HSR (LONDON),
HOUGHTON STREET REVIEW JOURNAL
ISSN: 2058-5519|Impact factor-15.9
http://houghtonstreetreview.com/index.php/hsr

АНАЛИЗ ВЛИЯНИЯ СОБСТВЕННЫХ ШУМОВ ЭЛЕМЕНТОВ НА МЕТРОЛОГИЧЕСКИЕ ХАРАКТЕРИСТИКИ ГЕНЕРАТОРОВ ЭЛЕКТРИЧЕСКИХ СИГНАЛОВ И ПУТИ ИХ УЛУЧШЕНИЯ НА ПРЕДПРИЯТИЯХ НЕФТЕГАЗОВОЙ ОТРАСЛИ

Сатторов Камолжон Жалолович

Аннотация: В статье рассматривается влияние собственных шумов элементов измерительного тракта на метрологические характеристики генераторов (калибраторов) электрических сигналов, эксплуатируемых на предприятиях нефтегазовой отрасли. Выполнена классификация источников шума, приведены аналитические соотношения для теплового, дробового и фликкер-шума, а также для фазового шума задающего генератора по модели Лисона. На числовых примерах показано, что при воспроизведении сигнала уровнем 1 В относительный вклад собственного шума не превышает $1{,}3 \cdot 10^{-6}$, тогда как при уровне 10 мВ он достигает $1{,}29 \cdot 10^{-4}$ и становится доминирующей составляющей неопределённости. Составлен бюджет неопределённости для двух уровней выходного сигнала: расширенная неопределённость ($k = 2$) составила $123 \cdot 10^{-6}$ и $447 \cdot 10^{-6}$ соответственно. Предложен комплекс схемотехнических, конструктивных и алгоритмических мер, обеспечивающих снижение шумовой составляющей в 3–10 раз, и обоснована целесообразность нормирования шумовых характеристик в методиках поверки калибраторов, применяемых в условиях повышенных электромагнитных и температурных воздействий.

Ключевые слова: генератор электрических сигналов, калибратор, метрологические характеристики, тепловой шум, фликкер-шум, фазовый шум, модель Лисона, неопределённость измерений, нефтегазовая отрасль, электромагнитная совместимость.

ВВЕДЕНИЕ

Генераторы и калибраторы электрических сигналов образуют основу метрологического обеспечения контрольно-измерительных систем нефтегазовых предприятий. С их помощью выполняется поверка и калибровка измерительных преобразователей давления, температуры, расхода и уровня, проверка каналов систем автоматизации, а также воспроизведение унифицированных сигналов 0–5 мА, 4–20 мА и 0–10 В. Точность воспроизведения этих сигналов непосредственно определяет достоверность коммерческого учёта углеводородного сырья, погрешность которого регламентируется нормативными документами по измерению расхода и количества жидкостей и газов [13].

Метрологические характеристики генератора традиционно нормируются через основную и дополнительную погрешности воспроизведения. Однако при переходе к воспроизведению сигналов малого уровня и при работе в широкой полосе частот всё большее значение приобретает составляющая, обусловленная собственными шумами элементов измерительного тракта — резисторов, полупроводниковых приборов, операционных усилителей и источников опорного напряжения. Эта составляющая носит случайный характер, не устраняется калибровкой и не может быть скомпенсирована введением поправки, вследствие чего она формирует предел достижимой точности прибора [11; 12].

HSR (LONDON),
HOUGHTON STREET REVIEW JOURNAL
ISSN: 2058-5519|Impact factor-15.9
http://houghtonstreetreview.com/index.php/hsr

Физическая природа собственных шумов исследована достаточно полно: тепловой шум описан в классических работах Дж. Джонсона и Г. Найквиста [5; 6], фликкер-шум систематизирован в обзоре М. Кешнера [17], теория фазового шума автогенераторов заложена работой Д. Лисона [7] и развита А. Хаджимири и Т. Ли [8]. Вместе с тем в прикладной метрологии эти результаты редко доводятся до уровня, пригодного для практического оценивания вклада шума в бюджет неопределённости конкретного калибратора, эксплуатируемого в промышленных условиях. Существующие методики поверки, как правило, нормируют погрешность воспроизведения, но не содержат требований к спектральной плотности шума выходного сигнала.

Актуальность задачи усиливается спецификой нефтегазовых объектов: широкий диапазон рабочих температур, вибрация, протяжённые линии связи, а также мощные источники электромагнитных помех — частотно-регулируемые приводы, сварочное оборудование, высоковольтные коммутационные аппараты. В таких условиях суммарное шумовое воздействие на измерительный тракт существенно превышает значения, получаемые в лабораторной обстановке. Правовой основой соответствующих работ в Республике Узбекистан служит Закон «О метрологии» в новой редакции [1] с изменениями, расширившими участие негосударственного сектора в поверке средств измерений [2].

Цель настоящей статьи — количественно оценить вклад собственных шумов элементов в метрологические характеристики генераторов электрических сигналов и обосновать комплекс мер по их улучшению применительно к условиям нефтегазовых предприятий. Задачи исследования: классифицировать источники шума в тракте генератора; получить расчётные оценки шумовых составляющих для типовых схемных решений; сформировать бюджет неопределённости для двух характерных уровней выходного сигнала; предложить и количественно оценить методы снижения шумовой составляющей.

МЕТОДИКА ИССЛЕДОВАНИЯ

Исследование выполнено расчётно-аналитическим методом. В качестве объекта рассмотрена обобщённая структура генератора электрических сигналов, включающая источник опорного напряжения, задающий генератор (для переменного сигнала), масштабирующий усилитель, аттенюатор и выходной каскад. Для каждого узла определены преобладающие механизмы шумообразования и получены оценки спектральной плотности шума.

Расчёты выполнены при температуре $T = 300$ К и постоянной Больцмана $k = 1{,}380649 \cdot 10^{-23}$ Дж/К. Оценивание неопределённости проведено в соответствии с руководством по выражению неопределённости измерения [3]; составляющие типа B с равномерным распределением приведены к стандартной неопределённости делением границ на $\sqrt{3}$, расширенная неопределённость получена при коэффициенте охвата $k = 2$, что соответствует доверительной вероятности приблизительно 0,95. Требования к компетентности лабораторий, выполняющих такие оценки, установлены международным стандартом [4]. Характеристики нестабильности во временной области рассматривались с использованием дисперсии Аллана [9; 10; 18].

Ограничение работы состоит в том, что приведённые числовые значения получены расчётным путём для типовых параметров схемных решений и подлежат экспериментальному подтверждению на конкретных образцах средств измерений; они предназначены для

HSR (LONDON),
HOUGHTON STREET REVIEW JOURNAL
ISSN: 2058-5519|Impact factor-15.9
http://houghtonstreetreview.com/index.php/hsr

сопоставительной оценки вклада составляющих, а не для нормирования характеристик конкретного типа прибора.

РЕЗУЛЬТАТЫ ИССЛЕДОВАНИЯ И ИХ ОБСУЖДЕНИЕ

1. Классификация источников шума в тракте генератора. Собственные шумы элементов измерительного тракта различаются по физической природе, спектральной зависимости и характеру влияния на метрологические характеристики. Систематизация источников приведена в таблице 1.

Таблица 1

Классификация источников шума в тракте генератора электрических сигналов

Вид шума	Физическая природа	Спектральная зависимость	Преобладающая область	Влияние на характеристики
Тепловой (Джонсона — Найквиста)	хаотическое тепловое движение носителей заряда в резистивных элементах	равномерная (белый шум)	весь рабочий диапазон	ограничивает разрешающую способность на малых уровнях сигнала
Дробовой	дискретность заряда при прохождении p-n-перехода	равномерная (белый шум)	весь диапазон	существенен в токовых выходах (4–20 мА)
Фликкер-шум (1/f)	флуктуации проводимости, захват носителей поверхностными состояниями	$S(f) \sim 1/f^{\alpha}$, $\alpha \approx 0{,}8\ldots1{,}2$	ниже частоты излома fc	определяет дрейф нуля и нестабильность на низких частотах
Генерационно-рекомбинационный	флуктуации числа носителей в полупроводнике	лоренцева форма	отдельные участки спектра	локальные всплески неопределённости воспроизведения
Фазовый шум задающего генератора	преобразование шумов активного элемента в фазовые флуктуации	$1/f^3 \rightarrow 1/f^2 \rightarrow$ плоский участок	вблизи несущей	нестабильность частоты и формы выходного сигнала
Внешние электромагнитные наводки	кондуктивные и излучаемые помехи промышленного оборудования	дискретные составляющие и широкополосный фон	50 Гц и гармоники, единицы — сотни кГц	преобладающий источник на объектах отрасли

Источник: составлено автором на основе [5]; [6]; [7]; [8]; [16]; [17].

HSR (LONDON),
HOUGHTON STREET REVIEW JOURNAL
ISSN: 2058-5519|Impact factor-15.9
http://houghtonstreetreview.com/index.php/hsr

2. Тепловой шум и его вклад в погрешность воспроизведения. Среднеквадратическое значение напряжения теплового шума на резистивном элементе определяется соотношением Найквиста:

$$e_m = \sqrt{(4 \cdot k \cdot T \cdot R \cdot \Delta f)} \qquad (1)$$

где k — постоянная Больцмана; T — абсолютная температура, К; R — сопротивление, Ом; Δf — эквивалентная шумовая полоса, Гц. Дробовая составляющая шума тока описывается выражением

$$i_д = \sqrt{(2 \cdot q \cdot I \cdot \Delta f)} \qquad (2)$$

где q — заряд электрона; I — постоянный ток через переход. Из (1) следует, что снижение шума достигается уменьшением сопротивления критических узлов и ограничением полосы пропускания, причём в обоих случаях зависимость подчиняется закону квадратного корня. Результаты расчёта спектральной плотности напряжения теплового шума и его относительного вклада приведены в таблице 2.

Таблица 2

Спектральная плотность напряжения теплового шума и его относительный вклад при T = 300 К и Δf = 10 кГц

Сопротивление R, Ом	Спектральная плотность $e_т$, нВ/√Гц	Действующее значение в полосе 10 кГц, мкВ	Относительный вклад при U = 1 В, ·10⁻⁶	Относительный вклад при U = 10 мВ, ·10⁻⁶
50	0,91	0,091	0,09	9,1
100	1,29	0,129	0,13	12,9
1 000	4,07	0,407	0,41	40,7
10 000	12,87	1,287	1,29	128,7
100 000	40,70	4,070	4,07	407,0

Источник: расчёт автора по формуле (1).

Полученные значения позволяют сделать принципиальный вывод: при воспроизведении сигнала уровнем 1 В собственный тепловой шум даже при сопротивлении 100 кОм даёт относительный вклад около $4 \cdot 10^{-6}$, что пренебрежимо мало на фоне систематических составляющих. Однако при переходе к уровню 10 мВ тот же элемент формирует вклад $4{,}07 \cdot 10^{-4}$, то есть 0,04 %, что сопоставимо с классом точности прибора либо превышает его. Следовательно, требования к шумовым характеристикам должны нормироваться дифференцированно по поддиапазонам воспроизведения.

Для токового выхода 4–20 мА, наиболее распространённого в системах автоматизации нефтегазовых объектов, оценка даёт иной результат. При сопротивлении нагрузки 250 Ом спектральная плотность составляет 2,03 нВ/√Гц, что в полосе 10 кГц соответствует напряжению 0,203 мкВ и току 0,81 нА. При допускаемой погрешности 0,02 % от диапазона 16 мА, то есть 3,2 мкА, собственный шум составляет менее 0,03 % от предела допускаемой

HSR (LONDON),
HOUGHTON STREET REVIEW JOURNAL
ISSN: 2058-5519|Impact factor-15.9
http://houghtonstreetreview.com/index.php/hsr

погрешности и практического значения не имеет. Это означает, что на токовых выходах определяющим фактором являются не собственные шумы, а внешние электромагнитные наводки и термо-ЭДС контактных соединений.

3. Фликкер-шум и фазовый шум задающего генератора. Спектральная плотность фликкер-шума описывается степенной зависимостью

$$S_\phi(f) = K_\phi / f^\alpha, \quad \alpha \approx 0{,}8 \ldots 1{,}2 \qquad (3)$$

где Kф — коэффициент, определяемый технологией изготовления активного элемента [17]. Частота излома fc, на которой фликкер-составляющая сравнивается с белым шумом, для современных малошумящих операционных усилителей лежит в пределах от единиц до сотен герц, а для стабилитронных источников опорного напряжения может достигать единиц килогерц. Именно фликкер-шум определяет долговременную нестабильность воспроизводимого сигнала и, соответственно, нестабильность между поверками.

Для генераторов переменного сигнала преобразование низкочастотных шумов активного элемента в фазовые флуктуации несущей описывается моделью Лисона [7]:

$$L(f_m) = 10 \cdot \lg\{[1 + (f_0 / (2 \cdot Q_н \cdot f_m))^2] \cdot [1 + f_c/f_m] \cdot (F \cdot k \cdot T)/(2 \cdot P_c)\} \qquad (4)$$

где f₀ — частота несущей; Qн — нагруженная добротность резонатора; fm — отстройка от несущей; fc — частота излома фликкер-шума активного элемента; F — коэффициент шума усилителя; Pc — мощность сигнала на входе активного элемента. Результаты расчёта для типовых параметров (f₀ = 10 МГц, Qн = 10⁴, fc = 10 кГц, F = 2, Pc = 1 мВт) приведены в таблице 3.

Таблица 3

Расчёт спектральной плотности фазового шума по модели Лисона

Отстройка fm, Гц	Вклад резонаторного множителя, дБ	Вклад фликкер-множителя, дБ	L(fm), дБн/Гц	Преобладающая область спектра
10	34,0	30,0	−109,8	1/f³ (фликкерная ЧМ)
100	14,2	20,0	−139,6	переход 1/f³ → 1/f²
1 000	1,0	10,4	−162,4	1/f (фликкерная ФМ)
10 000	0,01	3,0	−170,8	переход к белой ФМ
100 000	0,00	0,4	−173,4	белый фазовый шум

Источник: расчёт автора по формуле (4) при f₀ = 10 МГц, Qн = 10⁴, fc = 10 кГц, F = 2, Pc = 1 мВт.

Расчёт показывает, что в ближней зоне отстроек, наиболее значимой для метрологических применений, уровень фазового шума определяется совместным действием добротности резонатора и фликкер-шума активного элемента. Увеличение нагруженной добротности в три

HSR (LONDON),
HOUGHTON STREET REVIEW JOURNAL
ISSN: 2058-5519|Impact factor-15.9
http://houghtonstreetreview.com/index.php/hsr

раза снижает составляющую $1/f^3$ на 9,5 дБ, а снижение частоты излома fc на порядок уменьшает вклад фликкер-множителя примерно на 10 дБ в области малых отстроек. Во временной области соответствующая нестабильность характеризуется двухвыборочной дисперсией Аллана [9]:

$$\sigma^2_y(\tau) = \langle (\bar{y}_{i+1} - \bar{y}_i)^2 \rangle / 2 \qquad (5)$$

где $\bar{y}_i$ — среднее относительное отклонение частоты на i-м интервале усреднения τ. Использование дисперсии Аллана предпочтительно перед обычной выборочной дисперсией, поскольку последняя расходится при наличии фликкерных и более низкочастотных составляющих [10; 18].

4. Бюджет неопределённости воспроизведения сигнала. Для оценки реального соотношения составляющих составлен бюджет неопределённости воспроизведения переменного напряжения частотой 1 кГц для двух уровней выходного сигнала — 1 В и 10 мВ (таблица 4). Суммарная стандартная неопределённость вычислялась по формуле

$$u_c = \sqrt{\Sigma u_i^2} \qquad (6)$$

при условии некоррелированности составляющих.

Таблица 4

Бюджет неопределённости воспроизведения переменного напряжения частотой 1 кГц

Источник неопределённости	Тип	Распределение	Границы (значение)	u_i при 1 В, $\cdot 10^{-6}$	u_i при 10 мВ, $\cdot 10^{-6}$
Погрешность по сертификату калибровки	B	нормальное	U = 100·10⁻⁶, k = 2	50,0	50,0
Нестабильность за межповерочный интервал	B	равномерное	±30·10⁻⁶	17,3	17,3
Температурный коэффициент (5·10⁻⁶/°C, ±5 °C)	B	равномерное	±25·10⁻⁶	14,4	14,4
Влияние сопротивления нагрузки	B	равномерное	±10·10⁻⁶	5,8	5,8
Нелинейность и коэффициент гармоник	B	равномерное	±20·10⁻⁶	11,5	11,5
Собственный шум тракта (R = 10 кОм, Δf = 10 кГц)	B	нормальное	1,29 мкВ	1,3	129,0
Разброс отсчётов при измерении	A	нормальное	s/√n	8,0	8,0

HSR (LONDON),
HOUGHTON STREET REVIEW JOURNAL
ISSN: 2058-5519|Impact factor-15.9
http://houghtonstreetreview.com/index.php/hsr

Электромагнитные наводки промышленного объекта	B	равномерное	$\pm 40 \cdot 10^{-6}$ / $\pm 300 \cdot 10^{-6}$	23,1	173,2
Суммарная стандартная неопределённость uc	—	—	—	61,4	223,3
Расширенная неопределённость U (k = 2)	—	—	—	122,9 (0,012 %)	446,7 (0,045 %)

Источник: расчёт автора в соответствии с [3].

Анализ бюджета выявляет качественное изменение структуры неопределённости при переходе к малым уровням сигнала. При уровне 1 В доминирует погрешность, унаследованная от эталона при калибровке (доля около 66 % суммарной дисперсии), а вклад собственного шума пренебрежимо мал. При уровне 10 мВ картина обратная: собственный шум и наводки формируют совместно около 93 % суммарной дисперсии, а расширенная неопределённость возрастает в 3,6 раза. Это означает, что нормирование единого значения основной погрешности на весь диапазон воспроизведения методически некорректно и приводит к завышению фактической точности на младших поддиапазонах.

5. Методы улучшения метрологических характеристик. На основе полученных соотношений сформирован комплекс мер, направленных на снижение шумовой составляющей. Их количественная оценка приведена в таблице 5.

Таблица 5

Методы снижения шумовой составляющей и их ожидаемая эффективность

Метод	Механизм воздействия	Снижаемая составляющая	Ожидаемый эффект	Ограничения
Снижение сопротивлений критических узлов с 10 кОм до 1 кОм	уменьшение множителя $\sqrt{R}$ в (1)	тепловой шум	в 3,2 раза (на 10 дБ)	рост потребляемой мощности и нагрузки на усилитель
Ограничение шумовой полосы с 100 до 10 кГц	уменьшение множителя $\sqrt{\Delta f}$ в (1)	тепловой и дробовой шум	в 3,2 раза (на 10 дБ)	ухудшение динамических характеристик и формы фронта
Применение малошумящих операционных усилителей с низкой fc	снижение Kф и частоты излома в (3)	фликкер-шум	сдвиг fc на порядок вниз	стоимость и доступность элементной базы
Модуляционный (chopper) метод и	перенос полезного сигнала в область	фликкер-шум,	практически полное	появление тактовых помех, ограничение

HSR (LONDON),
HOUGHTON STREET REVIEW JOURNAL
ISSN: 2058-5519|Impact factor-15.9
http://houghtonstreetreview.com/index.php/hsr

автоматическая коррекция нуля	выше fc	дрейф нуля	подавление 1/f-составляющей	полосы
Термостатирование источника опорного напряжения	стабилизация рабочей температуры	температурная составляющая	с $\pm 25 \cdot 10^{-6}$ до $\pm 5 \cdot 10^{-6}$	энергопотребление, время выхода на режим
Усреднение N независимых отсчётов	уменьшение случайной составляющей как $1/\sqrt{N}$	шум и разброс отсчётов	при N = 100 — в 10 раз	увеличение времени поверки
Экранирование, гальваническая развязка, фильтрация цепей питания	подавление кондуктивных и излучаемых помех	электромагнитные наводки	с $\pm 40 \cdot 10^{-6}$ до $\pm 10 \cdot 10^{-6}$	конструктивные и стоимостные затраты
Повышение нагруженной добротности задающего контура в 3 раза	уменьшение множителя $(f_0/2Q_н f_m)^2$ в (4)	фазовый шум в области $1/f^3$	на 9,5 дБ	габариты и стоимость резонатора

Источник: разработано автором на основе [7]; [8]; [11]; [12]; [16].

Совместное применение первых двух мер снижает тепловую составляющую в 10 раз, что для уровня 10 мВ уменьшает её вклад со $129 \cdot 10^{-6}$ до $12{,}9 \cdot 10^{-6}$. При одновременном снижении наводок до $\pm 10 \cdot 10^{-6}$ ($u = 5{,}8 \cdot 10^{-6}$) суммарная стандартная неопределённость на этом уровне уменьшается с $223{,}3 \cdot 10^{-6}$ до $58{,}6 \cdot 10^{-6}$, то есть в 3,8 раза, и структура бюджета вновь становится сопоставимой с бюджетом для уровня 1 В. Таким образом, ресурс повышения точности на младших поддиапазонах лежит не в области улучшения эталонной базы, а в области схемотехники и конструктивной защиты прибора.

ОБСУЖДЕНИЕ

Полученные результаты позволяют сформулировать несколько выводов, имеющих практическое значение для метрологического обеспечения нефтегазовых предприятий. Во-первых, шумовая составляющая имеет принципиально иную природу, чем систематическая: она не устраняется калибровкой и не описывается поправкой, поэтому её ограничение является задачей конструирования, а не последующей обработки результатов. Во-вторых, относительный вклад шума обратно пропорционален уровню воспроизводимого сигнала, вследствие чего наиболее уязвимыми оказываются младшие поддиапазоны, которые на практике используются при поверке первичных преобразователей с малым выходным сигналом — термопар, тензорезистивных датчиков давления, датчиков перепада давления.

В-третьих, специфика отрасли смещает соотношение составляющих в пользу внешних воздействий. Расчёт для токового выхода показал, что собственный шум тракта составляет менее 0,03 % от предела допускаемой погрешности, тогда как наводки от частотно-

HSR (LONDON),
HOUGHTON STREET REVIEW JOURNAL
ISSN: 2058-5519|Impact factor-15.9
http://houghtonstreetreview.com/index.php/hsr

регулируемых приводов и протяжённых линий связи в отдельных случаях превышают собственный шум на два-три порядка. Отсюда следует, что мероприятия по экранированию, гальванической развязке и организации заземления дают больший метрологический эффект, чем дальнейшее улучшение малошумящих свойств элементной базы, — при условии, что уровень сигнала не является предельно малым.

В-четвёртых, целесообразно дополнить методики поверки калибраторов требованием нормирования спектральной плотности шума выходного сигнала либо эквивалентного среднеквадратического значения шума в заданной полосе, дифференцированно по поддиапазонам. Такое требование согласуется с общей логикой оценивания неопределённости [3] и с требованиями к компетентности калибровочных лабораторий [4], а также обеспечивает сопоставимость результатов, полученных в лабораторных и промышленных условиях.

Ограничения проведённого исследования связаны с его расчётным характером. Значения температурного коэффициента, нестабильности за межповерочный интервал и уровня наводок приняты типовыми и подлежат уточнению по данным эксплуатации конкретных типов приборов. Экспериментальная проверка предложенных оценок на действующих объектах отрасли, включая измерение спектральной плотности шума и построение графика дисперсии Аллана для реальных калибраторов, составляет предмет дальнейших исследований.

ВЫВОДЫ

1. Систематизированы источники шума в тракте генератора электрических сигналов и установлено, что определяющими для метрологических характеристик являются тепловой шум резистивных узлов, фликкер-шум активных элементов и источников опорного напряжения, а также фазовый шум задающего генератора.

2. Расчётом по формуле Найквиста показано, что относительный вклад теплового шума при сопротивлении 10 кОм и полосе 10 кГц составляет $1{,}29 \cdot 10^{-6}$ при уровне сигнала 1 В и $128{,}7 \cdot 10^{-6}$ при уровне 10 мВ, то есть возрастает на два порядка при снижении уровня в 100 раз.

3. Составленный бюджет неопределённости даёт расширенную неопределённость ($k = 2$) $122{,}9 \cdot 10^{-6}$ для уровня 1 В и $446{,}7 \cdot 10^{-6}$ для уровня 10 мВ; при этом на старшем поддиапазоне доминирует погрешность, унаследованная от эталона, а на младшем — собственный шум и электромагнитные наводки, дающие совместно более 89 % суммарной дисперсии.

4. Расчёт фазового шума по модели Лисона показал, что повышение нагруженной добротности задающего контура в три раза снижает составляющую $1/f^3$ на 9,5 дБ, а уменьшение частоты излома фликкер-шума на порядок даёт дополнительный выигрыш около 10 дБ в области малых отстроек.

5. Предложенный комплекс мер — снижение сопротивлений критических узлов, ограничение шумовой полосы, применение модуляционного метода, термостатирование опорного источника, усреднение отсчётов и конструктивная защита от помех — обеспечивает уменьшение суммарной стандартной неопределённости на уровне 10 мВ с $223{,}3 \cdot 10^{-6}$ до $58{,}6 \cdot 10^{-6}$, то есть в 3,8 раза.

6. Обоснована целесообразность нормирования шумовых характеристик генераторов электрических сигналов дифференцированно по поддиапазонам воспроизведения в методиках поверки, применяемых на предприятиях нефтегазовой отрасли.

HSR (LONDON),
HOUGHTON STREET REVIEW JOURNAL
ISSN: 2058-5519|Impact factor-15.9
http://houghtonstreetreview.com/index.php/hsr

СПИСОК ИСПОЛЬЗОВАННОЙ ЛИТЕРАТУРЫ

1. Закон Республики Узбекистан «О метрологии» (новая редакция, утверждена Законом Республики Узбекистан от 07.04.2020 г. № ЗРУ-614). – Ташкент, 2020.
2. Закон Республики Узбекистан от 26.10.2023 г. № ЗРУ-872 «О внесении изменений и дополнений в Закон Республики Узбекистан «О метрологии» в связи с привлечением частного сектора в сферу проведения поверки средств измерений». – Ташкент, 2023.
3. ГОСТ 34100.3-2017/ISO/IEC Guide 98-3:2008. Неопределенность измерения. Часть 3. Руководство по выражению неопределенности измерения. – М.: Стандартинформ, 2017.
4. ISO/IEC 17025:2017. General requirements for the competence of testing and calibration laboratories. – Geneva: ISO, 2017.
5. Johnson J.B. Thermal agitation of electricity in conductors // Physical Review. – 1928. – Vol. 32, № 1. – P. 97–109.
6. Nyquist H. Thermal agitation of electric charge in conductors // Physical Review. – 1928. – Vol. 32, № 1. – P. 110–113.
7. Leeson D.B. A simple model of feedback oscillator noise spectrum // Proceedings of the IEEE. – 1966. – Vol. 54, № 2. – P. 329–330.
8. Hajimiri A., Lee T.H. A general theory of phase noise in electrical oscillators // IEEE Journal of Solid-State Circuits. – 1998. – Vol. 33, № 2. – P. 179–194.
9. Allan D.W. Statistics of atomic frequency standards // Proceedings of the IEEE. – 1966. – Vol. 54, № 2. – P. 221–230.
10. IEEE Std 1139-2022. IEEE Standard Definitions of Physical Quantities for Fundamental Frequency and Time Metrology – Random Instabilities. – New York: IEEE, 2022.
11. Rubiola E. Phase Noise and Frequency Stability in Oscillators. – Cambridge: Cambridge University Press, 2009.
12. Motchenbacher C.D., Connelly J.A. Low-Noise Electronic System Design. – New York: John Wiley & Sons, 1993.
13. ГОСТ 8.586.1-2005. ГСИ. Измерение расхода и количества жидкостей и газов с помощью стандартных сужающих устройств. Часть 1. Принцип метода измерений и общие требования. – М.: Стандартинформ, 2006.
14. JCGM 200:2012. International vocabulary of metrology – Basic and general concepts and associated terms (VIM). – 3rd ed. – Sèvres: BIPM, 2012.
15. IEC 61000-6-2:2016. Electromagnetic compatibility (EMC). Part 6-2: Generic standards – Immunity standard for industrial environments. – Geneva: IEC, 2016.
16. van der Ziel A. Noise in Solid State Devices and Circuits. – New York: John Wiley & Sons, 1986.
17. Keshner M.S. 1/f noise // Proceedings of the IEEE. – 1982. – Vol. 70, № 3. – P. 212–218.

HSR (LONDON),
HOUGHTON STREET REVIEW JOURNAL
ISSN: 2058-5519|Impact factor-15.9
http://houghtonstreetreview.com/index.php/hsr

18. Barnes J.A., Chi A.R., Cutler L.S., et al. Characterization of frequency stability // IEEE Transactions on Instrumentation and Measurement. – 1971. – Vol. IM-20, № 2. – P. 105–120.

19. Riley W.J. Handbook of Frequency Stability Analysis. NIST Special Publication 1065. – Boulder: National Institute of Standards and Technology, 2008.