ФЕДЕРАЛЬНОЕ АГЕНТСТВО

ПО ТЕХНИЧЕСКОМУ РЕГУЛИРОВАНИЮ И МЕТРОЛОГИИ

НАЦИОНАЛЬНЫЙ СТАНДАРТ РОССИЙСКОЙ ФЕДЕРАЦИИ

ГОСТ Р 71922— 2024

МИКРОСХЕМЫ ИНТЕГРАЛЬНЫЕ. АНАЛОГО-ЦИФРОВЫЕ ПРЕОБРАЗОВАТЕЛИ

Методы измерения параметров характеристики преобразования

Издание официальное

Москва
Российский институт стандартизации
2025

gost.e-ecolog.ru

Предисловие

1 РАЗРАБОТАН Федеральным государственным бюджетным учреждением «Всероссийский научно-исследовательский институт радиоэлектроники» (ФГБУ «ВНИИР»)

2 ВНЕСЕН Техническим комитетом по стандартизации ТК 303 «Электронная компонентная база, материалы и оборудование»

3 УТВЕРЖДЕН И ВВЕДЕН В ДЕЙСТВИЕ Приказом Федерального агентства по техническому регулированию и метрологии от 27 декабря 2024 г. № 2045-ст

4 ВВЕДЕН ВПЕРВЫЕ

*Правила применения настоящего стандарта установлены в статье 26 Федерального закона от 29 июня 2015 г. № 162-ФЗ «О стандартизации в Российской Федерации». Информация об изменениях к настоящему стандарту публикуется в ежегодном (по состоянию на 1 января текущего года) информационном указателе «Национальные стандарты», а официальный текст изменений и поправок — в ежемесячном информационном указателе «Национальные стандарты». В случае пересмотра (замены) или отмены настоящего стандарта соответствующее уведомление будет опубликовано в ближайшем выпуске ежемесячного информационного указателя «Национальные стандарты». Соответствующая информация, уведомление и тексты размещаются также в информационной системе общего пользования — на официальном сайте Федерального агентства по техническому регулированию и метрологии в сети Интернет (*gost.e-ecolog.ru

© Оформление. ФГБУ «Институт стандартизации», 2025

Настоящий стандарт не может быть полностью или частично воспроизведен, тиражирован и распространен в качестве официального издания без разрешения Федерального агентства по техническому регулированию и метрологии

НАЦИОНАЛЬНЫЙ СТАНДАРТ РОССИЙСКОЙ ФЕДЕРАЦИИ

МИКРОСХЕМЫ ИНТЕГРАЛЬНЫЕ. АНАЛОГО-ЦИФРОВЫЕ ПРЕОБРАЗОВАТЕЛИ

Методы измерения параметров характеристики преобразования

Integrated circuits. Analog-digital converters.
Methods for measuring the parameters of the conversion characteristic

Дата введения — 2025—03—01

1 Область применения

Настоящий стандарт распространяется на интегральные микросхемы линейных аналого-цифровых преобразователей (АЦП) напряжения в цифровой код с числом эквивалентных двоичных разрядов до 32 включительно и устанавливает методы измерения следующих параметров:

- напряжения межкодового перехода $U[k]$;
- погрешности в заданной точке характеристики преобразования $E[k]$;
- погрешности смещения E_0;
- погрешности усиления $E_{ПШ}$;
- линеаризуемой погрешности в заданной точке характеристики преобразования $\overline{E}[k]$;
- линеаризуемой погрешности смещения $\overline{E}_0$;
- линеаризуемой погрешности усиления $\overline{E}_{ПШ}$;
- немонотонности характеристики преобразования;
- дифференциальной нелинейности (ДНЛ);
- интегральной нелинейности (ИНЛ);
- отношения сигнал/шум (SNR);
- отношения сигнал/шум и искажения (SINAD);
- диапазона, свободного от гармонических искажений (SFDR);
- полных нелинейных искажений (THD);
- интермодуляционных искажений m-го порядка ($IMD_{2,m}$).

Настоящий стандарт устанавливает два метода (далее — метод 1 и метод 2) измерения напряжения межкодового перехода и вычисления статических характеристик (погрешности в заданной точке характеристики преобразования, погрешности смещения, погрешности усиления, ДНЛ, ИНЛ), один метод (далее — метод 3) для определения немонотонности характеристики преобразования и измерения статических характеристик (линеаризуемой погрешности в заданной точке характеристики преобразования, линеаризуемой погрешности смещения, линеаризуемой погрешности усиления, ИНЛ) для случая, когда измерение межкодовых переходов невозможно, и один метод измерения динамических параметров АЦП (SFDR, SNR, SINAD, THD, IMD) (далее — метод 4).

Метод 1 рекомендуется применять для АЦП разрядностью 16 бит и менее в измерительных установках, используемых для многократно повторяющихся измерений какого-либо из параметров характеристики преобразования (ХП) в режиме слежения за значением этого параметра, например, при калибровке или функциональной настройке АЦП по одному из параметров характеристики преобразования.

Метод 2 рекомендуется применять как основной метод измерения напряжений межкодовых переходов и вычисления статических характеристик (погрешности в заданной точке характеристики преобразования, погрешности смещения, погрешности усиления, ДНЛ, ИНЛ) монотонных АЦП.

Метод 3 рекомендуется применять в случаях, когда местоположение межкодовых переходов согласно методам 1 и 2 определить невозможно, а также для определения немонотонности ХП АЦП.

Метод 4 рекомендуется применять для измерения динамических параметров АЦП.

Издание официальное

2 Нормативные ссылки

В настоящем стандарте использованы нормативные ссылки на следующие стандарты:

ГОСТ 12.1.019 Система стандартов безопасности труда. Электробезопасность. Общие требования и номенклатура видов защиты

ГОСТ 12.2.003 Система стандартов безопасности труда. Оборудование производственное. Общие требования безопасности

ГОСТ 22261 Средства измерений электрических и магнитных величин. Общие технические условия

ГОСТ Р 57391 Приборы ферритовые СВЧ. Классификация и система условных обозначений

ГОСТ Р 70226 Приборы ферритовые сверхвысокочастотного диапазона спин-волновые. Система параметров

Примечание — При пользовании настоящим стандартом целесообразно проверить действие ссылочных стандартов в информационной системе общего пользования — на официальном сайте Федерального агентства по техническому регулированию и метрологии в сети Интернет или по ежегодному информационному указателю «Национальные стандарты», который опубликован по состоянию на 1 января текущего года, и по выпускам ежемесячного информационного указателя «Национальные стандарты» за текущий год. Если заменен ссылочный стандарт, на который дана недатированная ссылка, то рекомендуется использовать действующую версию этого стандарта с учетом всех внесенных в данную версию изменений. Если заменен ссылочный стандарт, на который дана датированная ссылка, то рекомендуется использовать версию этого стандарта с указанным выше годом утверждения (принятия). Если после утверждения настоящего стандарта в ссылочный стандарт, на который дана датированная ссылка, внесено изменение, затрагивающее положение, на которое дана ссылка, то это положение рекомендуется применять без учета данного изменения. Если ссылочный стандарт отменен без замены, то положение, в котором дана ссылка на него, рекомендуется применять в части, не затрагивающей эту ссылку.

3 Термины, определения, сокращения и обозначения

3.1 В настоящем стандарте применены термины по ГОСТ Р 57391, ГОСТ Р 70226, [1], [2], а также следующие термины с соответствующими определениями:

3.1.1 **характеристика преобразования:** Зависимость между значением напряжения на аналоговом входе и множеством возможных значений выходного кода, заданная в виде таблицы, графика или формулы.

3.1.2 **номинальная характеристика преобразования:** Характеристика преобразования, установленная в технических условиях на аналого-цифровой преобразователь.

3.1.3 **действительная характеристика преобразования:** Характеристика преобразования, найденная экспериментальным путем, и настолько приближающаяся к истинной характеристике преобразования, что для данной цели может быть использована вместо нее.

3.1.4 **число эквивалентных двоичных разрядов:** Округленный до целого числа в сторону увеличения двоичный логарифм номинального числа возможных значений выходного кода.

3.1.5 **номинальное значение напряжения межкодового перехода:** Определенное по номинальной характеристике преобразования значение напряжения на аналоговом входе, соответствующее переходу от предыдущего к заданному значению выходного кода.

3.1.6 **действительное значение напряжения межкодового перехода:** Действительное значение напряжения на аналоговом входе, статистические вероятности преобразования которого в заданное и предшествующее заданному значения выходного кода равны.

3.1.7 **заданная точка характеристики преобразования:** Точка характеристики преобразования, определяемая заданным значением напряжения межкодового перехода и соответствующим ему значением выходного кода.

3.1.8 **номинальное значение кванта преобразования:** Отношение разности действительных значений напряжения конечного и первого межкодовых переходов к числу $(2^N - 2)$, где N — разрядность аналого-цифрового преобразователя.

3.1.9 **единица младшего разряда;** EMP: В зависимости от контекста: номинальное значение кванта преобразования или разряд натурального двоичного кода, имеющий наименьший позиционный вес.

3.1.10 **номинальный диапазон входного напряжения:** Область значений напряжения на аналоговом входе, ограниченная значениями напряжения, соответствующими конечной и начальной точкам номинальной характеристики преобразования.

3.1.11 **действительный диапазон входного напряжения:** Область значений напряжения на аналоговом входе, ограничения значениями напряжения, соответствующими конечной и начальной точкам действительной характеристики преобразования.

3.1.12 **погрешность аналого-цифрового преобразователя в заданной точке характеристики преобразования $\overline{E}[k]$:** Разность действительного и номинального значений напряжения заданного межкодового перехода после вычета погрешности смещения.

3.1.13 **погрешность смещения E_0:** Отклонение действительного значения напряжения первого межкодового перехода от номинального значения напряжения первого межкодового перехода.

Примечание — Определяют в нулевой точке характеристики преобразования.

3.1.14 **погрешность усиления $E_{ПШ}$:** Отклонение действительного значения напряжения конечного межкодового перехода от номинального значения напряжения конечного межкодового перехода после вычета погрешности смещения.

Примечание — Определяют в конечной точке характеристики преобразования.

3.1.15 **линеаризуемая погрешность в заданной точке действительной характеристики преобразования $\overline{E}[k]$:** Отклонение номинального значения напряжения заданного межкодового перехода от значения напряжения заданного межкодового перехода, определяемого прямой, линеаризирующей действительную характеристику преобразования аналого-цифрового преобразователя после вычета погрешности смещения.

Примечание — Способ проведения линеаризирующей прямой — метод наименьших квадратов через все измеренные точки характеристики преобразования. Вычисляется, если невозможно измерить действительное значение напряжения межкодового перехода.

3.1.16 **линеаризуемая погрешность смещения $\overline{E}_0$:** Отклонение номинального значения напряжения первого межкодового перехода от значения напряжения первого межкодового перехода, определяемого прямой, линеаризирующей действительную характеристику преобразования аналого-цифрового преобразователя.

Примечание — Определяют в нулевой точке действительной характеристики преобразования. Способ проведения линеаризирующей прямой — с помощью метода наименьших квадратов через все измеренные точки действительной характеристики преобразования. Вычисляется, если невозможно измерить действительное значение напряжения межкодового перехода.

3.1.17 **линеаризуемая погрешность усиления $\overline{E}_{ПШ}$:** Отклонение номинального значения напряжения крайнего межкодового перехода от значения напряжения крайнего межкодового перехода, определяемого прямой, линеаризирующей действительную характеристику преобразования аналого-цифрового преобразователя после вычета погрешности смещения.

Примечание — Определяют в конечной точке действительной характеристики преобразования. Способ проведения линеаризирующей прямой — с помощью метода наименьших квадратов через все измеренные точки характеристики преобразования. Вычисляется, если невозможно измерить действительное значение напряжения межкодового перехода.

3.1.18 **дифференциальная нелинейность в заданной точке характеристики преобразования ДНЛ[k]:** Отклонение разности действительных значений напряжения, заданного и предшествующего заданному значению межкодовых переходов от номинального значения единицы младшего разряда.

3.1.19 **интегральная нелинейность в заданной точке характеристики преобразования ИНЛ[k]:** Отклонение действительного значения напряжения, заданного межкодового перехода от значения напряжения заданного межкодового перехода, определяемого установленным способом — проведенной прямой, линеаризирующей действительную характеристику преобразования.

Примечание — Способ проведения линеаризирующей прямой — через конечные точки действительной характеристики преобразования или с помощью метода наименьших квадратов через все точки действительной характеристики преобразования.

3.1.20 **диапазон, свободный от гармонических искажений:** Отношение среднеквадратичного значения амплитуды основного сигнала (несущей) к среднеквадратичному значению наибольшей паразитной или гармонической составляющей, измеренное в полосе пропускания Найквиста (от 0 до $F_S/2$).

3.1.21 **отношение сигнал/шум и искажения:** Отношение среднеквадратического значения амплитуды основного сигнала к значению корня из суммы квадратов всех других спектральных составляющих, включая гармонические и паразитные составляющие, но исключая постоянную составляющую и основную частоту, измеренное в полосе пропускания Найквиста (от 0 до $F_S/2$).

3.1.22 **отношение сигнал/шум:** Отношение среднеквадратичного значения амплитуды основного сигнала к среднеквадратичному значению корня из суммы квадратов всех остальных составляющих спектра, исключая постоянную составляющую, основную частоту и наибольшие 10 паразитных и гармонических составляющих (если иное число не установлено в технических условиях), измеренное в полосе пропускания Найквиста (от 0 до $F_S/2$).

3.1.23 **полные гармонические искажения:** Отношение среднего значения корня из суммы квадратов наибольших 10 паразитных и гармонических составляющих (если иное число не установлено в технических условиях) к среднеквадратичному значению сигнала на основной частоте, измеренное в полосе пропускания Найквиста (от 0 до $F_S/2$).

3.1.24 **двухтональные интермодуляционные искажения $IMD_{2,m}$ *m*-го порядка:** Отношение среднеквадратичного значения амплитуды сигнала на одном из основных тонов с частотами F_1 и F_2 равной амплитуды к среднеквадратичному значению наибольшей гармонической спектральной составляющей *m*-го порядка в полосе пропускания Найквиста (от 0 до $F_S/2$).

Примечание — Если не указан порядок интермодуляционных искажений, то они относятся к составляющим третьего порядка с частотами ($2F_2 - F_1$) или ($2F_1 - F_2$).

3.1.25 **полоса пропускания аналого-цифрового преобразователя:** Входная частота, при которой амплитуда в спектре восстановленного основного сигнала уменьшается на величину 3 дБ для полномасштабного входного сигнала.

3.1.26 **полоса пропускания Найквиста (частота Найквиста):** Половина частоты дискретизации.

Примечание — Если частота дискретизации равна F_S, то полоса пропускания Найквиста равна $F_S/2$.

3.1.27 **гармонические искажения в спектре**: Частотные компоненты, кратные основной частоте сигнала.

3.1.28 **паразитные искажения в спектре:** Частотные компоненты, не кратные основной частоте сигнала.

3.1.29 **дискретное преобразование Фурье;** ДПФ: Математическая операция, преобразующая оцифрованные данные из числовой области в частотную область.

3.1.30 **быстрое преобразование Фурье;** БПФ: Алгоритм вычисления дискретного преобразования Фурье.

3.2 В настоящем стандарте применены следующие сокращения и обозначения:

дБн — децибелы по отношению к несущей;

дБПШ — децибелы по отношению к полной шкале аналого-цифрового преобразователя;

ЕМР — единица младшего разряда;

ИОН — источник опорного напряжения;

МНК — метод наименьших квадратов;

НОД — наименьший общий делитель;

ТУ — технические условия;

ЦАП — цифро-аналоговый преобразователь;

$V_{ПШ,ном}$ — номинальный диапазон входного напряжения;

$V_{ПШ}$ — действительный диапазон входного напряжения;

N — разрядность АЦП.

4 Измерение напряжения межкодового перехода

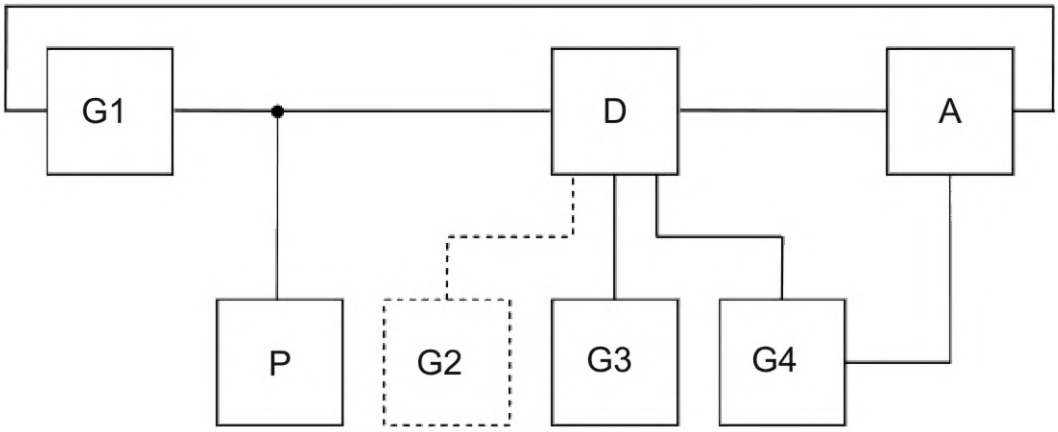
4.1 Метод 1

Напряжение межкодового перехода определяют путем измерения среднего значения напряжения на аналоговом входе АЦП, частоты преобразования которого в заданное и предшествующее заданному значения выходного кода равны.

4.1.1 Аппаратура

4.1.1.1 Измерение следует проводить на установке, структурная схема которой приведена на рисунке 1.

4.1.1.2 Управляемый источник напряжения G1 должен обеспечивать изменение напряжения на выходе по командам на управляющем входе. Диапазон изменения напряжения на выходе источника должен превышать полный диапазон входных напряжений АЦП не более чем на 10 %.



- - - - — опционально; —— — обязательно; D — АЦП; A — вычислительное устройство; G1 — управляемый источник напряжения; G2 — ИОН; G3 — источник напряжения питания; G4 — цифровое устройство ввода-вывода; P — измеритель постоянного напряжения

Примечание — При измерении электрических параметров АЦП со встроенным ИОН источник G2 в измерительной установке может отсутствовать.

Рисунок 1

Амплитудное значение напряжения пульсаций постоянного напряжения на выходе источника не должно превышать 1/4 от номинального значения ЕМР.

Допускается в качестве источника G1 применять ЦАП. Дискретность задания фиксированных значений постоянного напряжения при этом не должна превышать 1/16 от номинального значения ЕМР АЦП.

4.1.1.3 ИОН G2 должен обеспечивать подачу напряжения, параметры которого должны соответствовать установленным в ТУ.

4.1.1.4 Источник напряжения питания G3 должен обеспечивать подачу напряжений питания, значения которых должны соответствовать установленным в ТУ.

4.1.1.5 Цифровое устройство ввода-вывода G4 должно обеспечивать подачу управляющих сигналов, сигналов тактирования, осуществлять обмен данными с АЦП, используя цифровой интерфейс.

Параметры цифровых сигналов на выходе устройства G4 (частота, амплитуда, время нарастания, длительность, время спада) должны соответствовать установленным в ТУ.

4.1.1.6 Измеритель постоянного напряжения P должен обеспечивать измерение среднего значения напряжения на аналоговом входе. Относительная погрешность измерителя постоянного напряжения P должна быть в пределах ±1/16 от ЕМР в диапазоне измерения, соответствующем номинальному диапазону входного напряжения АЦП.

4.1.1.7 Вычислительное устройство A должно обеспечивать сравнение значения выходного кода АЦП со значением кода, соответствующим заданной точке ХП, и формирование управляющего воздействия на управляемый источник напряжения G1 за интервал времени, не превышающий период преобразования АЦП.

Управляющее воздействие на источник G1 должно быть направлено в сторону увеличения значения выходного кода АЦП в случае, если полученное в результате текущего цикла преобразования значение выходного кода АЦП меньше заданного значения, и в сторону уменьшения выходного кода — если оно больше или равно заданному значению.

4.1.2 Подготовка к измерениям

4.1.2.1 Подготавливают измерительную установку к работе в соответствии с эксплуатационной документацией на установку.

4.1.2.2 Подключают АЦП к измерительной установке.

4.1.3 Проведение измерений

4.1.3.1 Напряжение питания от источника G3 и опорное напряжение от источника G2 подают в порядке, установленном в ТУ.

4.1.3.2 Сигналы управления, тактовые сигналы подают с цифрового устройства ввода-вывода G4. При наличии конфигурационных регистров проводят их инициализацию, выполняют калибровку.

4.1.3.3 Переводят измерительную установку в режим автоматического поиска и отслеживания значения напряжения заданного межкодового перехода.

4.1.3.4 Измеряют напряжение заданного межкодового перехода измерителем Р.

4.1.4 Показатели точности измерений

4.1.4.1 Погрешность измерения напряжения межкодового перехода с установленной вероятностью 0,95 должна соответствовать установленной в ТУ и находиться в диапазоне:

а) ±1/8 EMP — для АЦП с числом эквивалентных двоичных разрядов до 10;

б) ±1/4 EMP — для АЦП с числом эквивалентных двоичных разрядов от 11 до 14;

в) ±1/2 EMP — для АЦП с числом эквивалентных двоичных разрядов от 15 до 16.

4.1.4.2 Формула для расчета показателей точности измерений приведена в приложении А.

4.1.5 Измерение погрешности в заданной точке ХП

4.1.5.1 Погрешность в заданной точке ХП $E[k]$ определяют путем вычисления отклонения действительного значения напряжения заданного межкодового перехода от номинального значения напряжения заданного межкодового перехода после вычета погрешности смещения.

Погрешность смещения E_0 определяют в нулевой точке ХП путем вычисления отклонения действительного значения напряжения первого межкодового перехода от номинального значения напряжения первого межкодового перехода.

Погрешность усиления $E_{ПШ}$ определяют в конечной точке ХП путем вычисления отклонения действительного значения напряжения конечного межкодового перехода от номинального значения напряжения конечного межкодового перехода после вычета погрешности смещения.

4.1.5.2 Измерение напряжений первого $U[1]$, конечного $U[2^N - 1]$ и заданного $U[k]$ межкодовых переходов — в соответствии с 4.1.3.

Значение погрешности смещения E_0 в EMP рассчитывают по формуле

$$E_0 = \frac{U_{ном}[1] - U[1]}{Q}, \quad (1)$$

где $U_{ном}[1]$ — номинальное значение напряжения первого межкодового перехода;

$U[1]$ — действительное значение напряжения первого межкодового перехода;

Q — номинальное значение кванта преобразования, вычисляемое по формуле

$$Q = \frac{V_{ПШ,ном}}{\left(2^N - 2\right)}, \quad (2)$$

где $V_{ПШ,ном}$ — номинальный диапазон входного напряжения;

N — разрядность АЦП.

Значение погрешности в заданной точке ХП $E[k]$ в EMP рассчитывают по формуле

$$E[k] = \frac{U_{ном}[k] - U[k]}{Q} - E_0, \quad (3)$$

где $k \in [2; 2^N - 1]$;

$U_{ном}[k]$ — номинальное значение напряжения k-го межкодового перехода ($k \in [2; 2^N - 1]$).

Значение погрешности усиления $E_{ПШ}$ в EMP рассчитывают по формуле

$$E_{ПШ} = \frac{U_{ном}\left[2^N - 1\right] - U\left[2^N - 1\right]}{Q} - E_0, \quad (4)$$

где $U_{ном}[2^N - 1]$ — номинальное значение напряжения крайнего межкодового перехода.

4.1.5.3 Формула для расчета показателей точности измерений приведена в приложении А.

4.1.6 Измерение ДНЛ

4.1.6.1 ДНЛ определяют путем нахождения максимального по абсолютной величине значения $\max\{|ДНЛ[k]|\}$. Значения ДНЛ$[k]$ определяются для всех точек ХП.

4.1.6.2 ДНЛ$[k]$ в заданной точке ХП определяют путем нахождения отклонения разности действительных значений напряжения, заданного и предшествующего заданному значению межкодовых переходов от номинального значения EMP.

4.1.6.3 Измерение напряжений первого $U[1]$, конечного $U[2^N - 1]$, заданного $U[k]$ и смежного с заданным $U[k - 1]$ межкодовых переходов — в соответствии с 4.1.3.

4.1.6.4 Значение ДНЛ в заданной точке ХП ДНЛ[k] в ЕМР рассчитывают по формуле

$$\text{ДНЛ}[k] = \frac{U[k] - U[k-1]}{Q} - 1. \quad (5)$$

4.1.7 Измерение ИНЛ

4.1.7.1 ИНЛ определяют путем нахождения максимального по абсолютной величине значения max{|ИНЛ[k]|}. Значения ИНЛ[k] определяются для всех точек ХП.

4.1.7.2 ИНЛ[k] в заданной точке ХП определяют путем нахождения отклонения действительного значения напряжения заданного межкодового перехода от значения напряжения заданного межкодового перехода, определяемого прямой, линеаризирующей действительную ХП АЦП.

Способ проведения линеаризирующей прямой — через конечные точки действительной ХП или с помощью МНК через все точки действительной ХП. В примечаниях к значениям ИНЛ необходимо указать способ проведения линеаризирующей прямой.

4.1.7.3 Измерение напряжений первого $U[k]$, конечного $U[2^N - 1]$ и заданного $U[k]$ межкодовых переходов — в соответствии с 4.1.3.

4.1.7.4 Значение ИНЛ относительно прямой, проведенной через начальную и конечную точки ХП, для заданной точки ХП в ЕМР рассчитывают по формуле

$$\text{ИНЛ}[k] = \frac{Q(k-1) - (G \cdot U[k] + V_{OS})}{Q(2^N - 1)} \cdot (2^N - 2), \quad (6)$$

где коэффициенты G и V_{OS} рассчитываются по формулам:

$$G = \frac{Q(2^N - 2)}{U[2^N - 1] - U[1]}; \quad (7)$$

$$V_{OS} = U_{\text{ном}}[1] - G \cdot U[1]. \quad (8)$$

4.1.7.5 Значение ИНЛ относительно прямой, проведенной с помощью МНК через все точки ХП, для заданной точки ХП в ЕМР рассчитывают по формуле

$$\text{ИНЛ}[k] = \frac{Q(k-1) - (G \cdot U[k] + V_{OS})}{Q(2^N - 1)} \cdot (2^N - 2), \quad (9)$$

где коэффициенты G и V_{OS} рассчитываются по формулам:

$$G = \frac{Q(2^N - 1) \cdot \left(\sum_{k=1}^{2^N - 1} k \cdot U[k] - 2^{N-1} \cdot \sum_{k=1}^{2^N - 1} U[k] \right)}{(2^N - 1) \cdot \sum_{k=1}^{2^N - 1} U[k]^2 - \left(\sum_{k=1}^{2^N - 1} U[k] \right)^2}; \quad (10)$$

$$V_{OS} = U[1] + Q(2^{N-1} - 1) - \frac{G}{(2^N - 1)} \cdot \sum_{k=1}^{2^N - 1} U[k]. \quad (11)$$

4.1.7.6 Погрешность измерения ДНЛ и ИНЛ в заданной точке ХП с установленной вероятностью 0,95 должна соответствовать установленной в ТУ и находиться в диапазоне:

а) ±1/8 ЕМР — для АЦП с числом эквивалентных двоичных разрядов до 10;

б) ±1/4 ЕМР — для АЦП с числом эквивалентных двоичных разрядов от 11 до 14;

в) ±1/2 ЕМР — для АЦП с числом эквивалентных двоичных разрядов от 15 до 16.

4.2 Метод 2

Напряжение межкодового перехода определяют на основании подсчета количества появлений каждого из возможных значений выходного кода АЦП, функционирующего в режиме оцифровки входного сигнала с известной плотностью вероятности. В качестве входных аналоговых сигналов используются линейно возрастающий или синусоидальный однотональный сигналы.

Максимальная величина превышения входным сигналом номинального диапазона входного напряжения не должна быть больше, чем 10 % от $V_{ПШ,ном}$.

Минимальная величина превышения входным сигналом номинального диапазона входного напряжения V_δ для достижения точности измерения статических параметров в β EMP должна удовлетворять условию

$$V_\delta \geq \max\left\{2 \cdot \sigma;\ \frac{\sigma^2 \cdot 2^N}{V_{ПШ,ном} \cdot \beta}\right\}, \quad (12)$$

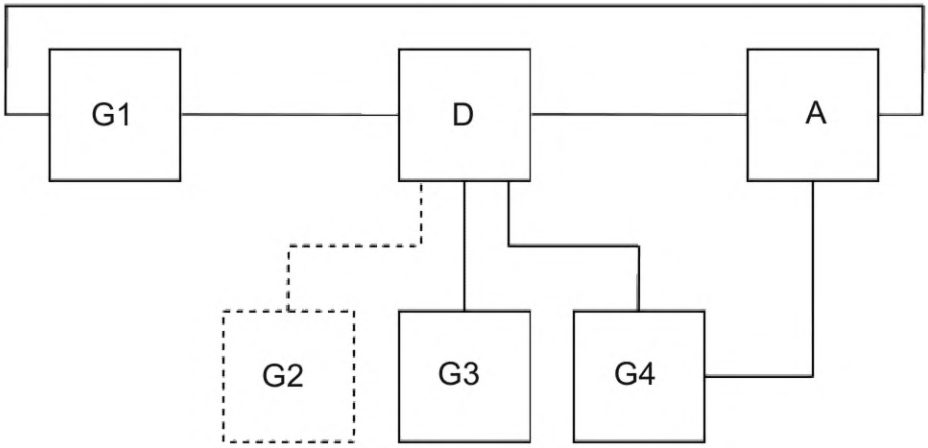
где σ — стандартное отклонение аддитивного случайного шума во входных единицах;

β — желаемая точность определения межкодовых переходов в EMP.

4.2.1 Тестирование методом гистограммы с линейно изменяющимся входным сигналом

4.2.1.1 Аппаратура

Измерение следует проводить на установке, структурная схема которой приведена на рисунке 2.



- - - - — опционально; —— — обязательно; D — АЦП; G1 — источник линейно изменяющегося напряжения; G2 — ИОН; G3 — источник напряжения питания; G4 — цифровое устройство ввода-вывода; A — вычислительное устройство

Примечание — При измерении электрических параметров АЦП со встроенным ИОН источник G2 в измерительной установке может отсутствовать.

Рисунок 2

Источник линейно изменяющегося напряжения должен обеспечивать подачу на аналоговый вход АЦП линейно изменяющегося напряжения в диапазоне, перекрывающем диапазон всех возможных значений напряжения межкодовых переходов АЦП. Допускается использовать генератор сигнала треугольной формы. Частота сигнала не должна быть субгармоникой частоты дискретизации АЦП.

ИНЛ источника G1 во всем диапазоне значений выходного напряжения должна соответствовать установленной в ТУ и находиться в интервале:

а) ±1/8 от номинального значения EMP — для АЦП с числом эквивалентных двоичных разрядов до 10 включительно;

б) ±1/4 от номинального значения EMP — для АЦП с числом эквивалентных двоичных разрядов от 11 до 14;

в) ±1/2 от номинального значения EMP — для АЦП с числом эквивалентных двоичных разрядов от 15 до 32.

Требования к ИОН G2 — по 4.1.1.3.

Требования к источнику напряжения питания G3 — по 4.1.1.4.

Требования к цифровому устройству ввода-вывода G4 — по 4.1.1.5. Нестабильность частоты импульсов за время измерения должна соответствовать установленным в ТУ требованиям или не должна превышать 10^{-6}.

Вычислительное устройство *A* должно обеспечивать сбор выходных оцифрованных данных АЦП с частотой дискретизации, накопление гистограмм выпадения каждого кода и обработку собранных данных в соответствии с формулами (13)—(25).

Измерительная установка должна обеспечивать цифровую индикацию результатов измерения параметров ХП.

4.2.1.2 Подготовка к измерениям

Подготавливают измерительную установку к работе в соответствии с эксплуатационной документацией на установку.

Подключают АЦП к измерительной установке.

4.2.1.3 Проведение измерений

Напряжение питания от источника G3 и опорное напряжение от источника G2 подают в порядке, установленном в ТУ.

Сигналы управления, тактовые сигналы подают с цифрового устройства ввода-вывода G4. При наличии конфигурационных регистров проводят их инициализацию, выполняют калибровку.

На аналоговый вход АЦП подают линейно изменяющееся напряжение от источника G1. Диапазон изменения напряжения на выходе источника G1 должен превышать номинальный диапазон входного напряжения АЦП. Вычислительное устройство А производит накопление статистики выпадения всех кодов $H[k]$, $k \in [0; 2^N - 1]$).

Значения напряжений межкодовых переходов рассчитывают по формуле

$$U[k] = V_0 + \sum_{i=0}^{k} \frac{H[i] \cdot (V_1 - V_0)}{M}, \tag{13}$$

где V_0 — начальное значение входного тестового напряжения, В;

V_1 — конечное значение входного тестового напряжения, В;

$H[i]$ — количество выпадений кода i;

M — полное количество событий всех кодов, определяемое по формуле

$$M = \sum_{k=0}^{2^N - 1} H[k]. \tag{14}$$

В случае если ХП АЦП не является монотонной, использование метода 2 для измерения местоположения межкодовых переходов не допускается. В таких случаях необходимо применять метод 1 или 3 для проведения измерений.

4.2.1.4 Показатели точности измерений

Минимальное количество выборок M_t, необходимое для точности в β EMP и уровня доверительной вероятности $(1 - \alpha)$, определяется по формуле, где $Z_{\alpha/2}$ находится по таблице 1.

$$M_t \geq \frac{Z^2_{\alpha/2} \cdot \pi \cdot 2^N - 1}{\beta^2}. \tag{15}$$

Таблица 1 — Таблица стандартного нормального распределения для заданного значения α

α	$1 - \alpha$	$Z_{\alpha/2}$
0,2	0,8	1,28
0,1	0,9	1,64
0,05	0,95	1,96
0,02	0,98	2,33
0,001	0,999	3,29

Окончание таблицы 1

α	$1 - \alpha$	$z_{\alpha/2}$
0,01	0,99	2,58
0,005	0,995	2,81
0,002	0,998	3,09
Пример — Чтобы измерить ДНЛ 8-разрядного АЦП с точностью до 0,1 ЕМР с достоверностью 99 %, необходимо 268 000 выборок. У 12-разрядного АЦП для достоверности 99 % и точности 0,1 ЕМР необходимо 4,2 миллиона выборок.		

4.2.1.5 Измерение погрешности в заданной точке ХП

Погрешность в заданной точке ХП $E[k]$ определяют путем нахождения отклонения действительного значения напряжения заданного межкодового перехода от номинального значения напряжения заданного межкодового перехода после вычета погрешности смещения.

Погрешность смещения E_0 определяют в нулевой точке ХП путем нахождения отклонения действительного значения напряжения первого межкодового перехода от номинального значения напряжения первого межкодового перехода.

Погрешность усиления $E_{ПШ}$ определяют в конечной точке ХП путем нахождения отклонения действительного значения напряжения конечного межкодового перехода от номинального значения напряжения конечного межкодового перехода после вычета погрешности смещения.

Измерение напряжений первого $U[1]$, конечного $U[2^N - 1]$ и заданного $U[k]$ межкодовых переходов — по 4.2.1.3.

Значение погрешности смещения E_0 в ЕМР рассчитывают по формуле

$$E_0 = \frac{U_{ном}[1] - U[1]}{Q}. \quad (16)$$

Значение погрешности в заданной точке ХП в ЕМР рассчитывают по формуле

$$E[k] = \frac{U_{ном}[k] - U[k]}{Q} - E_0, \quad (17)$$

где $k \in [2; 2^N - 1]$.

Значение погрешности усиления $E_{ПШ}$ в ЕМР рассчитывают по формуле

$$E_{ПШ} = \frac{U_{ном}\left[2^N - 1\right] - U\left[2^N - 1\right]}{Q} - E_0. \quad (18)$$

4.2.1.6 Измерение ДНЛ

ДНЛ определяют путем нахождения максимального по абсолютной величине значения $\max\{|ДНЛ[k]|\}$. Значения ДНЛ[k] определяются для всех точек ХП.

ДНЛ[k] в заданной точке ХП определяют путем нахождения отклонения разности действительных значений напряжения заданного и предшествующего заданному межкодовых переходов от номинального значения ЕМР.

Измерение напряжений первого $U[1]$, конечного $U[2^N - 1]$, заданного $U[k]$ и смежного с заданным $U[k - 1]$ межкодовых переходов — по 4.2.1.3.

Значение ДНЛ в заданной точке ХП ДНЛ[k] в ЕМР рассчитывают по формуле

$$ДНЛ[k] = \frac{U[k] - U[k-1]}{Q} - 1. \quad (19)$$

4.2.1.7 Измерение ИНЛ

ИНЛ определяют путем нахождения максимального по абсолютной величине значения $\max\{|ИНЛ[k]|\}$. Значения ИНЛ[k] определяются для всех точек ХП.

ИНЛ[k] в заданной точке ХП определяют путем нахождения отклонения действительного значения напряжения заданного межкодового перехода от значения напряжения заданного межкодового перехода, определяемого прямой, линеаризирующей действительную ХП АЦП.

Способ проведения линеаризирующей прямой — через конечные точки действительной ХП или с помощью МНК через все точки действительной ХП. В примечаниях к значениям ИНЛ[k] необходимо указать способ проведения линеаризирующей прямой.

Измерение напряжений первого $U[1]$, конечного $U[2^N - 1]$ и заданного $U[k]$ межкодовых переходов — в соответствии с 4.2.1.3.

Значение ИНЛ[k] относительно прямой, проведенной через начальную и конечную точки действительной ХП для заданной точки действительной ХП, рассчитывают по формуле

$$\text{ИНЛ}[k] = \frac{Q(k-1) - (G \cdot U[k] + V_{OS})}{Q(2^N - 1)} \cdot (2^N - 2), \tag{20}$$

где коэффициенты G и V_{OS} рассчитываются по формулам:

$$G = \frac{Q(2^N - 2)}{U[2^N - 1] - U[1]}; \tag{21}$$

$$V_{OS} = U_{\text{ном}}[1] - G \cdot U[1]. \tag{22}$$

Значение ИНЛ[k] относительно прямой, проведенной с помощью МНК через все точки действительной ХП, для заданной точки действительной ХП рассчитывают по формуле

$$\text{ИНЛ}[k] = \frac{Q(k-1) - (G \cdot U[k] + V_{OS})}{Q(2^N - 1)} \cdot (2^N - 2), \tag{23}$$

где коэффициенты G и V_{OS} рассчитываются по формулам:

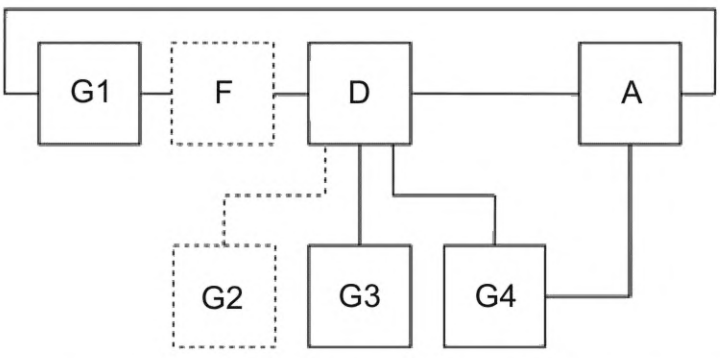
$$G = \frac{Q(2^N - 1) \cdot \left(\sum_{k=1}^{2^N - 1} k \cdot U[k] - 2^{N-1} \cdot \sum_{k=1}^{2^N - 1} U[k] \right)}{(2^N - 1) \cdot \sum_{k=1}^{2^N - 1} U[k]^2 - \left(\sum_{k=1}^{2^N - 1} U[k] \right)^2}; \tag{24}$$

$$V_{OS} = U[1] + Q(2^{N-1} - 1) - \frac{G}{(2^N - 1)} \cdot \sum_{k=1}^{2^N - 1} U[k]. \tag{25}$$

4.2.2 Тестирование методом гистограммы с синусоидальным входным сигналом

4.2.2.1 Аппаратура

Измерение следует проводить на установке, структурная схема которой приведена на рисунке 3.



- - - - — опционально; —— — обязательно; D — АЦП; G1 — источник синусоидального напряжения; G2 — ИОН; G3 — источник напряжения питания; G4 — цифровое устройство ввода-вывода; F — фильтр; A — вычислительное устройство

Примечание — При измерениях параметров АЦП со встроенным ИОН источник G2 в измерительной установке может отсутствовать.

Рисунок 3

Полные нелинейные искажения источника сигнала G1 должны быть на 10 дБ меньше значений соответствующих динамических параметров АЦП в диапазоне напряжений, соответствующем номинальному диапазону входного напряжения АЦП, и в диапазоне частот, соответствующем полосе пропускания АЦП. Допускается использовать источники сигнала с более высокими искажениями совместно с входным фильтром F, в этом случае в примечаниях к измеренным параметрам приводится описание измерительной установки с описанием основных характеристик фильтра F.

Источник синусоидального напряжения должен обеспечивать подачу на аналоговый вход АЦП синусоидального напряжения в диапазоне, перекрывающем диапазон всех возможных значений напряжения межкодовых переходов АЦП. Частота сигнала не должна быть субгармоникой частоты дискретизации АЦП.

Необходимо отрегулировать смещение входного синусоидального сигнала таким образом, чтобы число выпадений кодов в интервале $\{0; 2^{N-1} - 1\}$ равнялось числу выпадений кодов в интервале $\{2^{N-1}; 2^{N} - 1\}$, то есть выполнялось равенство

$$\sum_{n=0}^{2^{N-1}-1} h(n) = \sum_{n=2^{N-1}}^{2^{N}-1} h(n). \quad (26)$$

В оцифрованных данных должно быть целое число J периодов синусоидального сигнала. Количество периодов синусоидального сигнала J и количество оцифрованных данных M должно быть взаимно простыми числами. Частота входного синусоидального сигнала F_i и частота дискретизации АЦП F_S должны удовлетворять условию когерентной дискретизации

$$F_i = \left(\frac{J}{M}\right) \cdot F_S, \quad (27)$$

где J — целое число (количество периодов синусоидального сигнала в выборке), НОД(M;J) = 1;

M — длина выборки;

F_S — частота дискретизации.

Требования к ИОН G2 — по 4.1.1.3.

Требования к источнику напряжения питания G3 — по 4.1.1.4.

Требования к цифровому устройству ввода-вывода G4 — по 4.1.1.5. Нестабильность частоты импульсов за время измерения должна соответствовать требованиям, установленным в ТУ, или не должна превышать 10^{-6}.

Вычислительное устройство A должно обеспечивать сбор выходных оцифрованных данных АЦП с частотой дискретизации, накопление гистограмм выпадения каждого кода и обработку собранных данных — в соответствии с формулами (28)—(39).

Измерительная установка должна обеспечивать цифровую индикацию результатов измерения параметров ХП.

4.2.2.2 Подготовка к измерениям

Подготавливают измерительную установку к работе в соответствии с эксплуатационной документацией на установку.

Подключают АЦП к измерительной установке.

4.2.2.3 Проведение измерений

Напряжение питания от источника G3 и опорное напряжение от источника G2 подают в порядке, установленном в ТУ.

Сигналы управления и тактовые сигналы подают с цифрового устройства ввода-вывода G4. При наличии конфигурационных регистров проводят их инициализацию, выполняют калибровку.

На аналоговый вход АЦП подают синусоидальное напряжение от источника G1 в соответствии с 4.2.2.1. Вычислительное устройство A производит накопление статистики выпадения всех кодов $H[k]$, где $k \in [0; 2^{N} - 1]$). В примечании к измеренным статическим параметрам необходимо указать частоту дискретизации, частоту входного сигнала и общее количество оцифрованных точек, используемых для вычисления параметров.

Значения напряжений межкодовых переходов рассчитываются по формуле

$$U[k] = C - A \cdot \cos\left(\frac{\pi \cdot \sum_{i=0}^{k} H[i]}{M}\right), \quad (28)$$

где A — амплитуда входного сигнала, В;

C — постоянная составляющая входного сигнала, В;

$H[i]$ — количество выпадений кода i;

M — полное количество событий всех кодов, определяемое по формуле (14).

В случае немонотонности ХП АЦП производить измерение местоположения кодовых переходов по методу 2 не допускается. Тогда следует проводить измерения согласно методу 1 или 3.

4.2.2.4 Показатели точности измерений

Допускается проводить накопление статистики из нескольких серий R по M выборок в каждой. Минимальное количество отсчетов $R_t \cdot M_t$ определяется в соответствии с 4.2.1.4.

4.2.2.5 Измерение погрешности в заданной точке ХП

Если амплитуда и смещение входного сигнала неизвестны, то данный метод дает оценку местоположения межкодовых переходов с точностью до ошибки смещения и усиления. В таком случае рассчитанные местоположения межкодовых переходов $U'[k]$ будут связаны с истинным местоположением межкодовых переходов соотношением

$$U'[k] = a \cdot U[k] + b, \tag{29}$$

где a, b — константы.

Погрешность в заданной точке ХП $E[k]$ определяют путем нахождения отклонения действительного значения напряжения заданного межкодового перехода от номинального значения напряжения заданного межкодового перехода после вычета погрешности смещения.

Погрешность смещения E_0 определяют в нулевой точке ХП путем нахождения отклонения действительного значения напряжения первого перехода.

Погрешность усиления $E_{\text{ПШ}}$ определяют в конечной точке ХП путем нахождения отклонения действительного значения напряжения конечного межкодового перехода от номинального значения напряжения конечного межкодового перехода после вычета погрешности смещения.

Измерение напряжений первого $U[k]$, конечного $U[2^N - 1]$ и заданного $U[k]$ межкодовых переходов — в соответствии с 4.2.2.3.

Значение погрешности смещения E_0 в ЕМР рассчитывают по формуле

$$E_0 = \frac{U_{\text{ном}}[1] - U[1]}{Q}. \tag{30}$$

Значение погрешности $E[k]$ в заданной точке ХП в ЕМР рассчитывают по формуле

$$E[k] = \frac{U_{\text{ном}}[k] - U[k]}{Q} - E_0, \tag{31}$$

где ($k \in [2; 2^N - 1]$).

Значение погрешности усиления в ЕМР рассчитывают по формуле

$$E_{\text{ПШ}} = \frac{U_{\text{ном}}\left[2^N - 1\right] - U\left[2^N - 1\right]}{Q} - E_0. \tag{32}$$

4.2.2.6 Измерение ДНЛ

ДНЛ определяют путем нахождения максимального по абсолютной величине значения $\max\{|\text{ДНЛ}[k]|\}$. Значения ДНЛ*[k]* определяются для всех точек ХП.

ДНЛ[k] в заданной точке ХП определяют путем нахождения отклонения разности действительных значений напряжения заданного и предшествующего заданному межкодовых переходов от номинального значения ЕМР.

Измерение напряжений первого $U[1]$, конечного $U[2^N - 1]$, заданного $U[k]$ и смежного с заданным $U[k - 1]$ межкодовых переходов — в соответствии с 4.2.2.3.

Значение ДНЛ в заданной точке ХП ДНЛ[k] в ЕМР рассчитывают по формуле

$$\text{ДНЛ}[k] = \frac{U[k] - U[k-1]}{Q} - 1. \tag{33}$$

4.2.2.7 Измерение ИНЛ

ИНЛ определяют путем нахождения максимального по абсолютной величине значения $\max\{|\text{ИНЛ}[k]|\}$. Значения ИНЛ[k] определяются для всех точек ХП.

ИНЛ[k] в заданной точке ХП определяют путем нахождения отклонения действительного значения напряжения заданного межкодового перехода от значения напряжения заданного межкодового перехода, определяемого прямой, линеаризирующей действительную ХП АЦП.

Способ проведения линеаризирующей прямой — через конечные точки ХП или с помощью МНК через все точки ХП. В примечаниях к значениям ИНЛ[k] необходимо указать способ проведения линеаризирующей прямой.

Измерение напряжений первого $U[1]$, конечного $U[2^N - 1]$ и заданного $U[k]$ межкодовых переходов — в соответствии с 4.2.2.3.

Значение ИНЛ[k] относительно прямой, проведенной через начальную и конечную точки действительной ХП, для заданной точки действительной ХП рассчитывают по формуле

$$\text{ИНЛ}[k] = \frac{Q(k-1) - (G \cdot U[k] + V_{OS})}{Q(2^N - 1)} \cdot (2^N - 2), \tag{34}$$

где коэффициенты G и V_{OS} рассчитываются по формулам:

$$G = \frac{Q(2^N - 2)}{U[2^N - 1] - U[1]}; \tag{35}$$

$$V_{OS} = U_{\text{ном}}[1] - G \cdot U[1]. \tag{36}$$

Значение ИНЛ[k] относительно прямой, проведенной с помощью МНК через все точки действительной ХП, для заданной точки действительной ХП рассчитывают по формуле

$$\text{ИНЛ}[k] = \frac{Q(k-1) - (G \cdot U[k] + V_{OS})}{Q(2^N - 1)} \cdot (2^N - 2), \tag{37}$$

где коэффициенты G и V_{OS} рассчитываются согласно формулам:

$$G = \frac{Q(2^N - 1) \cdot \left(\sum_{k=1}^{2^N - 1} k \cdot U[k] - 2^{N-1} \cdot \sum_{k=1}^{2^N - 1} U[k] \right)}{(2^N - 1) \cdot \sum_{k=1}^{2^N - 1} U[k]^2 - \left(\sum_{k=1}^{2^N - 1} U[k] \right)^2}; \tag{38}$$

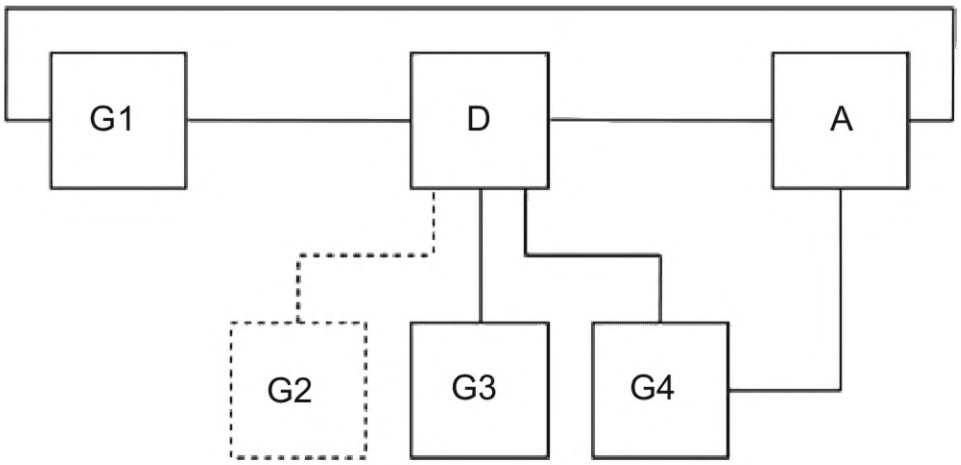
$$V_{OS} = U[1] + Q(2^{N-1} - 1) - \frac{G}{(2^N - 1)} \cdot \sum_{k=1}^{2^N - 1} U[k]. \tag{39}$$

5 Метод 3

Метод описывает процедуру определения действительной ХП АЦП, которая представляет собой зависимость медианного значения выборки выходных кодов $\overline{Y}$ от определенного уровня входного сигнала X. Данный метод следует применять для измерения линеаризуемой погрешности в заданной точке действительной ХП, линеаризуемой погрешности смещения, линеаризуемой погрешности усиления и ИНЛ в тех случаях, когда измерение местоположения межкодовых переходов согласно методам 1 и 2 является непрактичным или невозможным. Также данный метод используется для определения немонотонности ХП АЦП.

5.1 Аппаратура

5.1.1 Измерение следует проводить на установке, структурная схема которой приведена на рисунке 4.



- - - - — опционально; —— — обязательно; D — АЦП; G1 — источник линейно изменяющегося напряжения; G2 — ИОН; G3 — источник напряжения питания; G4 — цифровое устройство ввода-вывода; A — вычислительное устройство.

Примечание — При измерениях параметров АЦП со встроенным ИОН источник G2 в измерительной установке может отсутствовать.

Рисунок 4

5.1.2 Источник линейно изменяющегося напряжения G1 должен обеспечивать подачу на аналоговый вход АЦП линейно изменяющегося напряжения в диапазоне, перекрывающем номинальный диапазон входного напряжения АЦП.

ИНЛ источника G1 во всем диапазоне значений выходного напряжения должна соответствовать установленной в ТУ и находиться в интервале:

а) ±1/8 от номинального значения EMP — для АЦП с числом эквивалентных двоичных разрядов до 10 включительно;

б) ±1/4 от номинального значения EMP — для АЦП с числом эквивалентных двоичных разрядов от 11 до 14;

в) ±1/2 от номинального значения EMP — для АЦП с числом эквивалентных двоичных разрядов от 15 до 32.

5.1.3 Требования к источнику опорного напряжения G2 — по 4.1.1.3.

5.1.4 Требования к источнику напряжения питания G3 — по 4.1.1.4.

5.1.5 Требования к цифровому устройству ввода-вывода G4 — по 4.1.1.5. Нестабильность частоты импульсов за время измерения должна соответствовать требованиям, установленным в ТУ, или не должна превышать 10^{-6}.

5.1.6 Вычислительное устройство A должно обеспечивать сбор выходных оцифрованных данных АЦП с частотой дискретизации, расчет медианного значения $\overline{Y}$ и стандартного отклонения $\sigma_{y(x)}$ каждого из наборов — по M выборок.

5.1.7 Измерительная установка должна обеспечивать цифровую индикацию результатов измерения параметров ХП.

5.2 Подготовка к измерениям

5.2.1 Подготавливают измерительную установку к работе в соответствии с эксплуатационной документацией на установку.

5.2.2 Подключают АЦП к измерительной установке.

5.3 Проведение измерений

5.3.1 Напряжение питания от источника G3 и опорное напряжение от источника G2 подают в порядке, установленном в ТУ.

5.3.2 Сигналы управления и тактовые сигналы подают с цифрового устройства ввода-вывода G4. При наличии конфигурационных регистров проводят их инициализацию, выполняют калибровку.

5.3.3 На аналоговый вход АЦП подают линейно возрастающее напряжение от источника G1. Начальное значение входного напряжения X_0 выбирается так, чтобы оно не превышало начальную точку номинальной ХП (дальнейшее понижение с учетом выбранного согласно 5.3.4 приращения не приводит к изменению выходного кода АЦП).

Вычислительное устройство А для каждого уровня входного сигнала X фиксирует M выборок (Y_0, Y_1, Y_2 ... Y_{M-1}) выходного кода и высчитывает медианное значение $\overline{Y}$ и стандартное отклонение $\sigma_{y(x)}$ каждого из наборов по M выборок. Значение M устанавливается так, чтобы обеспечить достижение требуемой точности измерений. Если не указано иное в ТУ, значение M выбирается исходя из условия $M > 100$.

5.3.4 Инкрементируют входное напряжение X на величину ΔX, не превышающую стандартное отклонение аддитивного случайного шума при входном сигнале, соответствующем середине ХП, до достижения входным сигналом конечной точки номинальной ХП (дальнейшее увеличение входного сигнала не приводит к изменению выходного кода).

В случае когда АЦП реализован на основе сигма-дельта архитектуры и имеет разрядность не менее 14 бит ($N \geq 14$), допускается увеличивать приращение входного напряжения ΔX до значения, которое обеспечит наличие не менее чем $n > 100$ уникальных равномерно распределенных по всей действительной ХП медианных значений $\overline{Y}$ выходного кода в пределах всего номинального диапазона входного сигнала АЦП.

5.3.5 Определение немонотонности АЦП

ХП АЦП является немонотонной, если для неинвертирующего АЦП для любой пары входных напряжений X_1 и X_2 — таких, что $X_2 > X_1$, — выполняется неравенство

$$\overline{Y}(X_1) - \frac{3 \cdot \sigma_Y(X_1)}{\sqrt{M}} > \overline{Y}(X_2) + \frac{3 \cdot \sigma_Y(X_2)}{\sqrt{M}}. \quad (40)$$

ХП АЦП является немонотонной, если для инвертирующего АЦП для любой пары входных напряжений X_1 и X_2 — таких что $X_2 > X_1$, — выполняется неравенство

$$\overline{Y}(X_2) - \frac{3 \cdot \sigma_Y(X_2)}{\sqrt{M}} > \overline{Y}(X_1) + \frac{3 \cdot \sigma_Y(X_1)}{\sqrt{M}}, \quad (41)$$

где $\overline{Y}(X_i)$ — медианное значение выборки выходных кодов для входного напряжения X_i;

M — количество выборок для каждого уровня входного сигнала X_i;

$\sigma_Y(X_i)$ — стандартное отклонение аддитивного случайного шума для входного уровня X_i.

5.4 Измерение линеаризуемой погрешности в заданной точке действительной ХП

5.4.1 Линеаризуемую погрешность $\overline{E}[k]$ в заданной точке действительной ХП определяют путем отклонения номинального значения напряжения заданного межкодового перехода от значения напряжения заданного межкодового перехода, определяемого прямой, линеаризирующей действительную ХП АЦП после вычета линеаризуемой погрешности смещения.

Способ проведения линеаризирующей прямой — с помощью МНК через все измеренные точки действительной ХП.

Линеаризуемую погрешность смещения $\overline{E}_0$ действительной ХП определяют в нулевой точке действительной ХП путем нахождения отклонения номинального значения напряжения первого межкодового перехода от значения напряжения первого межкодового перехода, определяемого прямой, линеаризирующей действительную ХП АЦП.

Линеаризуемую погрешность усиления $\overline{E}_{ПШ}$ определяют в конечной точке действительной ХП путем нахождения отклонения номинального значения напряжения крайнего межкодового перехода от значения напряжения крайнего межкодового перехода, определяемого прямой, линеаризирующей действительную ХП АЦП после вычета погрешности смещения.

5.4.2 Измерение медианных значений выборок выходных кодов $\overline{Y}(X_i)$ для входного напряжения X_i — в соответствии с 5.3.

Значение линеаризуемой погрешности смещения $\overline{E}_0$ действительной ХП в ЕМР рассчитывают по формуле

$$\overline{E}_0 = \frac{U_{ном}[1] - \overline{X}[1]}{Q}, \quad (42)$$

где $\overline{X}[1]$ — местоположение первого межкодового перехода, определяемое прямой, линеаризирующей действительную ХП АЦП.

Значение $\overline{E}[k]$ линеаризуемой погрешности действительной ХП в заданной точке ХП в ЕМР рассчитывают по формуле

$$\overline{E}[k] = \frac{U_{\text{ном}}[k] - \overline{X}[k]}{Q} - \overline{E}_0, \tag{43}$$

где $k \in [2; 2^N - 1]$;

$\overline{X}[k]$ — местоположение k-го межкодового перехода, определяемое прямой, линеаризирующей действительную ХП АЦП.

Значение $\overline{E}_{\text{ПШ}}$ линеаризуемой погрешности усиления действительной ХП в ЕМР рассчитывают по формуле

$$\overline{E}_{\text{ПШ}} = \frac{U_{\text{ном}}\left[2^N - 1\right] - \overline{X}\left[2^N - 1\right]}{Q} - \overline{E}_0, \tag{44}$$

где $\overline{X}[2^N - 1]$ — местоположение крайнего межкодового перехода, определяемое прямой, линеаризирующей действительную ХП АЦП.

5.5 Измерение ИНЛ

5.5.1 ИНЛ определяют путем нахождения максимального по абсолютной величине значения $\max\{|\text{ИНЛ}[i]|\}$. Значение ИНЛ[i] определяется для всех n измеренных точек действительной ХП.

5.5.2 ИНЛ[i] в заданной точке действительной ХП определяют путем нахождения отклонения медианного значения выборки выходных кодов $\overline{Y}$ от значения напряжения заданной точки действительной ХП, определяемого прямой, линеаризирующей действительную ХП АЦП.

Способ проведения линеаризирующей прямой — с помощью МНК через все n точек действительной ХП.

5.5.3 Значение ИНЛ относительно прямой, проведенной с помощью МНК через все измеренные точки действительной ХП, для заданной точки действительной ХП рассчитывают по формуле

$$\text{ИНЛ}[i] = \frac{Q(k-1) - \left(G \cdot \overline{Y}[i] + V_{OS}\right)}{Q\left(2^N - 1\right)} \cdot \left(2^N - 2\right), \tag{45}$$

где коэффициенты G и V_{OS} рассчитываются по формулам:

$$G = \frac{n \cdot \sum_{i=1}^{n} X[i]\overline{Y}[i] - \sum_{i=1}^{n} X[i] \sum_{i=1}^{n} \overline{Y}[i]}{n\sum_{i=1}^{n} X[i]^2 - \left(\sum_{i=1}^{n} X[i]\right)^2}; \tag{46}$$

$$V_{OS} = \frac{\sum_{i=1}^{n} Y[i] - G \cdot \sum_{i=1}^{n} X[i]}{n}, \tag{47}$$

где n — общее количество измеренных точек действительной ХП в соответствии с 5.3.4.

6 Метод 4

6.1 Измерение динамических характеристик АЦП

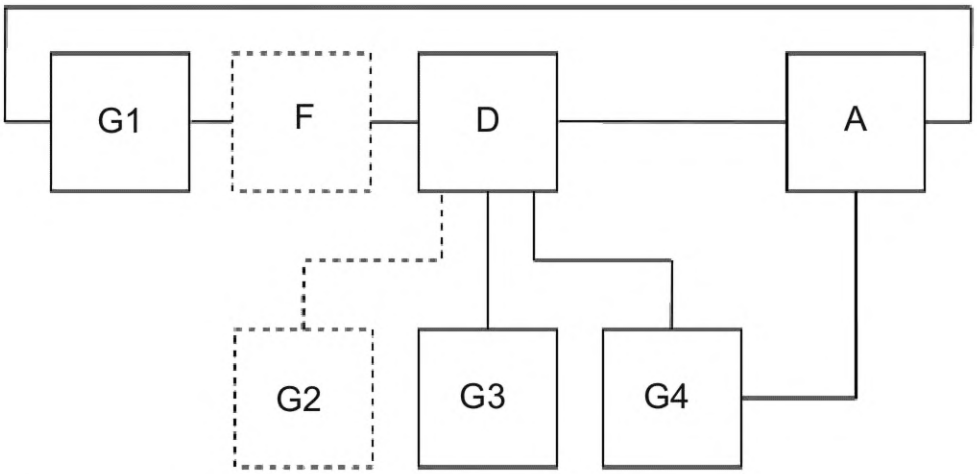
Динамические характеристики измеряют путем подачи синусоидального сигнала фиксированной частоты и амплитуды на аналоговый вход АЦП, получения набора из M последовательных оцифрованных отсчетов с частотой дискретизации АЦП F_S, применения к полученному набору алгоритмов БПФ, построения амплитудного спектра, выделения первой половины отсчетов (согласно свойству симметрии преобразования Фурье) и вычисления динамических параметров в соответствии с заданными формулами (48)—(60).

Динамические характеристики зависят от амплитуды и частоты входного синусоидального сигнала, а также от частоты дискретизации АЦП. В примечании к результатам измерений указываются значения частоты дискретизации, при которой проводятся измерения, а также частоты и амплитуды входного сигнала в единицах дБПШ.

Динамические параметры измеряют при входном сигнале, близком к номинальному диапазону входного напряжения АЦП (минус 1 дБПШ для однотонального сигнала и минус 7 дБПШ для двухтонального для предотвращения амплитудного ограничения), если иное не установлено в ТУ.

6.2 Аппаратура

6.2.1 Измерение следует проводить на установке, структурная схема которой приведена на рисунке 5:



- - - - — опционально; —— — обязательно; D — АЦП; G1 — источник синусоидального напряжения; G2 — ИОН; G3 — источник напряжения питания; G4 — цифровое устройство ввода-вывода; F — фильтр; A — вычислительное устройство.

Примечание — При измерениях параметров АЦП со встроенным источником опорного напряжения источник G2 в измерительной установке может отсутствовать.

Рисунок 5

6.2.2 Полные нелинейные искажения источника сигнала G1 должны быть на 10 дБ ниже величины соответствующих параметров АЦП в диапазоне напряжений, соответствующем номинальному диапазону входного напряжения АЦП, и в диапазоне частот, соответствующем полосе пропускания АЦП. Допускается использовать источники сигнала с более высокими искажениями совместно с входным фильтром F, в этом случае в примечаниях к измеренным параметрам приводится описание измерительной установки с описанием основных характеристик фильтра F.

Диапазон изменения напряжения на выходе источника G1 должен соответствовать номинальному диапазону входного напряжения АЦП. Частота сигнала не должна быть субгармоникой частоты дискретизации АЦП.

В оцифрованных данных должно быть целое число J периодов синусоидального сигнала. Количество периодов синусоидального сигнала J и количество оцифрованных данных M должны быть взаимно простыми числами. Частота входного синусоидального сигнала F_i и частота дискретизации АЦП должны удовлетворять условию когерентной дискретизации (27).

6.2.3 Требования к источнику опорного напряжения G2 — по 4.1.1.3.

6.2.4 Требования к источнику напряжения питания G3 — по 4.1.1.4.

6.2.5 Требования к цифровому устройству ввода-вывода G4 — по 4.1.1.5.

Нестабильность частоты импульсов за время измерения должна соответствовать требованиям, установленным в ТУ, или не должна превышать 10^{-6}.

6.2.6 Вычислительное устройство А должно обеспечивать сбор выходных оцифрованных данных АЦП с частотой дискретизации, выполнение БПФ над оцифрованными данными и вычисление динамических параметров — в соответствии с формулами (48)—(60).

6.2.7 Измерительная установка должна обеспечивать цифровую индикацию результатов измерения параметров ХП.

6.3 Подготовка к измерениям

6.3.1 Подготавливают измерительную установку к работе в соответствии с эксплуатационной документацией на установку.

6.3.2 Подключают АЦП к измерительной установке.

6.4 Проведение измерений

6.4.1 Напряжение питания от источника G3 и опорное напряжение от источника G2 подают в порядке, установленном ТУ.

6.4.2 Сигналы управления, тактовые сигналы подают с цифрового устройства ввода-вывода G4. При наличии конфигурационных регистров проводят их инициализацию, выполняют калибровку.

6.4.3 На аналоговый вход АЦП подают синусоидальное напряжение от источника G1 в соответствии с 6.1.2. Вычислительное устройство А последовательно фиксирует выходные коды АЦП с частотой дискретизации F_S, выполняет БПФ над оцифрованными данными и построение амплитудного спектра. Общее число оцифрованных данных M должно удовлетворять условию

$$M = 2^N, \tag{48}$$

где N — целое положительное число, удовлетворяющее неравенству $N \geq 12$.

Амплитудный спектр сигнала представляется в логарифмическом масштабе по вертикали. При этом амплитуда сигнала с размахом, равным номинальному диапазону входного напряжения АЦП, принимается за уровень в 0 дБ, а уровень амплитуд каждой i-й составляющей указывается в децибелах по отношению к ней (дБПШ) и вычисляется по формуле

$$D_i = 20 \cdot \log_{10} \frac{A[k]}{A_0}, \tag{49}$$

где $A[k]$ — амплитуда k-й составляющей спектра;

A_0 — значение, принятое за уровень 0 дБ.

Динамические параметры приводятся в единицах дБПШ или в единицах дБн.

В примечании к измеренным динамическим параметрам необходимо указать частоту дискретизации, частоту и амплитуду входного сигнала, и общее количество оцифрованных точек, используемых для вычисления параметров.

6.4.4 Измерение SFDR

SFDR определяют по амплитудному спектру как отношение среднеквадратичного значения амплитуды основного сигнала к среднеквадратичному значению наибольшей паразитной или гармонической составляющей, измеренное в полосе пропускания Найквиста (от 0 до $F_S/2$). Значение SFDR в дБн рассчитывают по формуле

$$\mathrm{SFDR} = 20\log_{10} \frac{X_{rms}[n_1]}{X_{rms}[n_{spur}]} = 20\log_{10} \frac{\sqrt{2 \cdot \sum_{i=n_1-\varepsilon_{sig}}^{n_1+\varepsilon_{sig}} X[n_i]^2}}{\sqrt{2 \cdot \sum_{i=n_{spur}-\varepsilon_{harm}}^{n_{spur}+\varepsilon_{harm}} X[n_i]^2}}, \tag{50}$$

где $X_{rms}[n_1]$ — среднеквадратичное значение сигнала на основной (несущей) частоте, вычисляемое по формуле

$$X_{rms}[n_1] = \sqrt{2 \cdot \sum_{i=n_1-\varepsilon_{sig}}^{n_1+\varepsilon_{sig}} X[n_i]^2}; \tag{51}$$

n_1 — индекс максимальной составляющей в спектре без учета постоянной составляющей;

$X_{rms}[n_{spur}]$ — среднеквадратичное значение наибольшей паразитной или гармонической составляющей (без учета основного сигнала на несущей и постоянной составляющей), вычисляемое по формуле

$$X_{rms}[n_{spur}] = \sqrt{2 \cdot \sum_{i=n_{spur}-\varepsilon_{harm}}^{n_{spur}+\varepsilon_{harm}} X[n_i]^2}; \tag{52}$$

n_{spur} — индекс максимальной паразитной составляющей в спектре;

$X[n_i]$ — амплитуда частотной составляющей с порядковым номером n_i;

ε_{sig} — количество отсчетов, занимаемых сигналом с учетом утечки спектра;

n_i — порядковый номер, соответствующий частоте сигнала F_i, вычисляемый по формуле

$$n_i = \frac{M \cdot F_i}{F_S}; \tag{53}$$

ε_{harm} — количество отсчетов, занимаемых гармонической или паразитной составляющей с учетом утечки спектра.

6.4.5 Измерение SINAD

SINAD определяют по амплитудному спектру как отношение среднеквадратичного значения амплитуды сигнала к значению корня из суммы квадратов всех других спектральных составляющих, включая гармонические и паразитные составляющие, но исключая постоянную составляющую. Значение SINAD в дБн рассчитывают по формуле

$$\mathrm{SINAD} = 20\log_{10}\frac{X_{rms}[n_1]}{X_{rms}\left[n_{S_0}\right]} = 20\log_{10}\frac{\sqrt{2\cdot\sum\limits_{i=n_1-\varepsilon_{sig}}^{n_1+\varepsilon_{sig}} X[n_i]^2}}{\sqrt{2\cdot\sum\limits_{i\in S_0} X[n_i]^2}}, \tag{54}$$

где S_0 — набор всех целых чисел от 1 до M – 1, исключая значения, отвечающие за постоянную составляющую и основную частоту.

6.4.6 Измерение THD

THD определяют по амплитудному спектру как отношение среднеквадратичного значения суммы наибольших 10 гармонических и паразитных составляющих (если иное не установлено в ТУ, при этом количество гармонических и паразитных составляющих, входящих в состав THD, указывается в примечании) к среднеквадратичному значению сигнала на основной частоте. Значение THD в дБн рассчитывают по формуле

$$\mathrm{THD} = 20\log_{10}\frac{\sqrt{\sum\limits_{h=2}^{N_H}\left(X_{rms}[n_h]\right)^2}}{X_{rms}[n_1]} = 20\log_{10}\frac{\sqrt{2\cdot\sum\limits_{h=2}^{N_H}\left(\sqrt{\sum\limits_{i=n_h-\varepsilon_{harm}}^{n_h+\varepsilon_{harm}} X[n_i]^2}\right)^2}}{\sqrt{2\cdot\sum\limits_{i=n_1-\varepsilon_{sig}}^{n_1+\varepsilon_{sig}} X[n_i]^2}}, \tag{55}$$

где N_H — рассматриваемая гармоническая или паразитная составляющая высшего порядка (по умолчанию 10);

$n_h \in [2; N_H]$ — набор чисел, соответствующих наибольшим гармоническим и паразитным составляющим в спектре.

6.4.7 Измерение SNR

SNR определяют по амплитудному спектру как отношение среднеквадратичного значения амплитуды сигнала к среднеквадратичному значению шума. Шум включает в себя все компоненты выходного сигнала за исключением постоянной составляющей, основной частоты и гармонических искажений (по умолчанию наибольших 10 гармонических и паразитных составляющих, если иное не установлено в ТУ). Значение SNR в дБн рассчитывают по формуле

$$\mathrm{SNR} = 20\log_{10}\left(\frac{X_{rms}[n_1]}{\sqrt{2\cdot\sum\limits_{m\in S_0} X_{avm}[f_m]^2 - 2\cdot\sum\limits_{h=2}^{N_H} X_{rms}[n_h]^2}}\right). \tag{56}$$

6.4.8 Измерение $IMD_{2,m}$

$IMD_{2,m}$ определяют путем подачи двух синусоидальных сигналов одинаковой амплитуды с частотами F_1 и F_2, которые находятся на близком расстоянии друг от друга, и вычисления по амплитудному спектру разницы между уровнем одной из первоначальных частот и наибольшей гармонической составляющей m-го порядка в спектре. Интермодуляционные искажения m-го порядка для двухтонального входного сигнала с частотами F_1 и F_2 возникают на частотах

$$F_{IMD_{2,m}} = (k_1 \cdot F_1 + k_2 \cdot F_2), \tag{57}$$

где k_1, k_2 — целые числа, такие, что для интермодуляционных искажений m-го порядка выполняются условия

$$|k_1| + |k_2| = m; \tag{58}$$

$$F_{IMD_{2,m}} > 0. \tag{59}$$

Если не указан порядок интермодуляционных искажений, то они относятся к составляющим третьего порядка с частотами $(2F_2 - F_1)$ и $(2F_1 - F_2)$. В дополнение к вычисленному значению $IMD_{2,m}$ необходимо указать частоту дискретизации АЦП, частоты и амплитуды входных тонов F_1 и F_2 (в единицах дБПШ). Значение $IMD_{2,m}$ в дБн рассчитывают по формуле

$$IMD_{2,m} = 20\log_{10}\left(\frac{X_{rms}\left[n_{1,2}\right]}{X_{rms}\left[n_m\right]}\right) = 20\log_{10}\frac{\sqrt{2\cdot\sum_{i=n_{1,2}-\varepsilon_{sig}}^{n_{1,2}+\varepsilon_{sig}} X\left[n_i\right]^2}}{\sqrt{2\cdot\sum_{i=n_m-\varepsilon_{harm}}^{n_m+\varepsilon_{harm}} X\left[n_i\right]^2}}, \tag{60}$$

где $n_{1,2}$ — индекс максимальной составляющей в спектре (одной из синусоид);

n_m — индекс максимального искажения m-го порядка.

7 Требования безопасности

7.1 Средства измерений должны соответствовать требованиям безопасности по ГОСТ 12.1.019, ГОСТ 12.2.003, ГОСТ 22261.

7.2 В целях обеспечения безопасности труда при измерении параметров АЦП к работе на средствах измерений допускаются лица, обученные правилам электробезопасности, прошедшие инструктаж по правилам эксплуатации средств измерений и изучившие меры первой помощи при поражениях электрическим током.

Для предупреждения поражения электрическим током следует предусмотреть надежное заземление средств измерений.

7.3 При работе на средствах измерений обеспечивают соблюдение [3] и [4].

Для обеспечения пожаробезопасности — предусмотреть наличие в помещениях средств пожаротушения (кошма, огнетушитель углекислотный).

7.4 Средства измерений не должны устанавливаться в пожаро- и взрывоопасных местах.

Приложение А
(справочное)

Расчет показателей точности измерения параметров характеристики преобразования аналого-цифрового преобразователя

Границы интервала относительной погрешности измерения напряжения межкодового перехода δ_1 по методу 1 определяют по формуле

$$\delta_1 = \pm K_1 \sqrt{\left(\frac{\delta_p}{k_p}\right)^2 + \sum_{i=1}^{e}\left(a_i \frac{\delta_i}{k_i}\right)^2 + \sum_{j=1}^{m}\left(a_j \frac{\delta_j}{k_j}\right)^2 + \left(a_u \frac{\delta_u}{k_u}\right)^2 + \left(a_f \frac{\delta_f}{k_f}\right)^2 + \left(a_{1,n} \frac{U_{1,n}}{k_{1,n}}\right)^2}, \quad (A.1)$$

где δ_p — относительная погрешность измерителя постоянного напряжения P;

δ_i — относительная погрешность установления и поддержания напряжения питания на i-м выводе питания;

δ_j — относительная погрешность установления и поддержания j-го параметра внешних условий;

δ_u — относительная погрешность установления и поддержания опорного напряжения;

δ_f — относительная погрешность установления и поддержания частоты запускающих (стробирующих) импульсов;

$U_{1,n}$ — приведенное к аналоговому входу эквивалентное напряжение шумов АЦП;

a_i — коэффициент влияния напряжения питания на i-м выводе питания на измеряемый параметр;

a_j — коэффициент влияния j-го параметра внешних условий на измеряемый параметр;

a_u — коэффициент влияния опорного напряжения на измеряемый параметр;

a_f — коэффициент влияния относительной погрешности частоты запускающих импульсов на измеряемый параметр;

$a_{1,n}$ — коэффициент влияния эквивалентного входного напряжения шумов АЦП на измеряемый параметр;

K_1, k_p, k_i, k_j, k_u, k_f — коэффициенты, зависящие от закона распределения соответствующей относительной погрешности δ_1, δ_p, δ_i, δ_j, δ_u, δ_f и установленной вероятности;

$k_{1,n}$ — коэффициент, зависящий от закона распределения эквивалентного входного напряжения шумов АЦП и установленной вероятности;

e — число выводов питания;

m — число параметров внешних условий.

Библиография

[1] ОСТ 11 0078.0—84 Микросхемы интегральные. Цифро-аналоговые и аналого-цифровые преобразователи. Общие требования при измерении параметров

[2] ОСТ 11 0583—88 Микросхемы интегральные. Термины, определения и буквенные обозначения параметров цифро-аналоговых и аналого-цифровых преобразователей

[3] Правила технической эксплуатации электроустановок потребителей электрической энергии (утверждены приказом Министерства энергетики Российской Федерации от 12 августа 2022 г. № 811)

[4] Правила противопожарного режима в Российской Федерации (утверждены Постановлением Правительства Российской Федерации от 16 сентября 2020 г. № 1479)

УДК 621.382:006.354

ОКС 17.080
17.220.20
31.080

Ключевые слова: микросхемы, аналого-цифровые преобразователи, характеристика преобразования, параметры

Редактор *М.В. Митрофанова*
Технический редактор *И.Е. Черепкова*
Корректор *М.И. Першина*
Компьютерная верстка *Е.О. Асташина*

Сдано в набор 09.01.2025. Подписано в печать 05.02.2025. Формат 60×84⅛. Гарнитура Ариал.
Усл. печ. л. 3,26. Уч.-изд. л. 2,77.

Подготовлено на основе электронной версии, предоставленной разработчиком стандарта

Создано в единичном исполнении в ФГБУ «Институт стандартизации»
для комплектования Федерального информационного фонда стандартов,
117418 Москва, Нахимовский пр-т, д. 31, к. 2.

gost.e-ecolog.ru gost.e-ecolog.ru