

Эффективное количество бит цифровых осциллографов: влияние на результаты измерений и экспериментальное определение для приборов VESNA

Николай Лемешко, Антон Тимонович

В статье рассмотрены особенности измерения эффективного числа бит (ENOB) для цифровых осциллографов. Представлен анализ ENOB как характеристики аналого-цифрового преобразования, отмечены ключевые причины искажений сигналов при аналого-цифровом преобразовании. Проанализированы особенности определения эффективного количества бит цифровых осциллографов на основе прямых измерений, обоснован наиболее простой способ определения ENOB на базе сопоставления среднеквадратичного напряжения на выходе генератора синусоидального сигнала и аналогичного значения, измеренного осциллографом. Для осциллографов серий OVA3, OVS3, OVU2 нового для российского рынка бренда VESNA проведены экспериментальные оценки эффективного количества бит.

Введение

В настоящее время цифровые осциллографы по праву заняли центральное место в оснащении радиоизмерительных лабораторий. Переход к методам измерений, основанным на цифровой обработке сигналов, значительно расширил основные возможности приборов: к ним добавились автоматическое измерение параметров сигналов, гибкие варианты синхронизации по заданным условиям, а также специализированная постобработка, включая цифровую фильтрацию и декодирование сигналов по стандартным протоколам передачи данных, наряду со множеством других полезных функций. Первичны-

ми данными для их реализации, равно как и для построения осциллограмм, является поток оцифрованных отсчётов входного сигнала.

При выборе осциллографа для решения конкретных измерительных задач пользователи, если они не имеют глубоких познаний в области процесса аналого-цифрового преобразования (АЦП), обычно ориентируются на заявленные погрешности по амплитуде и разрядность N , которая определяет разрешение по амплитуде и отношение сигнал/шум SNR (Signal to Noise Ratio) преобразования. Однако значение SNR, определяемое разрядностью АЦП, не даёт решительной никакой информации о качестве

реализации АЦП. Этот параметр можно сопоставить только идеальному аналого-цифровому преобразователю (АЦП), который отличается абсолютной линейностью, отсутствием временных погрешностей АЦП и внутреннего шума. Таким образом, ориентация только на разрядность преобразования при выборе цифровых осциллографов хоть и возможна, но не должна являться определяющим фактором.

Широкое применение АЦП в области радиосвязи потребовало использования более приемлемой для этой цели характеристики. В качестве неё справедливо был избран динамический диапазон, свободный от паразитных составляющих (Spurious-Free Dynamic Range – SFDR). Значение этого параметра может быть сопоставлено также цифро-аналоговым преобразователям и аналоговым радиоприёмникам. Измерение SFDR реализуется при синусоидальном входном сигнале на основе преобразования Фурье (рис. 1, [2]) сопоставлением уровня спектра на несущей частоте и наибольшей спектральной составляющей, что делает этот параметр весьма показательным при приёме узкополосных сигналов. Однако задача получения осциллограмм не соответствует этому случаю, поскольку влияние на результат будет оказывать интегральный уровень шумов и искажений. Для характеристик АЦП в этом смысле следует использовать эффективную разрядность, или эффективное количество бит ENOB (Effective Number of Bits) [3], которое является обобщённой характеристикой качества оцифровки сигналов. Чем выше значение ENOB, тем точнее воспроизводятся уровни напряжения, зарегистрированные при ЦАП. Применительно к осциллографии этот параметр определяет качество измерения в части соответствия картины на экране прибора фактически имеющемуся сигна-

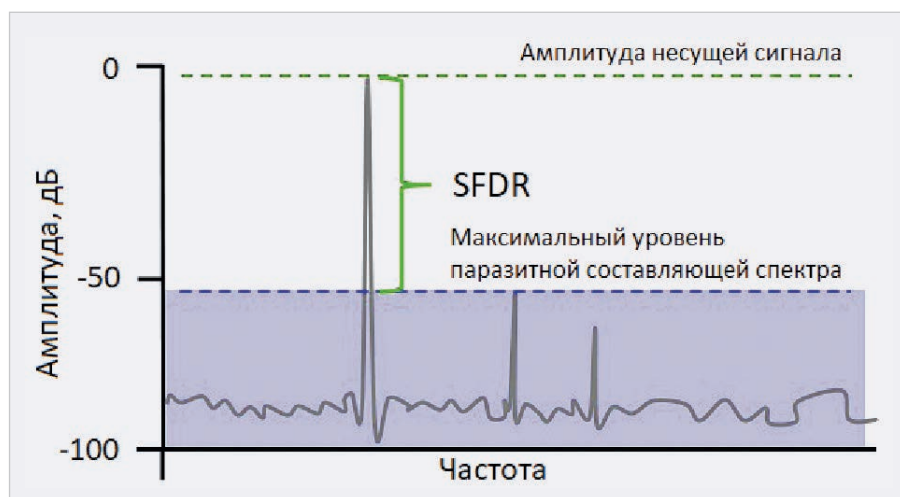


Рис. 1. Принцип измерения SFDR

лу, т.е. охватывает не только процесс взятия выборок, но и всю последующую обработку. Поэтому целесообразно рассмотреть его сущность и методы экспериментального определения для осциллографов.

ENOB как характеристика аналого-цифрового преобразования

В основе функционирования цифровых осциллографов лежит АЦП, обеспечивающее квантование сигналов по амплитуде и по времени с их переводом в двоичный код с разрядностью N .

Идеальный АЦП обладает идеальной линейной характеристикой преобразования (ХП), эквидистантными напряжениями межкодového перехода, отсутствием смещения нуля. У такого АЦП нет дифференциальной нелинейности, проявляющейся в отклонении шагов квантования от младшего значащего разряда. Также у него отсутствует погрешность опрокидывания, что означает равенство выходных кодов при подаче на вход АЦП противоположных по знаку напряжений с точностью до разряда, определяющего его полярность [1]. Реальные АЦП не обладают такими свойствами, в результате чего в составе выходного кода появляются шумовые составляющие и искажения. Для их обобщенного краткого обозначения часто используется понятие «шума квантования», что не вполне корректно, поскольку нелинейность ХП может приводить к появлению в выходном сигнале АЦП гармоник входного сигнала, которые ввиду переноса ими информации не могут быть классифицированы как шум [4].

Если на вход идеального АЦП поступает синусоидальный сигнал с размахом, охватывающим всю шкалу оцифровки, то отношение сигнал/шум составит

$$SNR = 1,5 \cdot 2^{2N}. \quad (1)$$

Перевод этого выражения в шкалу относительных значений даёт $SNR_{об} = 1,76 + 6,02N$, откуда следует, что $N = (SNR_{об} - 1,76)/6,02$. Последнее уравнение справедливо как для идеальных, так и для неидеальных АЦП. Оно показывает, как из отношения сигнал/шум может быть получено число битов на основе анализа выходного кода, и служит основой для вычисления параметра $ENOB$. Для идеальных АЦП $ENOB = N$, для реальных же преоб-

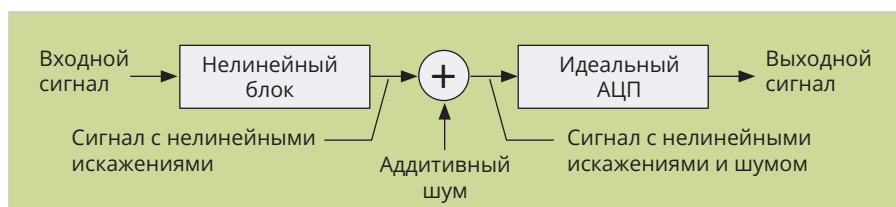


Рис. 2. Модель реального (неидеального) АЦП

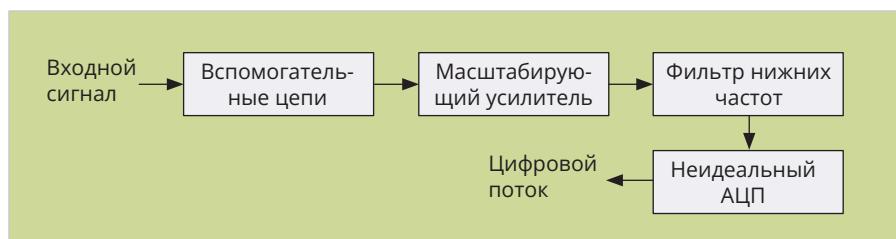


Рис. 3. Модель входного каскада осциллографа

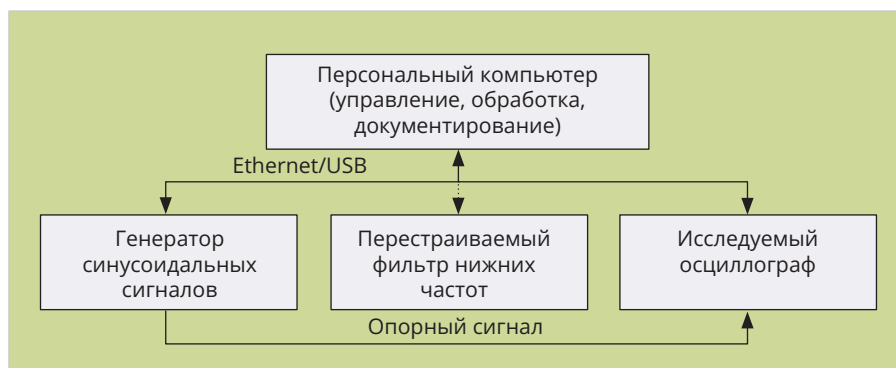


Рис. 4. Схема измерений ENOB в соответствии со стандартом [6]

Таблица 1. Сопоставление идеального и реального АЦП

Параметр	Идеальный АЦП	Реальный АЦП
Реальная разрядность	N	$ENOB < N$
Характеристика преобразования	Линейная	Нелинейная
Напряжение смещения, В	Нулевое	Может быть ненулевым
Шаг квантования	Постоянный	Имеет случайные отклонения
Погрешность опрокидывания	Нулевая	Может быть ненулевой
Шум квантования	Отсутствует	Имеется

зователей значение $ENOB < N$, и оно может быть дробным числом. Следовательно, параметр $ENOB$ является мерой реального динамического диапазона АЦП и его разрешающей способности.

Наиболее значимыми искажениями для реальных АЦП являются шум, нелинейная ХП, а также погрешности усиления и смещения. Модель такого АЦП можно представить в виде трёх блоков (рис. 2). Первый из них – нелинейный блок с передаточной характеристикой, определяющий отклонение реальной ХП от идеальной линии. Он служит для учёта смещения нуля, дифференциальной нелинейности, погрешности опрокидывания. Нелинейность ХП приводит к

появлению гармоник, которые также понижают SNR и $ENOB$. Вторым блоком является источник аддитивного шума, который моделирует все прочие случайные явления, в частности, флуктуационные изменения младших разрядов АЦП в силу случайных факторов, включая артефакты посторонних сигналов, циркулирующих в АЦП. Шум также ухудшает отношение SNR . Третьим же блоком является идеальный АЦП.

В зависимости от конструкции АЦП значение $ENOB$ может зависеть от частоты входного сигнала f . С повышением частоты обычно более проявляется нелинейность и частотная избирательность АЦП даже в пределах рабочего частотного диапазона,

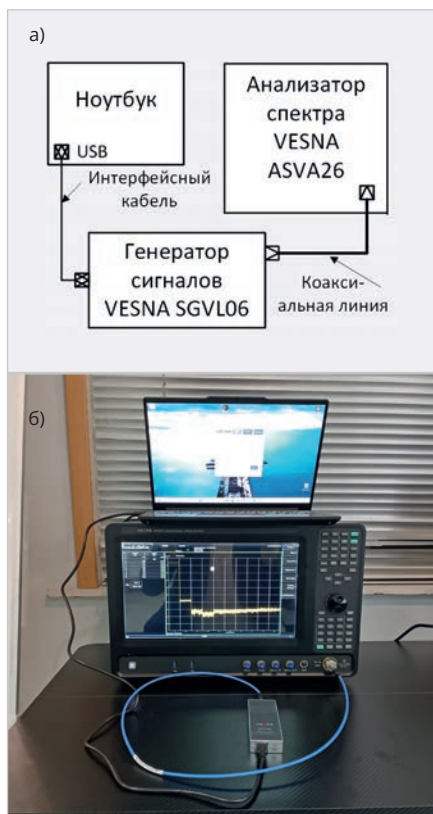


Рис. 5. Измерительная установка для проверки качества сигнала генератора:
а) схема; б) фотография

что снижает значение эффективного количества бит. Следовательно, для некоторого образца АЦП исчерпывающей характеристикой в части разрядности будет являться зависимость $ENOB(f)$, построенная для значений f вплоть до частоты Найквиста. В табл. 1 приведено обобщённое сопоставление идеального и реального АЦП.

Типовое значение разности $N - ENOB$ составляет 1...2,5 бит. Например, 12-битный АЦП может иметь $ENOB = 10,5$. Это означает, что, хотя выходная разрядность АЦП и равна 12 битам, достижимое отношение SNR соответствует идеальному АЦП с разрядностью 10,5 бит. В качестве ключевых факторов снижения $ENOB$ следует рассматривать дифференциальную нелинейность и отклонение ХП от идеальной линейной характеристики.

Для осциллографов существуют и другие причины снижения качества отображения сигналов, связанные с их преобразованием в трактах, предшествующих АЦП (рис. 3). Входные сигналы осциллографа лишь при определённом коэффициенте вертикальной развёртки (КВР) соответствуют шкале оцифровки используемого АЦП, поэтому после вспомогательных цепей,

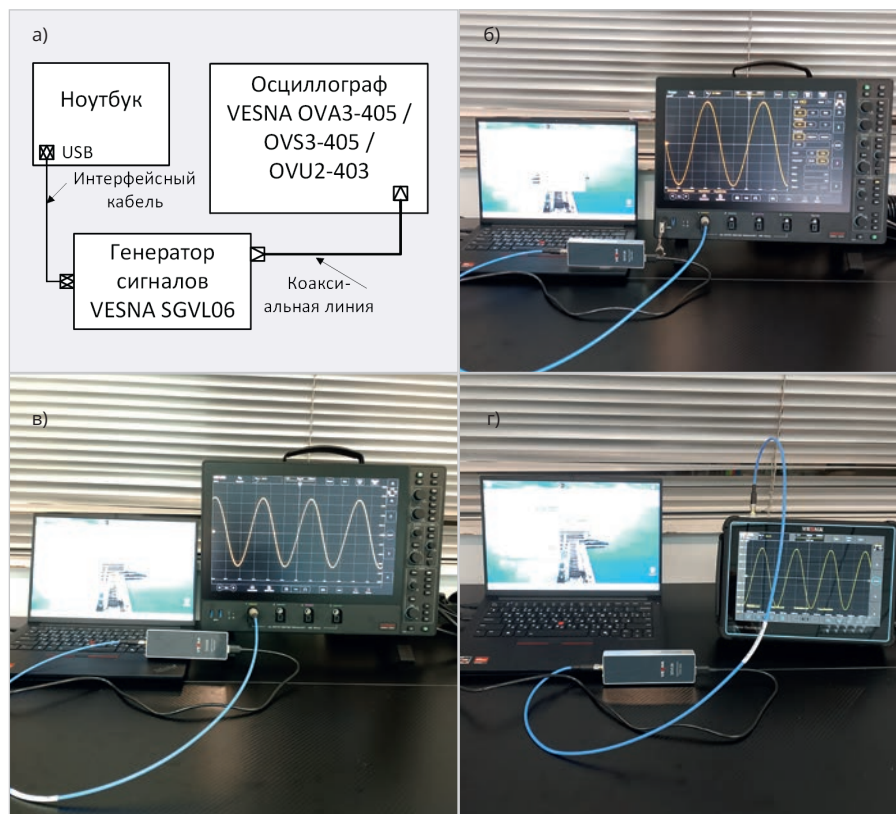


Рис. 6. Измерительная установка для оценки ENOB: а) схема; б) фотография, используется осциллограф VESNA OVA3-405; в) фотография, используется осциллограф VESNA OVS3-405; г) фотография, используется осциллограф VESNA OVU2-403

обеспечивающих выбор режима пропускания постоянного или переменного напряжения, установлен перестраиваемый усилитель с переменным коэффициентом усиления, который масштабирует входной сигнал для оптимального использования динамического диапазона АЦП осциллографа. Далее установлен сглаживающий фильтр низких частот, служащий для ограничения полосы пропускания и, соответственно, интегральной мощности шума. Он может включаться или отключаться через меню управления прибором и, как правило, имеет частоту среза не выше 10...20 МГц, что позволяет снизить уровень отображаемого шума. Все перечисленные компоненты вносят дополнительные искажения во входные сигналы. Усилитель характеризуется собственной нелинейностью, имеет частотно-зависимый коэффициент усиления и нелинейную фазовую характеристику – свои для каждого значения КВР. Влияние аналогового фильтра менее критично, но он также обладает неидеальной частотной характеристикой. К перечисленным узлам осциллографических каналов предъявляются требования по минимизации таких

искажений на уровне, достаточном для сохранения заданной амплитудной погрешности.

Любые виды цифровой фильтрации, реализуемые в осциллографах в рамках вторичной обработки для выделения из выходного сигнала отдельных составляющих спектра, выполняются на основе оцифрованного сигнала, который уже включает перечисленные выше искажения. Их применение способно несколько повышать $ENOB$, в первую очередь, для сигналов с узкой занимаемой полосой. Однако такие фильтры, как правило, имеют настройки, не охватывающие весь диапазон рабочих частот осциллографа из-за ограниченной вычислительной производительности аппаратной платформы. Следовательно, значение $ENOB$ нужно определять при отключённой цифровой фильтрации, даже если она имеется у прибора конкретной серии.

Как следует из изложенного, для использования осциллографов при решении практических задач, критичных к реальному отношению сигнал/шум, значительную ценность представляют методы экспериментального определения значений $ENOB$, которые рассматриваются ниже.

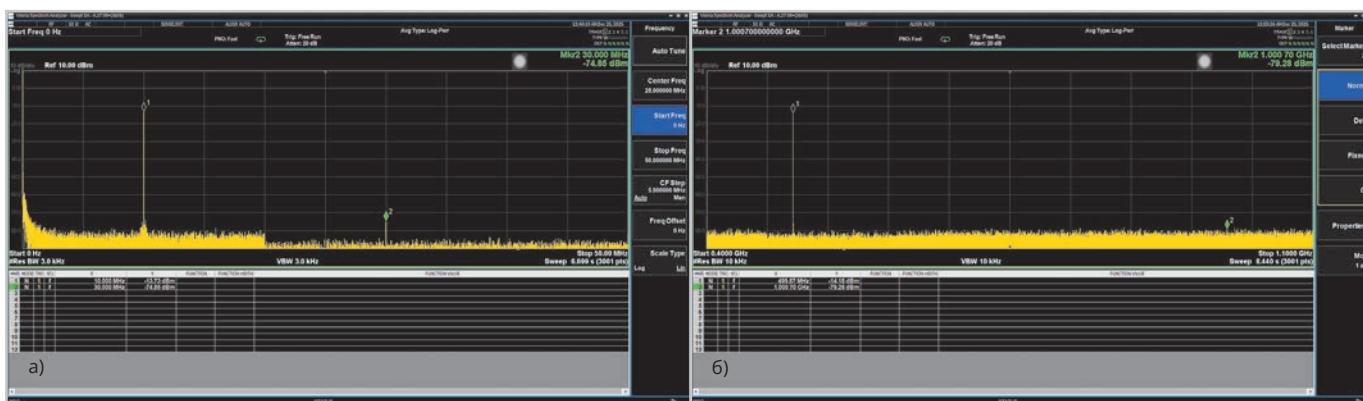


Рис. 7. Результат оценки уровня наибольшей гармоники при мощности на генераторе, равной -13 дБм: а) на частоте 10 МГц; б) на частоте 500 МГц

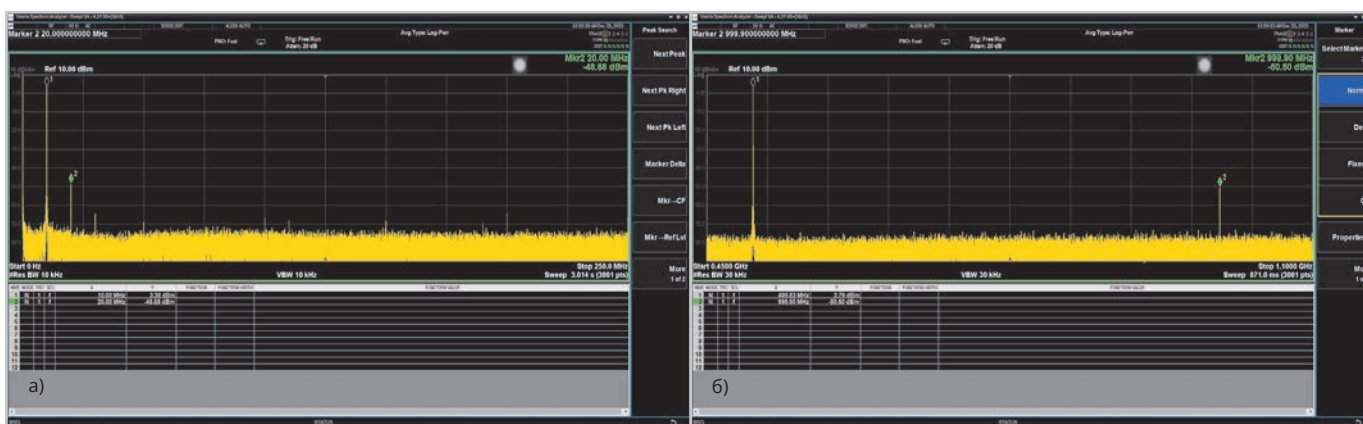


Рис. 8. Результат оценки уровня наибольшей гармоники при мощности на генераторе, равной +3 дБм: а) на частоте 10 МГц; б) на частоте 500 МГц

Способы определения эффективного количества бит цифровых осциллографов

Несмотря на наличие дополнительных каскадов, к цифровым осциллографам в части определения $ENOB$ применимы те же методы испытаний, что и для аналого-цифровых преобразователей. Методы испытания АЦП определены Институтом инженеров электротехники и электроники (IEEE) в стандарте [5]. Стандарт предусматривает измерение $ENOB$ при входном синусоидальном воздействии и содержит следующее его определение:

$$ENOB = 0,5 \log_2(SINAD) - 0,5 \log_2(1,5) - \log_2(A/V). \quad (2)$$

В формуле (2) V – предельный диапазон (шкала) для осциллографа при текущих настройках, A – размах гармонического сигнала; $SINAD$ – отношение уровня сигнала к шуму в сумме с искажениями. В [1] отмечается, что SNR и $SINAD$ соответствуют отношениям среднеквадратических напряжений сигнала и шума (или шума с искажениями), а не мощностей, что, например, типично для техники радиосвязи. Таким образом, в трактовке упомина-

емого стандарта $SINAD = V_S / V_{NAD}$, где V_S – среднеквадратичное значение напряжения сигнала с мощностью P_S , V_{NAD} – среднеквадратичное напряжение, соответствующее сумме мощностей шума и искажений P_{NAD} во всех частотных элементах (бинах) вплоть до частоты Найквиста, исключая бины с частотой полезного сигнала и с нулевой частотой. Исходя из такого определения V_S и V_{NAD} , параметр $SINAD$ можно определить как разность P_S и P_{NAD} или V_S и V_{NAD} , выраженных в дБ, и тогда его использование в (2) требует пересчёта в линейные единицы. Учитывая необходимость осуществления анализа в частотной области, измерение $ENOB$ целесообразно проводить путём взятия ряда последовательных отсчётов, для которых далее выполняется быстрое преобразование Фурье.

Одним из важных вопросов в части экспериментального проведения измерений является выбор амплитуды тестового синусоидального сигнала. Известно [1], что для цифровых измерительных систем минимизация относительной амплитудной погрешности достигается, когда задействована вся шкала оцифровки. Согласно

[5], при измерениях $ENOB$ может быть использована любая входная амплитуда, укладывающаяся в шкалу оцифровки, поскольку правое слагаемое в (2) учитывает их соотношение.

В [6] выделяется два подхода к учёту амплитуды при вычислении $ENOB$.

1. Значение $ENOB$ определяется для выбранных амплитуды входного сигнала и развёртки, т.е. заданной шкалы оцифровки. В типовом случае $ENOB$ измеряется при $A = 0,9...0,95 V$. Как следует из (2), $ENOB$ растёт с уменьшением входной амплитуды, потому что на результаты измерений в существенной степени влияет нелинейность ХП.

2. Измерение $ENOB$ основывается только на отношении $SINAD$. При использовании такого подхода оптимальная рабочая точка испытываемой системы может быть найдена как наилучший компромисс между размахом входного сигнала и искажениями из-за нелинейностей. Так как это не соответствует строгому определению эффективной разрядности, то обычно такой результат обозначают как $ENOB$. Определённое таким образом значение эффективной разрядности более соответствует наблюда-

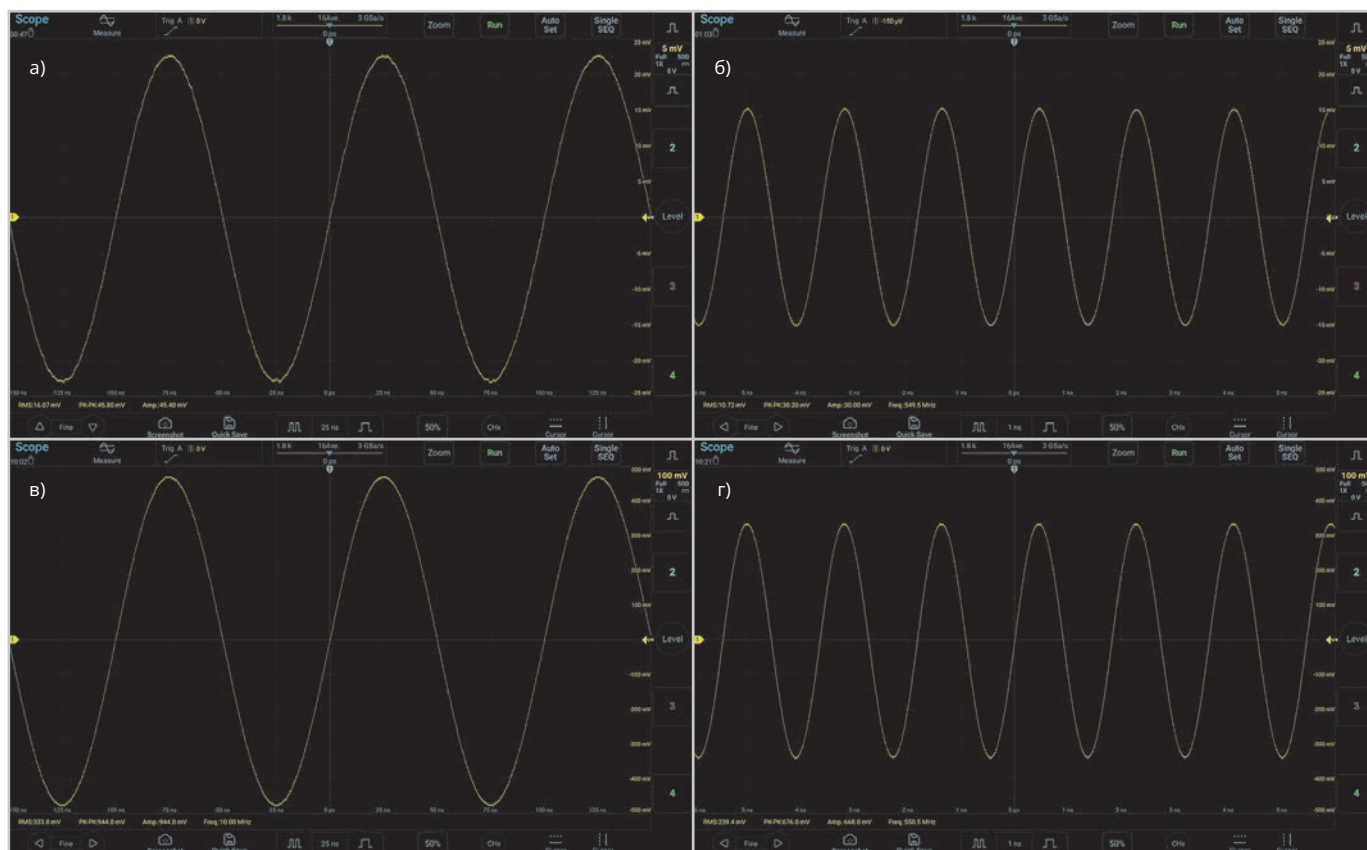


Рис. 9. Автоматические измерения на осциллографе VESNA OVA3-405: а) для частоты 10 МГц и КВП 5 мВ/дел.; б) для частоты 550 МГц и КВП 5 мВ/дел.; в) для частоты 10 МГц и КВП 100 мВ/дел.; г) для частоты 550 МГц и КВП 100 мВ/дел.

емому в измерительном устройстве качеству сигнала. Мера $ENOB$ служит единым эталоном для сравнения различных систем при указании амплитуды входного сигнала, при которой проводилось измерение параметра.

Частота, для которой проводится измерение $ENOB$, должна в точности соответствовать середине частотного элемента БПФ. Одновременно требуется, чтобы временной интервал, на котором берётся выборка для измерений, включал целое количество полных периодов синусоидального сигнала на частоте измерений. Такое требование установлено в обеспечение отсутствия разрывов функции полезного сигнала, которые приведут к расширению полосы занимаемых частот и потребуют более сложной математической обработки для достижения той же точности оценки $ENOB$. Кроме того, для получения объективных результатов используемые выборки должны соответствовать разным фазам входного сигнала, и должны быть задействованы все выходные коды АЦП с учётом размаха входного сигнала. Исходя из этого, оптимальные частоты f_{OPT} для расчёта $ENOB$ должны удовлетворять условию $f_{OPT} = f_s/JM$, где f_s – частота дискретизации,

M – число отсчётов в тестовой последовательности; J – число периодов входного сигнала в тестовой последовательности. Соответственно, посредством изменений J , M и, если это возможно, f_s измерениями охватывается весь диапазон рабочих частот осциллографа. Поскольку равные отношения J/M при неизменной частоте дискретизации приводят к одним и тем же значениям оптимальной частоты, то к J и M предъявляется дополнительное требование: их отношение должно представлять собой сокращённую дробь, т.е. они не должны иметь общих делителей, кроме единицы. В [6] определена минимальная длина последовательности, составляющая $M_{min} = \pi 2^N$. Если, например, рассматривается 10-разрядный АЦП, то $M_{min} = 3216$ отсчётов. В практике измерений $ENOB$ значение M целесообразно выбирать существенно больше, что позволит реализовать скользящее БПФ и использовать усреднённые значения мощностей в каждом частотном элементе.

Метод измерений $ENOB$, предписанный стандартом [6], предполагает использование схемы, представленной на рис. 4. В ней используется высококачественный генератор сину-

соидального сигнала, отличающийся низким уровнем шума и малым коэффициентом гармоник на всех измеряемых частотах. Если генератор работает по принципу прямого цифрового синтеза, то он должен иметь большую разрядность цифро-аналогового преобразования, чем N . Перестраиваемый фильтр низких частот предназначен для снижения уровня гармоник тестового сигнала на входе осциллографа. Шкалы частот и времени генератора и осциллографа совмещаются за счёт использования единого опорного сигнала. Для управления элементами измерительной установки используется персональный компьютер, на котором также функционирует программное обеспечение для считывания отсчётов с осциллографа, реализации БПФ, расчёта $SINAD$ и далее оценки $ENOB$ в соответствии с формулой (2). Программное обеспечение для обработки выборок может быть реализовано в MATLAB, LabVIEW или в форме отдельных модулей, написанных на подходящих языках программирования. Если имеется возможность, то автоматизированным управлением должен быть охвачен и перестраиваемый фильтр, что позволит вообще исключить необходимость постоянно-

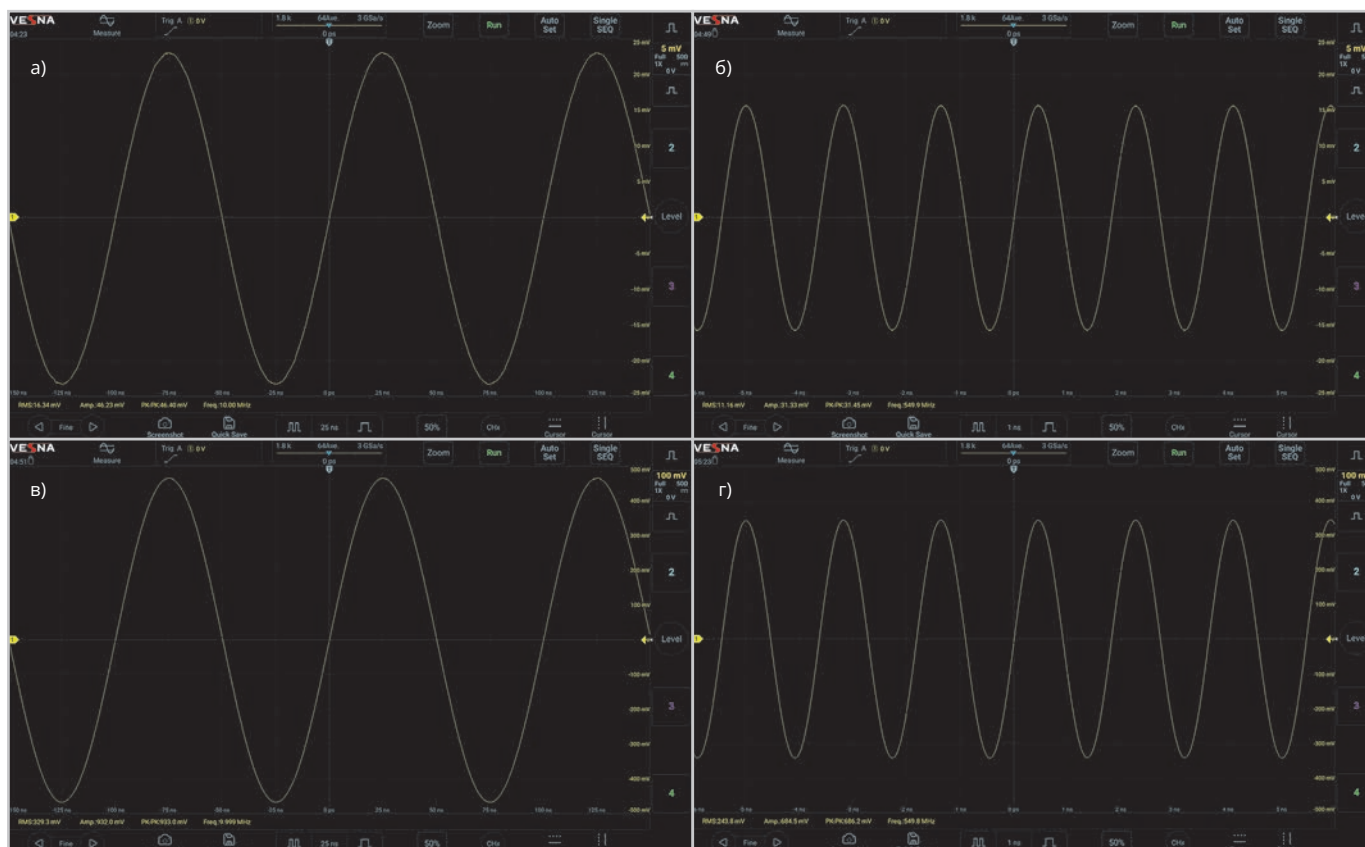


Рис. 10. Автоматические измерения на осциллографе VESNA OVS3-405: а) для частоты 10 МГц и КВП 5 мВ/дел.; б) для частоты 550 МГц и КВП 5 мВ/дел.; в) для частоты 10 МГц и КВП 100 мВ/дел.; г) для частоты 550 МГц и КВП 100 мВ/дел.

го участия оператора в таких измерениях и снизит тем самым появление ошибок из-за человеческого фактора.

Описанный метод измерений *ENOB* является классическим и отличается высоким качеством получаемых результатов. Вместе с тем многие модели современных цифровых осциллографов имеют в составе базовой обработки осциллограмм встроенную функцию БПФ, которая при правильных настройках также позволяет получить первичные данные для вычисления *SINAD* и далее *ENOB* по формуле (2). Условия применимости такого решения состоят в следующем:

- функция БПФ охватывает весь рабочий диапазон осциллографа;
- она реализована качественно, т.е. таким образом, что её результаты можно считать достоверными;
- известно количество точек (разрядность) БПФ;
- результаты БПФ не демонстрируют значительной вариации от реализации к реализации;
- настройки БПФ таковы, что частота измерений в точности соответствует середине одного из частотных элементов.

Практика использования осциллографов показала, что выполнение

всех перечисленных условий для ряда представляющих интерес частот измерений обычно не наблюдается в том числе из-за ограничений настроек БПФ.

Как видно из изложенного, реализация измерения *ENOB* со всей должной строгостью, предусмотренной стандартом [5], требует использования весьма сложной измерительной установки и обработки результатов с использованием специального программного обеспечения. Вместе с тем для осциллографов может быть использован более простой подход, основанный на оценке расхождения среднеквадратичных значений синусоидального сигнала, установленного на эталонном генераторе и измеренного на осциллографе. Сразу необходимо подчеркнуть, что такой способ пригоден для оценки *ENOB* в полосе частот до 1 ГГц, т.е. в условиях, когда коэффициент стоячей волны для входа осциллографа ещё не играет существенного значения. Способ состоит в следующем.

Для выбранной цены деления вертикальной развёртки, определяющей текущую шкалу оцифровки прибора *V*, рассчитывается шаг квантования $\Delta V_{KB} = V/2^N$. С высококачественного генератора, отличающегося уровнем гармо-

ник не выше –30 дБн на всех частотах оценки *ENOB*, подаётся синусоидальный сигнал с частотой f_g и известным среднеквадратичным значением

$$V_{SG} = \sqrt{\frac{1}{T} \int_0^T (u_g(t))^2 dt},$$

где $u_g(t)$ – зависимость выходного напряжения генератора от времени, а интегрирование осуществляется на интервале времени, равном периоду сигнала $T = 1/f_g$. Поступающий на осциллограф синусоидальный сигнал не коррелирован по отношению к внутреннему шуму АЦП и любым иным искажениям, свойственным входному каскаду прибора. Измеренное на осциллографе среднеквадратичное значение напряжения определяется для суммы $u_g(t)$ и $n(t)$, где последняя функция со случайными значениями характеризует привносимые прибором искажения и шум. Функции $u_g(t)$ и $n(t)$ при обработке сигнала в осциллографе складываются арифметически, что может определять отклонение среднеквадратичного измеренного напряжения V_{SN} как в большую, так и в меньшую стороны относительно V_{SG} . При этом

$$V_{SN} = \sqrt{\frac{1}{T} \int_0^T (u_g(t) + n(t))^2 dt} =$$

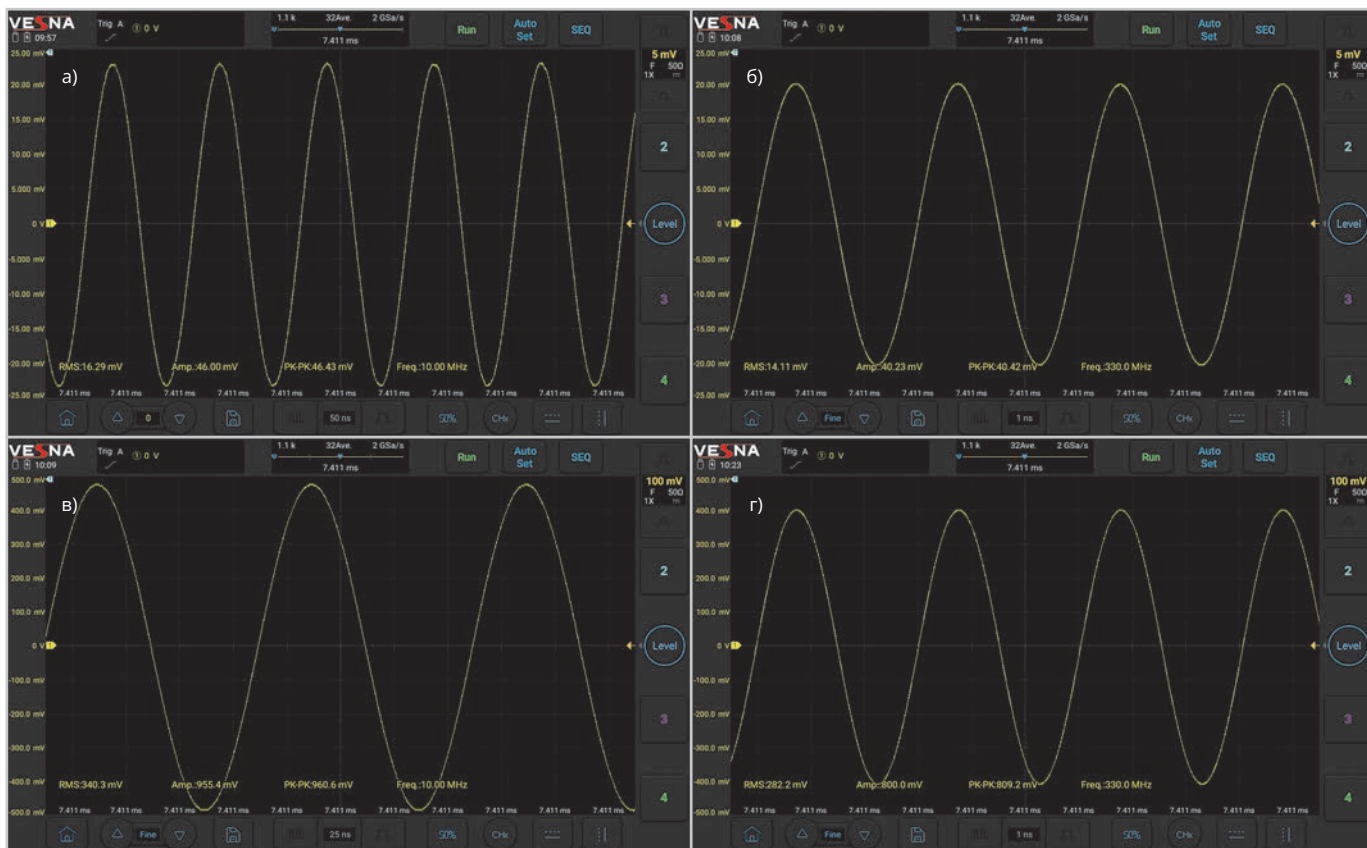


Рис. 11. Автоматические измерения на осциллографе VESNA OVU2-403: а) для частоты 10 МГц и КВП 5 мВ/дел.; б) для частоты 330 МГц и КВП 5 мВ/дел.; в) для частоты 10 МГц и КВП 100 мВ/дел.; г) для частоты 330 МГц и КВП 100 мВ/дел.

$$\begin{aligned}
 &= \sqrt{\frac{1}{T} \int (u_g^2(t) + 2u_g(t)n(t) + n^2(t)) dt} = \\
 &= \sqrt{\frac{1}{T} \int (u_g(t))^2 dt +} \\
 &+ \sqrt{\frac{2}{T} \int u_g(t)n(t) dt} + \sqrt{\frac{1}{T} \int n^2(t) dt}. \quad (3)
 \end{aligned}$$

В правой части (3) имеется три слагаемых, первое из которых равняется V_{SG} . Функция $n(t)$ принимает случайные значения, имеющие нулевое математическое ожидание. Поскольку шум АЦПр определяется сочетанием случайных факторов, то он будет иметь нормальное распределение [7]. Если же рассматривать синусоидальный входной сигнал как случайный, то ему сопоставляется арккосинусное распределение. Произведение $u_g(t)n(t)$ имеет нулевое математическое ожидание и преимущественно арккосинусное распределение. Из этого следует, что $\int u_g(t)n(t) dt \approx 0$.

Третье слагаемое в (3) представляет собой среднеквадратичное значение шума на периоде синусоидального сигнала, поступающего с генератора. Он включает все спектральные составляющие, кроме относящейся к частоте f_g , а постоянной составляющей

входной сигнал не содержит. Отсюда следует,

$$\text{что } V_{NAD} = \sqrt{\frac{1}{T} \int n^2(t) dt}.$$

Исходя из этого, можно считать, что $V_{NAD} = |V_{SG} - V_{SN}|$. Оценку значения ENOB можно получить как

$$ENOB = N - \log_2(|V_{SG} - V_{SN}| / \Delta V_{KB}). \quad (4)$$

При использовании описанного способа оценки ENOB необходимо учитывать потери сигнала в кабеле, соединяющем генератор и осциллограф. Из упрощенной схемы входного тракта, показанной на рис. 3, следует, что изменения коэффициента вертикальной развертки и настроек входной фильтрации способны влиять на значение ENOB. В этом и состоит ключевой фактор, определяющий сложность измерений этого параметра.

Экспериментальная оценка ENOB для осциллографов VESNA

Используемые схемы и средства измерений. Как следует из изложенного, оценка ENOB по наиболее простому принципу, т.е. путём сопоставления мощности на выходе генератора с оценкой среднеквадратичного напряжения на осциллографе, требует проверки качества используемого сину-

соидального сигнала, показателем которого следует выбрать уровень второй или третьей (наибольшей) гармоники относительно основной. Для осуществления такой проверки использовалась схема (рис. 5), включающая генератор сигналов SGVL06 с полосой рабочих частот до 6 ГГц (включён в государственный реестр средств измерений, № 97025-25), а также анализатор спектра ASVA26 до 26,5 ГГц (также включён в государственный реестр, № 96495-25). Эти приборы относятся к новому на российском рынке средств измерений бренда VESNA, который представляет интерес для конечных потребителей не только новизной, но и достаточно высоким качеством и разнородностью средств измерений. В схеме измерений на рис. 5 для управления генератором сигналов используется ноутбук, на котором функционирует специальное программное обеспечение. В этой, а также в основной схеме измерений для образования тракта передачи сигнала используется высококачественный фазостабилизированный коаксиальный кабель, потери в котором в рассматриваемых диапазонах частот малы и были компенсированы в ходе измерений.

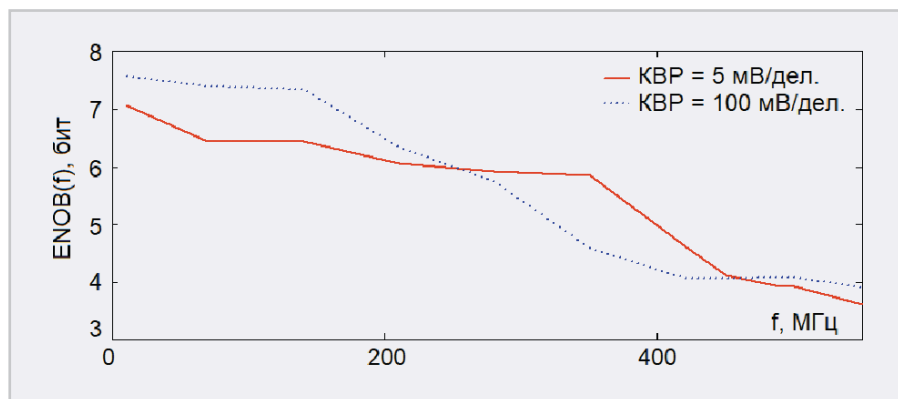


Рис. 12. Зависимости ENOB (f) для осциллографа VESNA OVA3-405

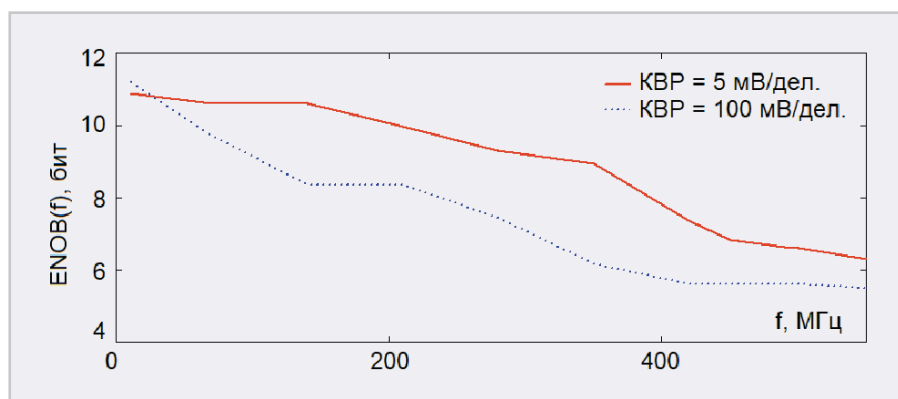


Рис. 13. Зависимости ENOB (f) для осциллографа VESNA OVS3-405

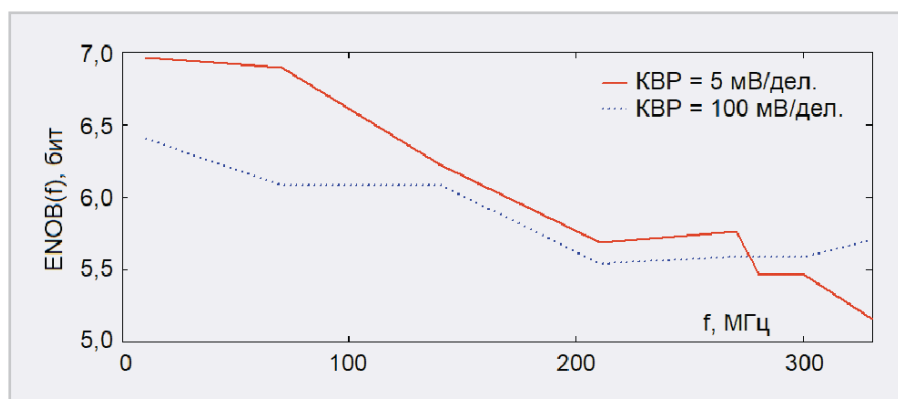


Рис. 14. Зависимости ENOB (f) для осциллографа VESNA OVU2-403

Таблица 2. Результаты измерений уровней наибольшей из гармоник для генератора VESNA SGVL06

Частота, МГц	Значения параметра для выходной мощности -13/+3 дБм			
	P_1 , дБм	G	P_G , дБм	ΔP , дБ
10	-13,7/+3,4	3/2	-74,9/-48,7	-60,2/-52,0
500	-14,2/+2,8	2/2	-79,3/-50,5	-65,1/-53,3

В качестве объектов измерений были выбраны три осциллографа того же бренда: VESNA OVA3-405 (полоса до 500 МГц, $N = 8$ бит), VESNA OVS3-405 (полоса до 500 МГц, $N = 12$ бит); VESNA OVU2-403 (полоса 300 МГц, $N = 8$ бит). Измерения для них проводились при KBP 5 и 100 мВ/дел., частоты изменялись с шагом от 10 до 70 МГц для охва-

та всего рабочего диапазона и вплоть до 110% максимальной его частоты. Входное сопротивление каналов составляло 50 Ом, уровень выходного сигнала на генераторе поддерживался постоянным и составлял -23 дБм и +3 дБм для указанных значений KBP соответственно. Схема и фотографии установок для проведения основных

измерений представлены на рис. 6. Среднеквадратичное значение напряжения для использования в уравнении (4) определялось при помощи автоматических измерений. В рамках таких измерений применение единого источника опорной частоты не требуется.

Результаты оценки качества тестового сигнала. Известно [8], что уровень гармоник генераторов синусоидального сигнала может зависеть от текущего значения выходной мощности. Охвату 90% шкалы при выбранных для основных измерений значений KBP соответствуют мощности -23 дБм и +3 дБм, однако более низкую из них для наблюдения второй гармоники потребовалось поднять на 10 дБ. Результаты измерений, полученные для частот 10 МГц и 500 МГц, представлены на рис. 7 и 8 и сведены в табл. 2. Здесь введены следующие обозначения: P_1 и P_G – измеренные уровни первой гармоники, а также второй или третьей (максимальной) гармоники; G – номер второй или третьей гармоники, ΔP – уровень второй или третьей гармоники относительно первой.

Как видно из представленных результатов, на выбранных для оценки частот работы генератора VESNA SGVL06 значение ΔP оказывается существенно ниже -30 дБ. Это сохраняется и для других частот, на которых проводились основные измерения. Таким образом, он соответствует особенностям проведения эксперимента по оценке значения ENOB.

Результаты оценки ENOB для осциллографов VESNA OVA3-405; OVS3-405; OVU2-403 были получены при фиксированных уровнях среднеквадратичного напряжения синусоидального сигнала на входе осциллографа, равного 15,8 мВ и 315,8 мВ (-23 дБм и +3 дБм для тракта сопротивлением 50 Ом, 90% вертикальной развертки) для KBP 5 мВ и 100 мВ соответственно. Примеры осциллограмм, наблюдавшихся на экране осциллографов, для крайних частот измерений приведены на рис. 9–11. К полученным по результатам автоматических измерений данным такого рода был применён описанный выше математический аппарат, а также медианное сглаживание. На основе этого для образцов осциллографов были получены зависимости ENOB(f), показанные на рис. 12–14.

На основе анализа рис. 12–14 можно сделать следующие выводы.

1. С ростом частоты функции $ENOB(f)$ всегда показывают тренд к снижению.
2. В высокочастотной части рабочего диапазона скорость этого снижения будет несколько ниже.
3. На верхней границе рабочего диапазона значение $ENOB$ составляет порядка 4...5 бит, если $N = 8$, и порядка 6...8 бит, если $N = 12$.

Если же говорить об исследованных образцах осциллографов, то можно отметить, что эффективная разрядность АЦП сохраняется на уровне $N - (0,5...1,5)$ бит примерно до середины рабочего диапазона, а внутри него с ростом частоты значение $ENOB$ будет показывать тем большие изменения, чем выше разрядность АЦП прибора. Представленные графики в целом характерны как для АЦП, так и в целом для цифровых средств измерений. При этом ожидаемое снижение $ENOB$ для приборов более высокого класса и ценового сегмента будет ниже в пределах рабочей полосы и резче при выходе

за неё, чем для приборов более низкого класса.

Заключение

Как следует из изложенного, выбор средств измерений не должен осуществляться в предположении сохранения заявленной разрядности аналого-цифрового преобразования во всём частотном диапазоне. Подбор осциллографов под решение конкретных измерительных задач должен осуществляться с учётом того, что ожидаемое значение $ENOB$ будет на 1...2 бит ниже, чем заявленная разрядность АЦП. Ввиду снижения зависимости $ENOB(f)$ с ростом частоты измерения вблизи верхней границы частотного диапазона могут сопровождаться дополнительными погрешностями.

Как показали результаты измерений, осциллографы VESNA серий OVA3; OVS3; OVU2 демонстрируют изменение $ENOB(f)$ в пределах рабочего диапазона, типовое для таких средств измерений, что во многом характеризует их качество. Можно ожидать, что осциллографы VESNA займут достойное

место на российском рынке средств измерений.

Литература

1. *Panhop T.C.* Цифровые измерения. АЦП/ЦАП. М.: Техносфера, 2006. 392 с.
2. URL: <https://www.everythingrf.com/community/what-is-sfdr> (дата обращения: 27.10.2025).
3. *Schaefer A.* The Effective Number of Bits (ENOB) of my R&S Digital Oscilloscope. Technical Paper. Документ R&S, идентификатор 1ER03_1e, 2011. 17 p.
4. *Гоноровский И.С.* Радиотехнические цепи и сигналы. Учебник для вузов. М.: Радио и связь, 1986. 512 с.
5. IEEE Standard for Terminology and Test Methods for Analog-to-Digital Converters. IEEE Standard 1241. URL: <http://iee.org> (дата обращения: 27.10.2025).
6. VESNA. Каталог оборудования. 2025. 43 с.
7. *Гмурман В.Е.* Теория вероятностей и математическая статистика. М.: Высшая школа, 2003. 479 с.
8. *Баскаков С.И.* Радиотехнические цепи и сигналы. М.: Высшая школа, 2003. 462 с.



НОВОСТИ МИРА. ЧИТАЙТЕ НА ПОРТАЛЕ WWW.CTA.RU

Imec создала первый квантовый спин-кубит с использованием High-NA EUV-литографии

Бельгийский исследовательский центр Imec объявил о создании первого в мире квантового точечного спин-кубита, изготовленного с применением литографии High-NA EUV. Разработка стала одним из первых практических примеров использования новейшей полупроводниковой технологии не только для классических чипов, но и для будущих квантовых компьютеров.

О достижении было объявлено на технологической конференции Imec Technology Forum. По словам исследователей, речь идёт о первом полноценном квантовом устройстве, созданном с использованием литографии с высокой числовой апертурой – технологии, которая считается ключевой для производства субнанометровых процессоров следующего поколения.

В основе разработки лежат квантовые точечные спин-кубиты – архитектура, которую многие специалисты считают одним из наиболее перспективных направлений для масштабируемых квантовых вычислений. Главное преимущество такого подхода заключается в совместимости с традиционными CMOS-процессами, используемыми

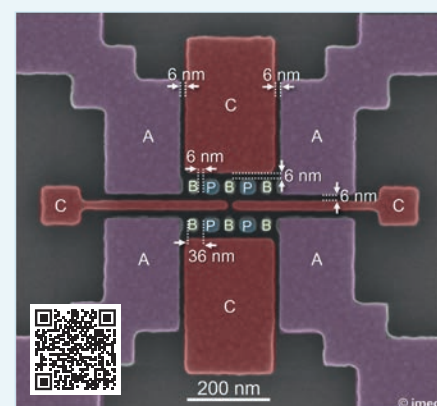
современной полупроводниковой промышленностью.

В кремниевых квантовых точках электроны удерживаются в сверхмалых структурах, а их спиновые состояния используются для хранения квантовой информации. Однако для стабильной работы кубитов требуется предельно высокая точность изготовления: размеры затворов и расстояния между ними должны составлять лишь несколько нанометров, чтобы минимизировать шумы и внешние помехи.

Imec сообщила, что смогла изготовить функционирующую сеть кубитов с расстояниями между затворами всего около 6 нм с использованием High-NA EUV-литографии. Подобная плотность размещения теоретически позволяет интегрировать миллионы кубитов на одном чипе.

Технология High-NA EUV считается следующим этапом эволюции экстремальной ультрафиолетовой литографии. Повышенная числовая апертура позволяет формировать структуры ещё меньшего размера с более высокой точностью. Именно поэтому High-NA EUV рассматривается как базовая технология для будущих ИИ-ускорителей, HPC-процессоров и памяти сверхвысокой плотности.

По сути, Imec демонстрирует переход квантовых устройств от эксперименталь-



ных лабораторных образцов к совместимому с 300-мм фабриками производству. Это особенно важно для отрасли, поскольку многие существующие квантовые платформы остаются сложными для массового изготовления и масштабирования.

Новая работа также продолжает предыдущие исследования Imec, где центр уже демонстрировал низкий уровень зарядового шума и стабильную работу кремниевых кубитов, совместимых с промышленными технологическими процессами. Интеграция High-NA EUV в этот процесс может стать одним из ключевых шагов к появлению полноценных производственных линий квантовых процессоров в будущем.