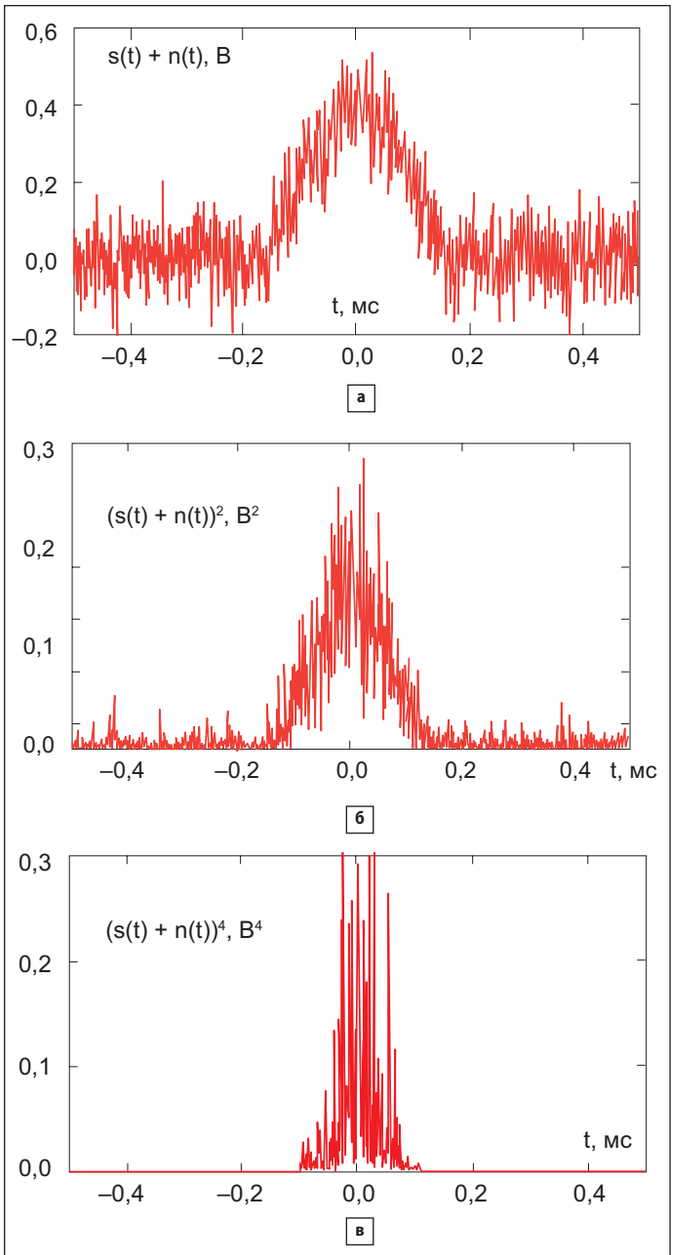

Рис. 16. Пояснение МВС (SN = 7 дБ): а) график ИС; б) ИС в квадрате; в) ИС в четвертой степени

класса позволяют выполнять над осциллограммами не только базовый набор математических действий, но и более сложные операции, включая возведение в степень. На этом основан еще один возможный подход к определению УО непосредственно по осциллограммам, причем он демонстрирует хорошие результаты при SN ≥ 7 дБ. Метод возведения в степень (МВС) базируется на том, что в области отсечки s(t) = 0 В. Вне ее ненулевое значение s (t) приводит к резкому увеличению значения функции $|s(t) + n(t)|^p$, где p > 1 – показатель степени. Такое преобразование, хоть и значительно увеличивает изрезанность ИС и превращает распределение АШ в отличное от нормального и несимметричное, «подчеркивает» точки перехода к отсечке и позволяет определить длительность τ.

На рис. 16 представлен пример для оценки значения УО при SN = 7 дБ (σ = 0,066 В). На рисунке использованы значения p = 2; 8. Измеренные по рис. 16б–в значения τ составляют соответственно 0,304 и 0,206 мс, что соответствует θ* = 54,7 и 36,7°. Первое значение близко к истинному (60°), в то время как второе, очевидно, является ошибочным. Для получения приемлемых по точности результатов необходимо, чтобы шумовая компонента в области отсечки была явно видна на графике, что в большинстве случаев обеспечивается при p ≤ 4. Дробные значения p также допускаются.

Способы суммирования отсчетов на периоде и возведения отсчетов в степень могут сочетаться друг с другом. Они применимы и в случае отсутствия нелинейности, поскольку ориентированы, как это показано выше, на поиск точек начала импульсов.

Результаты экспериментальной апробации способов определения УО при наличии АШ

Схема и средства измерений. Для демонстрации возможности некоторых из описанных выше методов измерений УО требуется формирование специфических сигналов, представляющих собой уходящий в отсечку фрагмент синусоидальной функции с нелинейностью и без таковой, а также с АШ. Поскольку такие сигналы не относятся к стандартным, и их функциональные генераторы не формируют, в качестве средства генерации исследуемых напряжений был выбран генератор сигналов произвольной формы (ГСПФ) Rigol DG5502 Pro, функциональность которого предполагает формирование сигналов по массиву созданных пользователем выборок. В свою очередь, такие массивы были сформированы в объеме 16384 отсчетов при помощи программы MathCAD. Воспроизведение синтезированных сигналов осуществлялось со скоростью 100 Мвыб/с, загрузка данных осуществлялась с ноутбука с использованием программного обеспечения UltraStation.

При проведении измерений использовались четыре сигнала:

- эталонный без АШ, имитирующий режим отсечки с θ = 90° и соответствующий (1);

- эталонный без АШ, соответствующий квадратичной нелинейности, при которой функция (1) возводится в квадрат;
- эти же сигналы, но с добавлением АШ такого уровня, который соответствует SN = 8 дБ.

В качестве средства измерений, оснащенного всеми необходимыми для данных измерений функциями вторичной обработки осциллограмм, использовался осциллограф Rigol DS 70504 с четырьмя входами и полосой рабочих частот 5 ГГц. Схема и фотография измерительной установки приведены на рис. 17, экран настроек ГСПФ при воспроизведении сигналов – на рис. 18.

Измерения углов отсечки по эталонным сигналам необходимы, чтобы определить их фактические значения в отсутствие АШ. На рис. 19 показаны осциллограммы «эталонных» сигналов, которые были получены в отсутствие АШ. Как следует из результатов автоматических измерений, для сигнала без нелинейности f_1 = 122,3 кГц, T = 8,17 мкс, τ = 4,08 мкс, θ = 89,9°, а в случае квадратичной нелинейности f_1 = 122,07 кГц,T = 8,19 мкс, τ = 3,9 мкс, θ = 85,7°. Приведенные значения углов отсечки можно считать точными. Их будем использовать для оценки результативности разных методов измерения УО при наличии АШ.

Результаты измерений УО при наличии АШ и в отсутствие нелинейности были получены с использованием усреднения осциллограмм при ограничении полосы пропускания, а также методом спектрального анализа. Осциллограмма исследуемого сигнала представлена на рис. 20. Установленные на ней вертикальные линии курсоров еще раз подчеркивают сложность выбора их точного местопо-

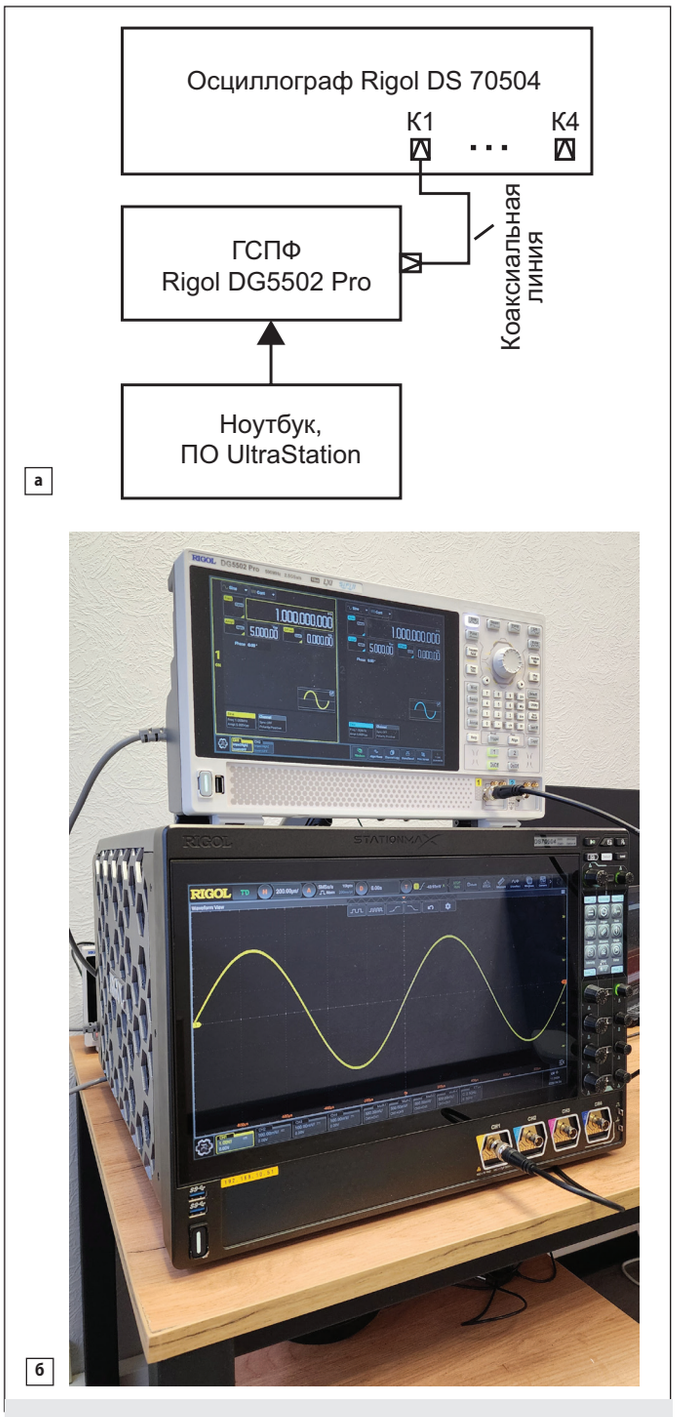

Рис. 17. Измерительная установка: а) схема; б) фотография

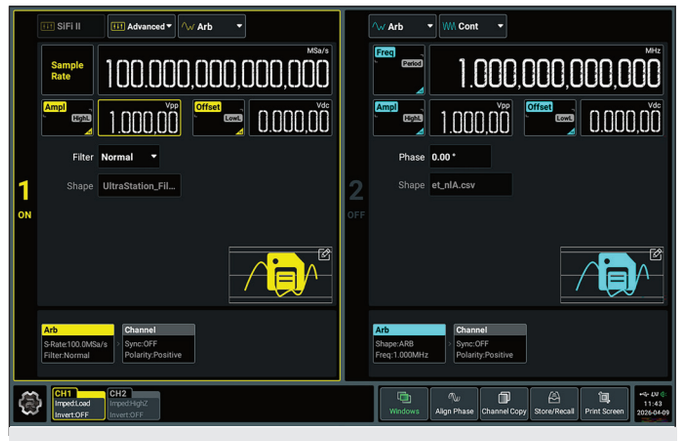

Рис. 18. Экран настроек ГСПФ Rigol DG5502 Pro

Рис. 19. Осциллограммы и результаты автоматических измерений для эталонного сигнала: а) нелинейность отсутствует; б) с квадратичной нелинейностью

ложения. При выбранном отношении SN погрешность измерений УО может составить до 30°, что неприемлемо для большинства имеющих практическое значение задач.

На рис. 21а представлены результаты курсорных измерений, полученные при усреднении осциллограмм по 1024 реализациям. Сопоставление осциллограммы с рис. 20 позволяет сделать вывод о примерно десятикратном снижении варьирования значений из-за наложенного АШ, что позволяет выставить курсоры должным образом. В данном случае $\tau^* = 4{,}13$ мкс, $\theta^* = 92{,}2°$. Заметим, что принципиальным для получения требуемого эффекта в этом случае является правильный выбор уровня синхронизации, который должен располагаться в области предельных значений зашумленного сигнала. Наличие АШ не приведет к сбою синхронизации, что позволит использовать усреднение.

На рис. 21б показана возможность ограничения полосы за счет использования фильтра нижних частот, частота среза которого выбиралась по фактическому виду отфильтрованного сигнала. Полученные значения составляют $\tau^* = 4{,}57$ мкс, $\theta^* = 103{,}8°$, то есть погрешность измерения УО превышает 10°. Этот пример свидетельствует о том, что ограничение полосы влияет и на спектральные составляющие синусоидального сигнала с отсечкой. Выбор частоты среза должен быть таким, чтобы артефакты АШ не мешали измерениям, и добиваться чрезмерной гладкости сигнала нецелесообразно.

В левой части рис. 21в представлена спектрограмма исследуемого сигнала, построенная на основе быстрого преобразования Фурье при полосе обзора 998,2 кГц, центральной частоте 502,1 кГц и полосе разрешения 7629 Гц. В правой части рисунка имеется таблица, в которой отмечены пиковые значения спектра. 1-я и 2-я гармоники исследуемого сигнала имеют уровни 197,1 и 82,98 мВ. Численное решение уравнения (4) при таких амплитудах гармоник дает $\theta^* = 90{,}3°$, что оказывается наиболее близким к точному значению УО.

Измерения УО при наличии квадратичной нелинейности и АШ выполнялись на основе обработки осциллограмм в программе MathCAD. На рис. 22 показана осциллограмма такого сигнала. Прямой отсчет значения τ^* по ней ожидаемо оказывается затрудненным. На рис. 23 приведен фрагмент этого сигнала в окрестности нулевого значения времени, а также его отсчеты с возведением их модуля в степень 1,3. Используя временную ось, можно установить, что в текущей реализации период оценивается в 7,7 мкс, $\tau^* = 3{,}4$ мкс, $\theta^* = 79{,}4°$. Таким образом, расхождение относительно 85,7° составляет 6,3°, что можно считать вполне приемлемым.

На рис. 24 показан график суммы отсчетов напряжения, совмещенный с зависимостью текущих отсчетов от их номера. Интервал нарастания суммы соответствует значениям индексов, изменяющихся в интервале 66–133, причем отсчеты взяты с шагом 50 нс. Отсюда имеем $\tau^* = 3{,}35$ мкс, $\theta^* = 78{,}2°$, то есть отклонение составляет 7,5°.

Таким образом, все методы, использованные для оценки УО сигнала с АШ и в отсутствие нелинейности, показали свою действенность. Наибольшие ожидаемые погрешности рассмотренных методов соответствуют случаям, когда у ИС имеется нелинейность.

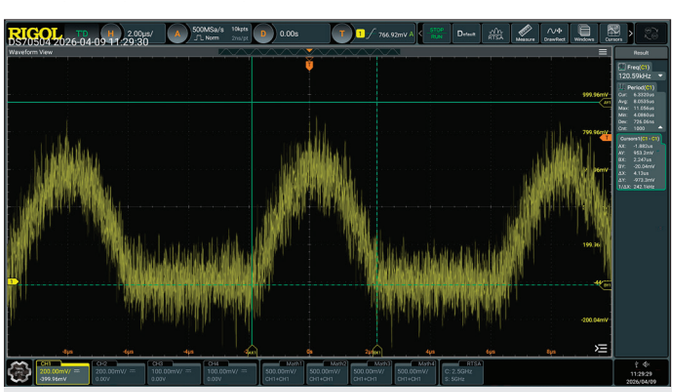

Рис. 20. Осциллограмма сигнала при наличии АШ с установленными курсорами

Рис. 21. Результаты измерений для сигнала с АШ без нелинейности при: а) использовании усреднения осциллограмм; б) использовании фильтра нижних частот; в) анализе в частотной области с использованием БПФ

Рис. 22. Осциллограмма сигнала с квадратичной нелинейностью и АШ

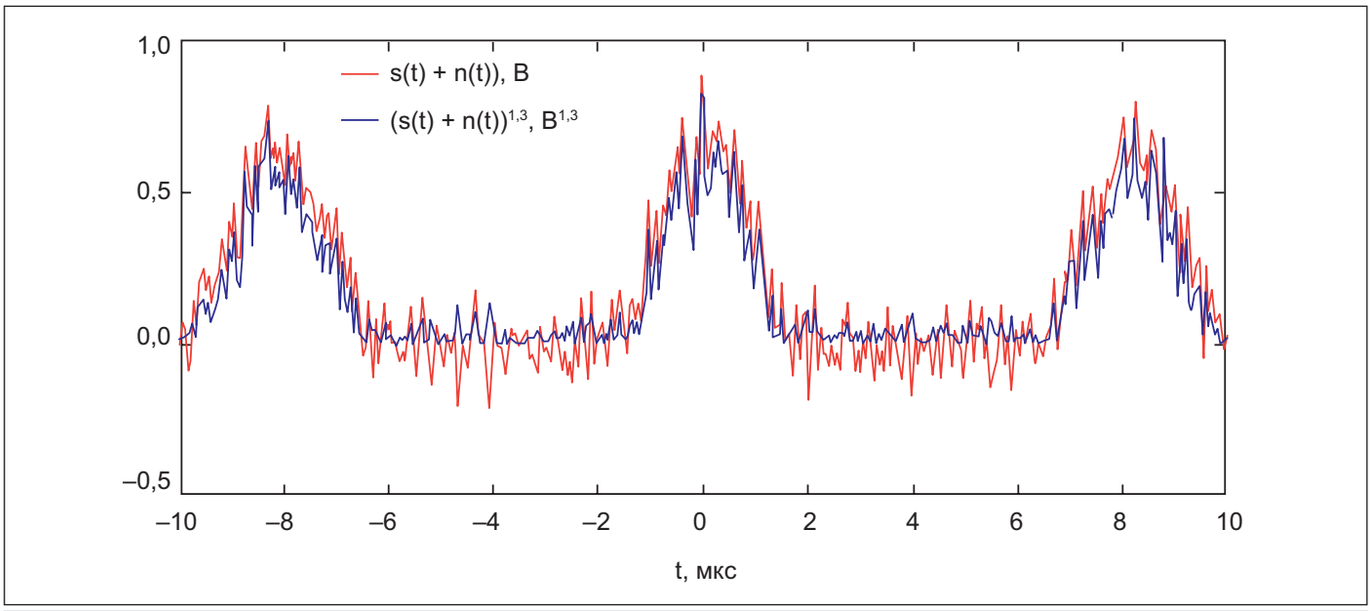

Рис. 23. Результат возведения ИС в степень 1,3

Выводы

Как было показано, задача измерений углов отсечки может быть с успехом решена при наличии аддитивного шума. Проведение таких измерений обеспечивает оптимальную настройку радиочастотных трактов и тем самым повышает выходные характеристики радиотехнических систем.

Ключевым элементом обеспечения высокого качества результатов измерений является использование средств, отличающихся надлежащей реализацией измерительных функций, поскольку любая последующая обработка основана на массивах данных для построения осциллограмм. Как свидетельствуют полученные результаты, осциллографы Rigol серии DS70000 применимы ля реализации любых способов измерения углов отсечки, включая базирующиеся на спектральном анализе. Имеющиеся у этих приборов базовые функции автоматических измерений существенно ускоряют экспериментальную оценку углов отсечки, которые при внешнем управлении приборами могут измеряться полностью автоматически, что существенно снижает трудоемкость процедуры при массовом тестировании радиоэлектронных узлов.

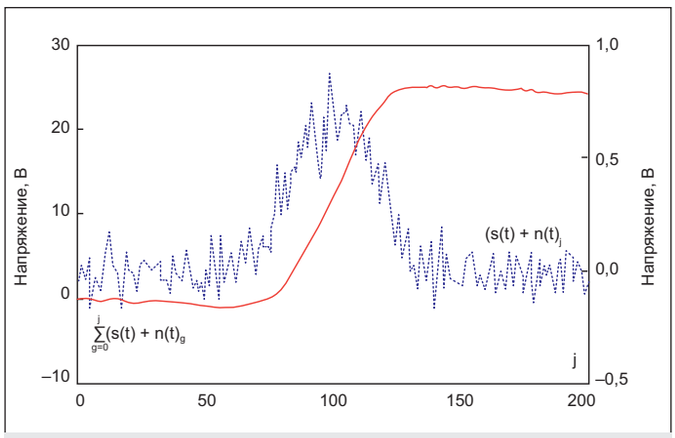

Рис. 24. Результат суммирования отсчетов для сигнала с квадратичной нелинейностью

Литература

1. Бузов А. Л., Быховский М. А., Васехо Н. В. Управление радиочастотным спектром и электромагнитная совместимость радиосистем. Под ред. Быховского М. А. М. Экотрендз. 2006.
2. Баскаков С. И. Радиотехнические цепи и сигналы. М. Высшая школа. 2003.
3. Радиотехника. Энциклопедия. Под ред. Маззора Ю. Л., Мачусского Е. А., Правды В. И. М. ДМКПресс. 2016.
4. Раушер К., Йанессен Ф., Минихольд Р. Основы спектрального анализа. Пер с англ. С. М. Смольского под ред. Ю. А. Горбенко. 4-е изд. М. Навигатор. 2021..
5. Скляр Б. Цифровая связь. Теоретические основы и практическое применение. 2-е изд. Пер. с англ. М. Издательский дом «Вильямс». 2003.
6. Гуревич М. С. Спектры радиосигналов. М. Связьиздат. 1963.